

Mapa de carbono almacenado en la biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos a partir del procesamiento de datos en la nube

Alan Evequoz Gonzalez Garmendia

Licenciatura en Biología

Universidad Autónoma de Entre Ríos

Facultad de Ciencia y Tecnología

2025

Universidad Autónoma de Entre Ríos

Facultad de Ciencia y Tecnología

Carrera: Licenciatura en Biología

Título de Trabajo final: Mapa de carbono almacenado en la biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos a partir del procesamiento de datos en la nube

Tesista: Evequoz Gonzalez Garmendia, Alan

Directores: Dra. Zamboni, Lisandra Pamela

Dra. Piani, Virginia Alejandra

Lugar y fecha de entrega: Diamante, 28 de marzo de 2025

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Entre Ríos, Facultad de Ciencia y Tecnología y al Centro Regional de Geomática (CeReGeo).

A mis directoras Pamela y Virginia, por su confianza, aportes, dedicación y estímulo hasta el último minuto. A Walter Sione por la motivación para iniciar esta tesis. A Fernando Tentor por compartir su conocimiento de uso de herramientas y programas.

A mi familia, amigos y todas las personas que estuvieron a mi lado a lo largo de este trayecto, respaldando directa o indirectamente mi esfuerzo y dedicación.

A Laura Sanchez, al Consejo de carrera de la Lic. en Biología, y a la Secretaría Académica de la FCyT UADER por la predisposición para resolver las solicitudes con celeridad.

A los evaluadores de esta tesis, por sus comentarios y sugerencias.

Al Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) por la beca EVC, al Proyecto Federal de Innovación (PFI Aceñolaza), al proyecto UADER PIDAC Maldonado.

Tabla de contenido

1. Introducción	5
2. Objetivos.....	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3. Materiales y métodos	9
3.1 Área de Estudio	9
3.2 Metodología.....	15
a. Revisión de bibliografía de referencia	15
b. Selección y utilización de software SIG	16
c. Biomasa Aérea y almacenamiento de carbono.....	16
d. Bases de Datos Geográficas propias.....	18
e. Validación y análisis de datos.....	19
f. Cobertura y Uso del Suelo.....	23
4. Resultados y discusión	25
a. Revisión de bibliografía de referencia	25
b. Biomasa Aérea y almacenamiento de carbono.....	26
c. Cobertura y Uso del Suelo.....	35
d. Validación.....	37
5. Conclusiones	42
6. Bibliografía.....	43

1. Introducción

La captura y el almacenamiento de carbono en ecosistemas terrestres son esenciales para mitigar el cambio climático, ya que estos sistemas actúan como sumideros que absorben dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, reduciendo la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (Legg, 2021). Dentro de estos ecosistemas, los bosques desempeñan un papel crucial debido a su alta capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa y en el suelo, lo que los convierte en aliados estratégicos en la regulación del clima global (Mo *et al.*, 2023).

La biomasa aérea (AGB, por sus siglas en inglés) es uno de los principales compartimentos donde se almacena el carbono en los ecosistemas terrestres, y su estudio es fundamental para comprender los procesos de captura y almacenamiento de carbono, debido a su relación directa con los ciclos biogeoquímicos (IPCC, 2003; IPCC, 2006). La biomasa aérea incluye todos los componentes vivos sobre el suelo, como troncos, ramas, hojas y corteza, que representan la mayor fracción de la biomasa total en los bosques (Brown, 1997). Sumado a esto, su estimación presenta menos desafíos logísticos en comparación con otros compartimentos, como la biomasa subterránea o el carbono orgánico del suelo, lo que facilita su medición y análisis a escala regional (Gasparri y Manghi, 2004). Por lo tanto, los estudios con enfoque en la biomasa aérea permiten obtener una estimación robusta y representativa del carbono almacenado en la vegetación, contribuyendo a la comprensión de los patrones espaciales y temporales de captura y almacenamiento de carbono a escala regional, como es el caso de la provincia de Entre Ríos.

El análisis de los patrones espaciales de captura y almacenamiento de carbono es especialmente relevante en el contexto del cambio climático, ya que permite comprender la dinámica de los sumideros de carbono y su interacción con los usos del suelo (IPCC, 2006; Aceñolaza *et al.*, 2007; Legg, 2021; Piani, 2024). Además, esta información resulta clave para la definición de estrategias de conservación y gestión de los servicios ecosistémicos, favoreciendo la resiliencia de los ecosistemas y su capacidad de mitigación ante cambios ambientales. Sin embargo, estimar y cartografiar con precisión la cantidad de carbono almacenado en distintos tipos de cobertura vegetal a escala regional sigue siendo un desafío, y el estudio de los patrones espaciales no ha sido suficientemente profundizado (Wang *et al.*, 2024).

El enfoque por ecorregiones (Burkart *et al.*, 1999) permite el análisis a escala regional a partir de la delimitación de unidades territoriales homogéneas y representativas del funcionamiento de los ecosistemas. En Argentina, diversas regiones han sido objeto de estudios sobre biomasa aérea y carbono almacenado en bosques nativos. Gasparri y Manghi (2004) reportaron valores de biomasa aérea para distintos ecosistemas forestales: registrando aproximadamente 98 Mg MS/ha en el Parque Chaqueño, 173 Mg MS/ha en la Selva Tucumano-Boliviana, 266 Mg MS/ha en la Selva Misionera y 540 Mg MS/ha en el Bosque Andino Patagónico. Esta amplitud en los valores reportados para diferentes ecorregiones y ambientes del país evidencia la heterogeneidad de diferentes ecosistemas en cuanto a la distribución de la biomasa y el carbono.

Para la provincia de Entre Ríos, en el caso del Espinal, ecorregión que representa el aproximadamente el 43% de la superficie de la Provincia, y que cuenta con importantes

dinámicas de cambio en la cobertura vegetal debido a la expansión agropecuaria, varios estudios han estimado valores de biomasa aérea y contenido de carbono en diferentes tipos de bosque. Sione *et al.* (2018) estudiaron seis sitios en un área de bosques nativos del Espinal Entrerriano, sujetos a cambios en el uso de la tierra por deforestación. Estimaron una biomasa promedio de aproximadamente 80 Mg MS/ha, con un contenido de carbono de 40 Mg C/ha. Ledesma *et al.* (2021) describieron ecosistemas dominados por *Neltuma affinis* (ex *Prosopis affinis*) y otras especies leñosas del Espinal, sometidos a presiones agrícolas y ganaderas, con una biomasa aérea total promedio de 93 Mg MS/ha, valores mínimos de 52 Mg MS/ha y máximos de 112 aproximadamente Mg MS/ha. Sione *et al.* (2021) evaluaron la conservación de bosques en el distrito Ñandubay del Espinal, en la localidad de Aldea Santa María, Entre Ríos. Estimaron la biomasa aérea en bosques de Ñandubay-espínillo (96 Mg MS/ha), Ñandubay-espínillo con otras especies (aproximadamente 88 Mg MS/ha) y Ñandubay tipo parque (26 Mg MS/ha). El carbono almacenado en estos bosques fue de 45 Mg C/ha, 41 Mg C/ha y 12 Mg C/ha, respectivamente, con una fracción de C = 0,47*B (Sione *et al.*, 2019). Por otro lado, Sione *et al.* (2023) abordaron la relación entre las reservas de carbono en árboles y suelos en bosques semixerófitos del Espinal, registrando una biomasa aérea promedio de 65,5 Mg MS/ha, con un rango de 34 Mg MS/ha a 95,3 Mg MS/ha. El carbono almacenado presentó un promedio de 31 Mg C/ha, con valores mínimos de 16 Mg C/ha y máximos de 45 Mg C/ha, utilizando una fracción de carbono de 0,47 en la biomasa aérea. Iglesia *et al.* (2020) analizaron el almacenamiento de carbono en sistemas bajo uso ganadero extensivo de cría del centro-norte de Entre Ríos, en ambientes de bosque del Espinal bajo diferentes intensidades de manejo ganadero, cobertura (bosques cerrados y abiertos) y grado de invasión por parte de Especies Exóticas Invasoras (EEI) leñosas. Entre 2017-2019, estimaron una biomasa aérea promedio de 40 Mg MS/ha, con valores de 1 Mg MS/ha en bosques bajos, con baja cobertura (abiertos) y poco invadidos, a 110 Mg MS/ha en bosques altos, mixtos y cerrados. El carbono almacenado en esta biomasa alcanzó los 20 Mg C/ha de promedio, con un mínimo de 1 Mg C/ha y un máximo de 55 Mg C/ha, con una fracción de carbono estimada de $C=0,5*Biomasa$ (Bravo *et al.*, 2007; IPCC, 2007).

Para la ecorregión de la Pampa mesopotámica, que representa aproximadamente el 38% de la superficie provincial, Piani (2024) reportó valores para forestaciones de *Eucalyptus grandis* entre los 107 Mg MS/ha y 346 Mg MS/ha aproximadamente para diferentes situaciones de manejo, edades y tipos de suelo.

Para la ecorregión del Delta e Islas del Paraná, que representa aproximadamente el 18% de la superficie provincial, y que ha sido poco estudiada en cuanto a la estimación de la biomasa en coberturas arbóreas, Aceñolaza *et al.* (2007) describieron valores de biomasa aérea total de 100 Mg MS/ha para bosques mixtos de albardones internos dominados por timbozales, 157 Mg MS/ha para bosques simples de albardones marginales de alisales y 225 Mg MS/ha para bosques simples de albardones marginales dominados por sauzales. Para bosques simples abiertos y maduros de albardones marginales, Zamboni (2017) registró valores que variaron entre 7 y 105 Mg MS/ha aproximadamente. Del mismo modo, para esta ecorregión Piani (2024) encontró para forestaciones de salicáceas representadas principalmente por sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.) valores de biomasa entre 70 y 470 Mg MS/ha para parcelas bajo diferente manejo forestal y con distintas edades.

Estos reportes reflejan la existencia de diferencias en los distintos ecosistemas de la provincia de Entre Ríos, en cuanto a las comunidades vegetales; poniendo de relevancia la

conveniencia de estudiar los patrones espaciales de distribución de la biomasa en diferentes áreas de nuestra provincia.

La creciente disponibilidad de tecnologías avanzadas y plataformas de procesamiento de datos ha facilitado la obtención de estimaciones más precisas sobre el carbono almacenado en la biomasa forestal. Bases de datos confiables, como ESA CCI Biomass (Santoro y Cartus, 2024) y MapBiomass (2024), han proporcionado cartografía detallada sobre la biomasa en áreas globales y regionales, lo que ha permitido avances en el monitoreo y análisis de los ecosistemas. Además, productos como la cartografía de bosques de Hansen *et al.* (2013) y los trabajos de Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN) ofrecen valiosa información geoespacial sobre la distribución y el estado de los bosques, que se complementa con la cartografía de cultivos y otros tipos de cobertura de suelo.

La integración de estos datos globales con información de campo obtenida a escala en terreno es esencial para mejorar la precisión de las estimaciones y hacerlas más aplicables a las condiciones específicas de cada región. En este sentido, las Bases de Datos Geográficas generadas por los equipos de profesionales del Centro Regional de Geomática (CeReGeo), como se documenta en los trabajos de Aceñolaza *et al.* (2009), Zamboni *et al.* (2017), Piani (2024), entre otros, contribuyen a la validación y mejora de la utilidad de los productos derivados de datos satelitales, al proporcionar información local actualizada y contextualizada.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de geotecnologías y geoinformación ha revolucionado el análisis de la biomasa y el carbono almacenado en los ecosistemas. Herramientas de procesamiento de datos en la nube, como Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017), han facilitado el acceso a grandes volúmenes de datos geoespaciales y la realización de análisis complejos a escala global y regional. Estas herramientas permiten realizar cálculos y generar mapas de manera eficiente, aprovechando su capacidad para procesar y analizar grandes cantidades de datos satelitales. Sin embargo, estas plataformas presentan limitaciones en términos de resolución espacial, espectral y radiométrica, lo que puede afectar la precisión de las estimaciones, especialmente en escalas más locales. Además, pueden presentarse errores en las capas de cobertura vegetal y discrepancias entre los valores estimados y los datos de campo, lo que subraya la necesidad de adaptar las metodologías a las características particulares de cada región para obtener resultados más confiables y ajustados a la realidad local (Chuvienco Salinero, 2008).

En este contexto, herramientas como el ChatGPT, Google collab y otras que utilizan inteligencia artificial son cada vez más útiles para la revisión y adaptación de algoritmos utilizados en la aplicación de geotecnologías. Estos modelos de lenguaje natural, han demostrado ser capaces de asistir en tareas relacionadas con la alfabetización espacial, teoría de SIG y la interpretación de código, lo que facilita el trabajo de usuarios no especializados en el análisis geoespacial. Sin embargo, también existen desafíos, especialmente en tareas complejas de mapeo y razonamiento espacial avanzado (Zhang *et al.*, 2023; Hochmair *et al.*, 2024). Herramientas de procesamiento de datos en la nube como Google Collaboratory han demostrado asimismo su gran utilidad para el trabajo con grandes volúmenes de datos.

El Sistema de Información Geográfica (SIG) es, sin duda, una herramienta fundamental para el análisis y mapeo de la biomasa, ya que permite integrar, visualizar y analizar datos espaciales de manera eficiente. QGIS, un software SIG de código abierto, ofrece funcionalidades robustas para procesar y analizar datos relacionados con la biomasa, lo que facilita el desarrollo de modelos espaciales para la estimación de carbono en los ecosistemas. Las técnicas de análisis propias de las ciencias de datos permiten asimismo trabajar con grandes volúmenes de datos, pudiendo generarse bases de datos más complejas, largas y detalladas; mejorando los análisis en el dominio del tiempo y del espacio para la comprensión de los patrones espacio-temporales de los principales procesos ecológicos de los ecosistemas (Zamboni, 2017).

Así, este trabajo busca profundizar en la comprensión de los patrones espaciales del almacenamiento de carbono en ecosistemas de Entre Ríos, analizando cómo estos patrones se asocian con variables tales como las ecorregiones y la cobertura de suelo. Esta información es clave para el desarrollo de estrategias de conservación y manejo sostenible de la tierra (MST), que reconozcan y promuevan el rol de los bosques como sumideros de carbono, contribuyendo a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático (Ledezma *et al.*, 2021). A partir de estos enfoques y del marco de referencia planteado, se detallan los siguientes objetivos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Cartografiar y analizar los patrones espaciales asociados al almacenamiento del carbono en la biomasa aérea en coberturas vegetales de la provincia de Entre Ríos, mediante herramientas de procesamiento de datos en la nube.

2.2 Objetivos específicos

2.2.a Incorporar y adaptar productos geográficos disponibles a escala global, regional y local, para la estimación de carbono aéreo vegetal para el área de estudio.

2.2.b Sistematizar y analizar los productos de biomasa aérea y aquellos obtenidos en terreno, identificando patrones espaciales y variabilidad en diferentes tipos de cobertura vegetal.

2.2.c Cuantificar el contenido de carbono en distintas coberturas vegetales utilizando bases de datos, modelos y ecuaciones adaptadas a la región.

2.2.d Evaluar las limitaciones y aplicaciones de los productos globales en contextos regionales y proponer recomendaciones metodológicas.

3. Materiales y métodos

3.1 Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la provincia de Entre Ríos, Argentina (Figura 1), abarcando toda su extensión territorial. Se empleó en esta tesis un enfoque de trabajo regional para analizar los patrones espaciales de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea.

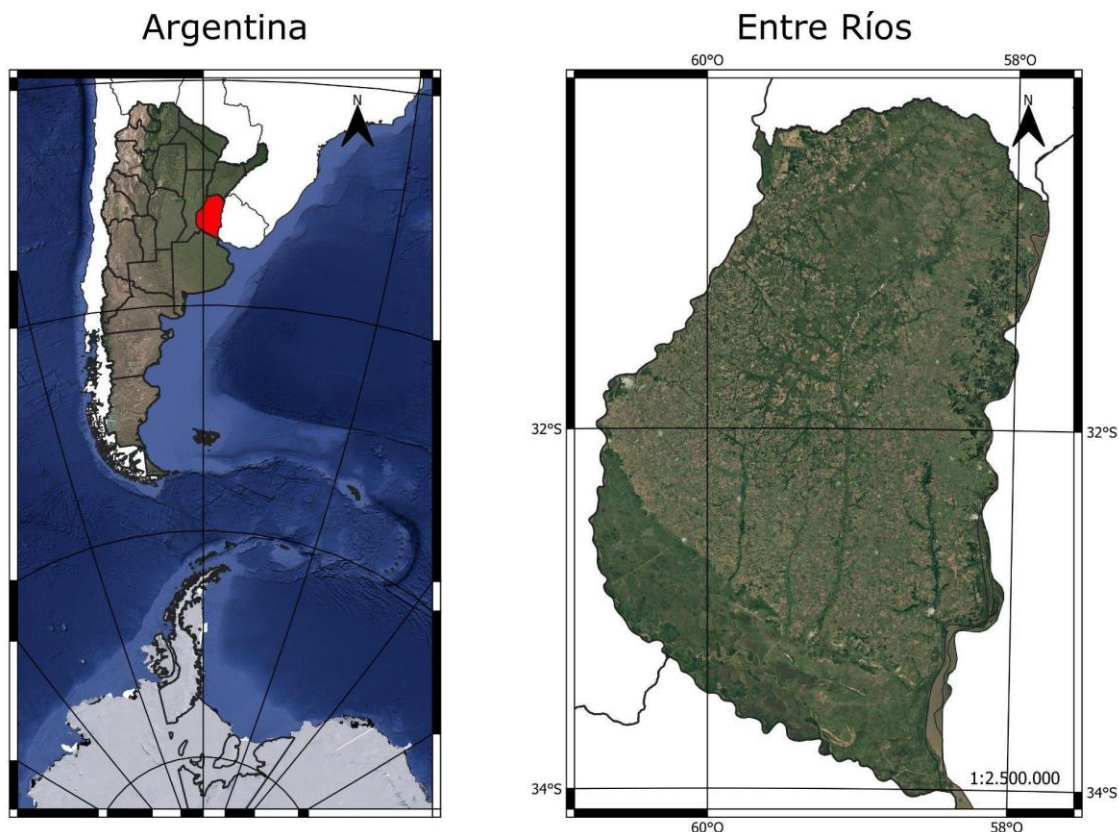


Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia. Límites político administrativos - Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina. Imágenes de Google Satellite © Google.

A modo de caracterización físico-ambiental-ecológica del área de estudio, se describe a continuación algunos aspectos relevantes de la provincia de Entre Ríos:

a. Caracterización climática

La provincia de Entre Ríos, ubicada en la región mesopotámica de Argentina, presenta un clima predominantemente templado húmedo, con variaciones locales influenciadas por la latitud, la cercanía a grandes cuerpos de agua y la dinámica atmosférica regional. Según el Atlas Climático Digital de la República Argentina de Bianchi y Cravero (2010), las características climáticas de la provincia pueden analizarse a partir de los principales parámetros meteorológicos: temperatura, precipitaciones, humedad y vientos.

Las precipitaciones en Entre Ríos son abundantes y relativamente bien distribuidas a lo largo del año, con valores anuales que oscilan entre 900 y 1400 mm (Figura 2a). Se observa un gradiente decreciente de este a oeste, con mayores acumulados en la zona cercana al río Uruguay y menores en el oeste provincial. El verano es la estación más lluviosa, debido a la influencia de sistemas convectivos y frentes cálidos, mientras que en invierno las precipitaciones tienden a disminuir, aunque no cesan completamente (Bianchi y Cravero, 2010).

En cuanto a la temperatura, Entre Ríos exhibe valores anuales que oscilan entre 17°C y 19°C en promedio, con una marcada diferencia estacional (Figura 2b). Durante el verano, las temperaturas medias alcanzan los 24-26°C, con máximas absolutas que pueden superar los 40°C, especialmente en el norte de la provincia. En invierno, las temperaturas medias descienden a 10-12°C, con mínimas absolutas que pueden llegar a valores cercanos a 0°C en algunas localidades del sur y oeste entrerriano. La amplitud térmica es moderada debido a la influencia de la humedad y la presencia de masas de aire provenientes del Atlántico (Bianchi y Cravero, 2010).

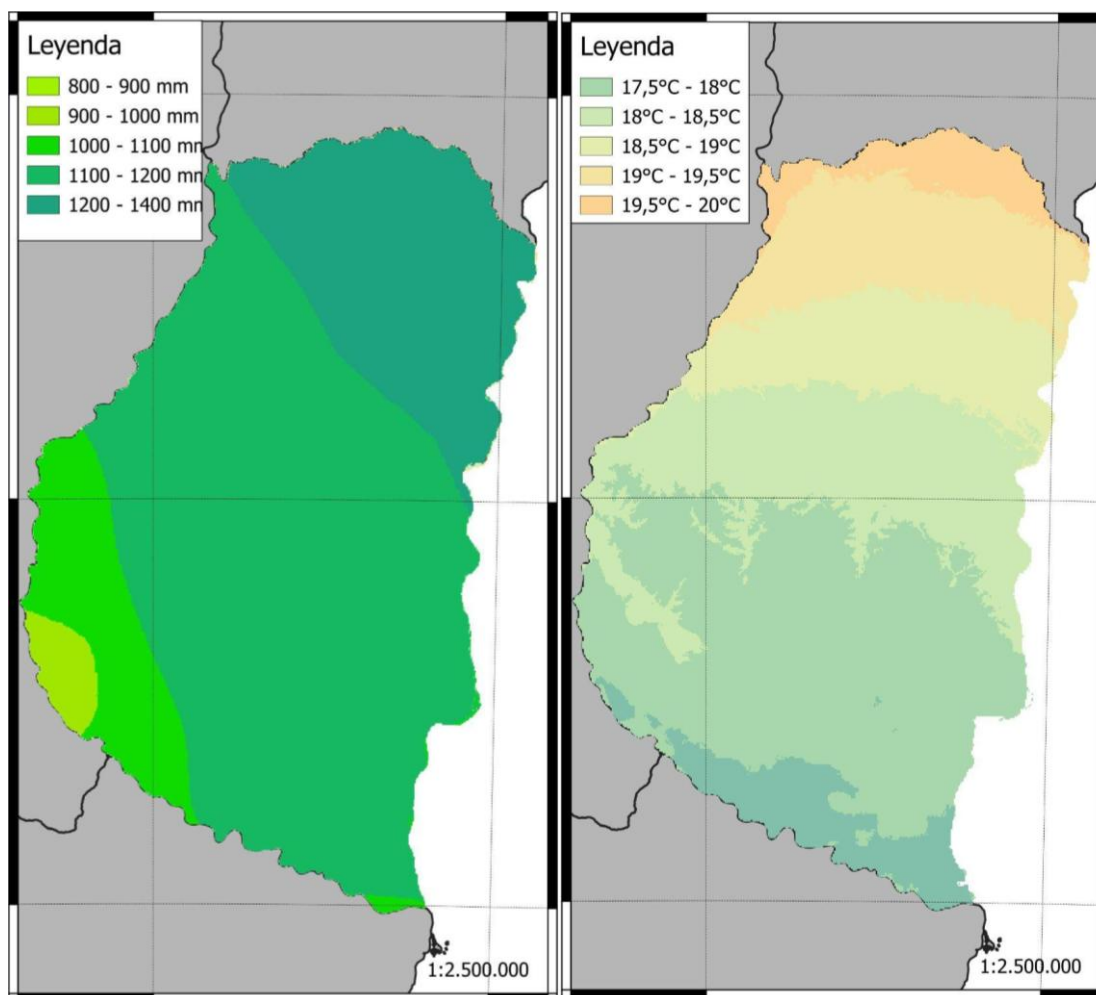


Figura 2a (izquierda). Mapa de isohietas de Entre Ríos. Figura 2b (derecha). Mapa de isotermas de Entre Ríos. Adaptado de Bianchi y Cravero (2010).

b. Caracterización edáfica

Los suelos entrerrianos pertenecen principalmente a los órdenes Molisoles, Vertisoles, Entisoles y Alfisoles (Figura 3). Estas unidades edáficas varían en su fertilidad, drenaje y aptitud agropecuaria, lo que condiciona los usos productivos del territorio (INTA, 1990).

Los Molisoles son los suelos más productivos de la provincia y predominan en la región centro-sur, especialmente en la Pampa Ondulada y parte de la Pampa Mesopotámica. Se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica, estructura granular y buen drenaje, lo que los hace altamente aptos para la agricultura (Soriano *et al.*, 1991). Dentro de esta categoría se encuentran los Argiudoles, que presentan un horizonte B arcilloso y son ideales para cultivos como soja, trigo y maíz. No obstante, el uso intensivo de estos suelos ha generado problemas de erosión y pérdida de materia orgánica, lo que pone en riesgo su productividad a largo plazo (INTA, 1990).

Los Vertisoles se encuentran principalmente en la región occidental de la provincia, en áreas con baja pendiente y problemas de drenaje. Estos suelos tienen un alto contenido de arcilla, lo que provoca que se expandan con la humedad y se contraigan en períodos secos, formando grietas profundas. Debido a esta característica, presentan dificultades para la infiltración del agua y el laboreo agrícola, por lo que su principal uso es la ganadería extensiva.

Los Entisoles son suelos jóvenes con escaso desarrollo y predominan en el Delta e Islas del Paraná. Se componen de materiales sedimentarios recientes, como arena, limo y arcilla, transportados por los ríos Paraná y Uruguay (INTA, 1990).

Los Alfisoles se encuentran en la región noreste y en áreas de transición entre el Espinal y la Pampa Mesopotámica. Son suelos bien estructurados, con un horizonte B de acumulación de arcilla y una fertilidad moderada (Soriano *et al.*, 1991). Aunque poseen menor cantidad de materia orgánica que los Molisoles, son adecuados para la producción agrícola y ganadera.

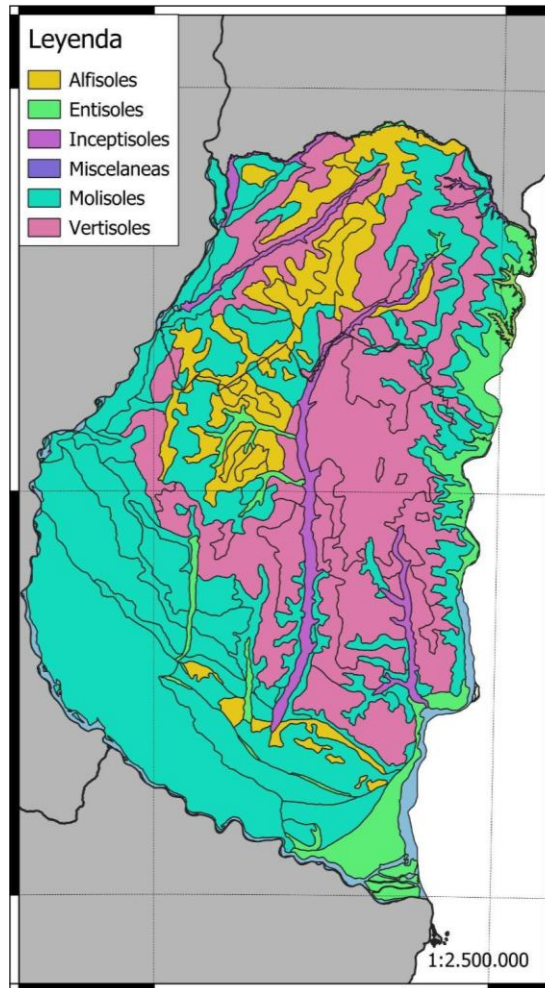


Figura 3. Mapa de suelos de Entre Ríos. Adaptado de INTA (1990).

c. Caracterización fitogeográfica

La provincia de Entre Ríos pertenece a dos grandes dominios fitogeográficos: el Dominio Chaqueño, que incluye la Provincia Fitogeográfica del Espinal y la Provincia Fitogeográfica Pampeana, y el Dominio Amazónico, representado por la Provincia Fitogeográfica Paranaense (Oyarzabal *et al.*, 2018) (Figura 4). Esta diversidad genera un mosaico de ecosistemas que varían desde bosques xerófilos hasta humedales y selvas ribereñas, influenciados por factores climáticos, edáficos e hidrológicos.

Dentro del Dominio Chaqueño, la Provincia Fitogeográfica del Espinal se caracteriza por bosques abiertos de ñandubay (*Neltuma affinis*) y algarrobo (*Neltuma nigra*), acompañados de especies como *Celtis tala* y gramíneas como *Panicum prionitis* y *Sorghastrum pellitum*. La Provincia Fitogeográfica Pampeana situada en el suroeste de la provincia, está dominada por pastizales de gramíneas megatérmicas como *Axonopus affinis* y *Paspalum notatum*, con relictos de bosques de espinal en suelos bien drenados. La expansión agropecuaria ha fragmentado estos ecosistemas, reduciendo la cobertura forestal y alterando la biodiversidad original (Oyarzabal *et al.*, 2018).

En el Dominio Amazónico, la Provincia Fitogeográfica Paranaense alberga una vegetación influenciada por las inundaciones periódicas de los ríos Paraná y Uruguay. Sus bosques ribereños están dominados por sauces criollos (*Salix humboldtiana*), timbóes (*Enterolobium contortisiliquum*) y especies higrófilas como *Nectandra angustifolia* y *Myrsine laetevirens*. Además, se encuentran extensos pastizales inundables con *Echinochloa polystachya* y *Schoenoplectus californicus*, junto con vegetación flotante característica de cuerpos de agua permanentes, como *Eichhornia crassipes* (camalote) y *Pistia stratiotes* (Oyarzabal *et al.*, 2018).

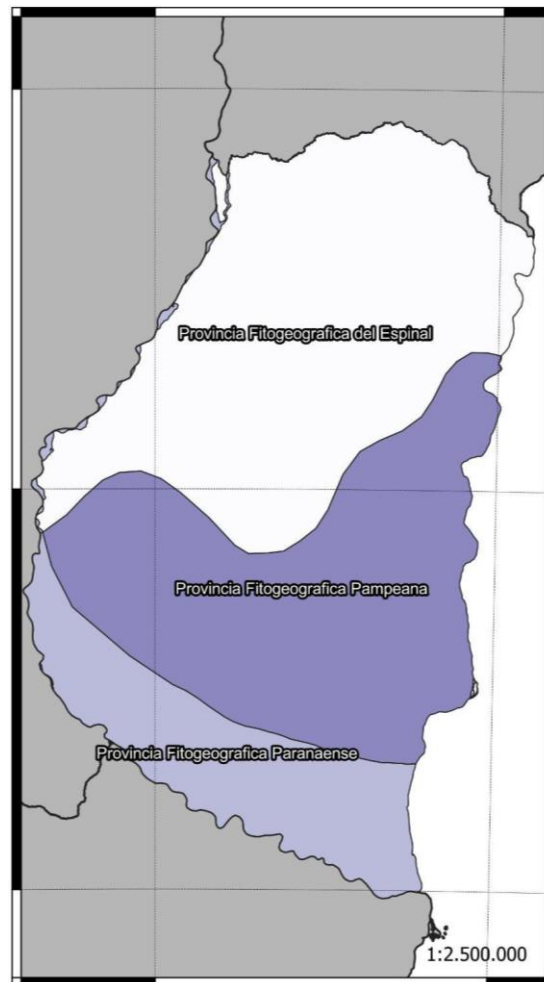


Figura 4. Mapa de provincias fitogeográficas de Entre Ríos. Adaptado de Oyarzabal *et al.* (2018).

d. Caracterización de ecorregiones

En este trabajo se adopta el término "Ecorregión" siguiendo la definición propuesta por Burkart *et al.* (1999), quienes la conceptualizan como: "Un territorio geográficamente definido en el que dominan determinadas condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente uniformes o recurrentes, caracterizado por una fisonomía vegetal de comunidades naturales y seminaturales que comparten un grupo considerable de especies dominantes, una dinámica y condiciones ecológicas generales, y cuyas interacciones son indispensables para su persistencia a largo plazo". De acuerdo con este marco, en la

provincia de Entre Ríos se identifican las ecorregiones del Espinal, Delta e Islas del Paraná, Pampa Mesopotámica y, en una proporción menor, los Esteros del Iberá (Figura 5).

La ecorregión del Espinal ocupa gran parte del centro y oeste de la provincia. Se caracteriza por un clima subhúmedo a húmedo, con precipitaciones anuales que oscilan entre los 900 y 1200 mm. Su relieve es predominantemente de lomas y planicies con suelos arenosos o arcillosos. La vegetación está dominada por bosques xerófilos con especies como el algarrobo (*Neltuma nigra*, *N. alba*) y el ñandubay (*N. affinis*), además de pastizales abiertos con gramíneas como el paja brava (*Sorghastrum setosum*). Entre su fauna destacan el zorro gris (*Lycalopex gymnocercus*), el tatú mulita (*Dasypus hybridus*) y aves como el ñacurutú (*Bubo virginianus*) y el cardenal amarillo (*Gubernatrix cristata*), este último en peligro de extinción. También se encuentran reptiles como la yarará grande (*Bothrops alternatus*).

La ecorregión del Delta e Islas del Paraná se extiende desde el noreste hasta el sur de la provincia, abarcando el sistema de humedales, ríos y lagunas del Delta del Paraná. Su clima es húmedo, con precipitaciones entre 1000 y 1400 mm anuales y una alta humedad relativa. El relieve es bajo y anegadizo, con suelos predominantemente aluviales. La vegetación incluye bosques ribereños compuestos por sauce criollo (*Salix humboldtiana*) y aliso de río (*Tessaria integrifolia*), pajonales con cortadera (*Cortaderia selloana*) y totora (*Typha domingensis*), así como palmares dominados por el pindó (*Syagrus romanzoffiana*). En cuanto a la fauna, es común encontrar mamíferos como el carpincho (*Hydrochoerus hydrochaeris*) y el lobito de río (*Lontra longicaudis*), además de aves como el chajá (*Chauna torquata*) y el tuyuyú (*Mycteria americana*). Entre los reptiles destaca el yacaré overo (*Caiman latirostris*). Las amenazas principales incluyen la deforestación para cultivos de álamos y sauces, la contaminación por agroquímicos e industriales, y la construcción de terraplenes que alteran los ciclos hidrológicos naturales.

La ecorregión de la Pampa Mesopotámica se encuentra en el centro-sur de Entre Ríos y forma parte de la llanura pampeana. Su clima es templado húmedo, con precipitaciones superiores a los 1000 mm anuales y temperaturas moderadas. El relieve es predominantemente llano, con suelos fértiles que han favorecido la expansión agropecuaria. Su vegetación original estaba dominada por pastizales con especies de la familia Poaceae, como el pasto miel (*Paspalum dilatatum*) y el flechilla (*Stipa spp.*), aunque en la actualidad gran parte de la ecorregión ha sido modificada para la agricultura y la ganadería. La fauna autóctona incluye especies como el venado de las pampas (*Ozotoceros bezoarticus*), que hoy en día se encuentra prácticamente extinto en la región, además de aves como el ñandú (*Rhea americana*) y pequeños mamíferos como la comadreja overa (*Didelphis albiventris*).

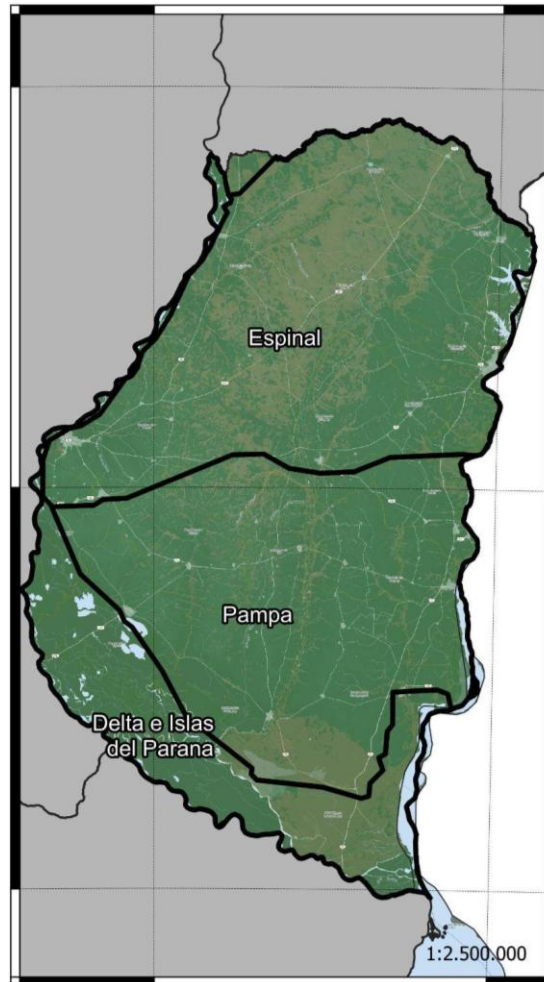


Figura 5. Mapa de ecorregiones de Entre Ríos. Adaptado de Burkart *et al.* (1999).

3.2 Metodología

Atendiendo a los objetivos de la tesis, se propuso una metodología a fin de integrar las distintas actividades desarrolladas tanto de revisión como de procesamiento de datos, análisis y validación. Las mismas se describen a continuación:

a. Revisión de bibliografía de referencia

Se llevó a cabo una revisión y actualización de bibliografía, centrada en trabajos relevantes para el área de estudio, con énfasis en estimaciones de carbono y de biomasa aérea. Además, se construyó una base de datos que consolida información sobre carbono y biomasa, obtenida tanto de datos de terreno como de fuentes secundarias para el área de estudio. Entre las principales contribuciones científicas y técnicas utilizadas de referencia se encuentran los estudios realizados por Sione *et al.* (2018), Ledesma *et al.* (2021) y Sione *et al.* (2021), las contribuciones de los profesionales del CeReGeo: Aceñolaza *et al.* (2007); Zamboni (2017), Ecclesia *et al.* (2020) y Piani (2024) entre otros, los cuales proporcionan datos de estimación de biomasa aérea y carbono almacenado para diferentes ecosistemas del área de estudio.

Con los resultados de esta revisión se construyeron tablas (tabla 1 y tabla 2) a modo de tablero de control para organizar y sistematizar las publicaciones analizadas. La misma incluye las referencias de cada trabajo revisado, registrando información clave como los autores, año de toma de registros o año de publicación, valores promedio, máximos y mínimos de biomasa aérea y carbono almacenado, fracción de C considerada para la estimación de carbono y compartimento de biomasa estudiado.

b. Selección y utilización de software SIG

Se trabajó con el software de libre y gratuita distribución QGIS versión 3.34.15 y se utilizó la proyección POSGAR 2007 Faja 5, que es la más adecuada para la provincia de Entre Ríos. Esta proyección, que utiliza el datum WGS84, es apropiada para escalas regionales y locales, ya que minimiza las deformaciones y pérdidas de información significativa. En la región el uso de la Faja 5 no genera deformaciones mayores a medio metro por kilómetro, lo que la hace recomendable para escalas de 1:5.000 o mayores (Maldonado *et al.*, 2012). En la Figura 6 se aprecia el entorno empleado y el proyecto SIG construido, con las principales capas utilizadas en la tesis. Se aprecia la capa de Biomasa obtenida de la Agencia Espacial Europea - ESA (Biomass-CCI) para el año 2021 (Santoro y Cartus, 2024), capas de límites político administrativos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y mapa topográfico de Google Satellite.

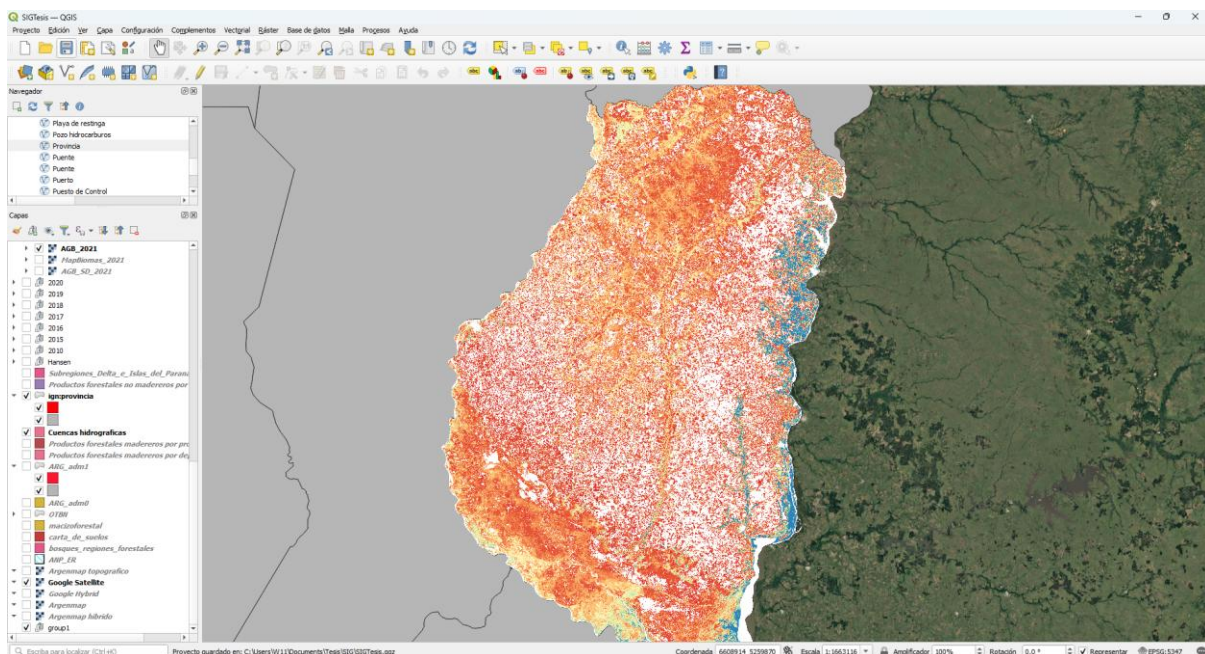


Figura 6: Proyecto de SIG elaborado en el entorno del software QGIS. Capa de biomasa aérea de ESA (Biomass-CCI)

c. Biomasa Aérea y almacenamiento de carbono

La capa de biomasa aérea (AGB) utilizada en este estudio proviene del producto de la Agencia Espacial Europea (ESA) denominado Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci) v5 (Santoro y Cartus, 2024), que ofrece estimaciones globales anuales de la

biomasa arbórea aérea expresados en toneladas de materia seca por hectárea (Mg MS/ha). Estas estimaciones se derivan de datos de observación de la Tierra, incluyendo datos de misiones como Copernicus Sentinel-1, Envisat ASAR y los satélites ALOS-1 y ALOS-2 de JAXA. El producto tiene una resolución espacial de 100 metros por píxel, lo que permite un análisis detallado de la biomasa arbórea a nivel regional.

Se descargaron las capas ráster del mencionado producto en formato GeoTiff (.tif) para el área de estudio para los años 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021. Posteriormente, las capas ráster se re proyectaron, se generó un mosaico y se recortaron a la extensión de la provincia de Entre Ríos.

Una vez obtenidos e integrados al proyecto SIG los datos de biomasa de Biomass_CCI, se procedió a la estimación del contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea. Para esto se empleó la ecuación universal de estimación del contenido de carbono a partir de datos de biomasa ($C = B * 0,5$); donde B= biomasa aérea, asumiendo que el mismo equivale aproximadamente al 50% de la materia seca sin hacer diferenciación entre especies (Brown y Lugo, 1982; IPCC 1997; Bravo *et al.*, 2007).

Tomando la extensión y resolución espacial de esta capa como referencia, se definió una cuadrícula para toda la provincia de Entre Ríos con celdas de aproximadamente 90m x 90m (Figura 7). Esta definición se realizó contemplando que la capa de referencia es la que presenta una resolución espacial conveniente para integrar el resto de los datos, al mismo tiempo, es la más relevante en cuanto al contenido de los datos para los objetivos. Cada celda de la cuadrícula fue identificada mediante un ID único, lo que posibilitó un seguimiento preciso de la variabilidad temporal de la biomasa aérea para los años 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021. A partir de capas temáticas auxiliares, se estableció la correspondencia de cada celda con unidades territoriales más amplias, asignándole la categoría de Departamento, Cuenca y Ecorregión a cada celda.

Al finalizar el proceso, se obtuvo una capa con una cuadrícula conteniendo aproximadamente 9 millones de celdas, que integró además los atributos de cada una de las capas temáticas analizadas en esta tesis. Por lo tanto, se trabajó con un notable volumen de datos que llevó a que se utilicen técnicas de análisis, equipamiento y herramientas de procesamiento en la nube adecuadas para el trabajo con grandes volúmenes de datos propias de la ciencia de datos.

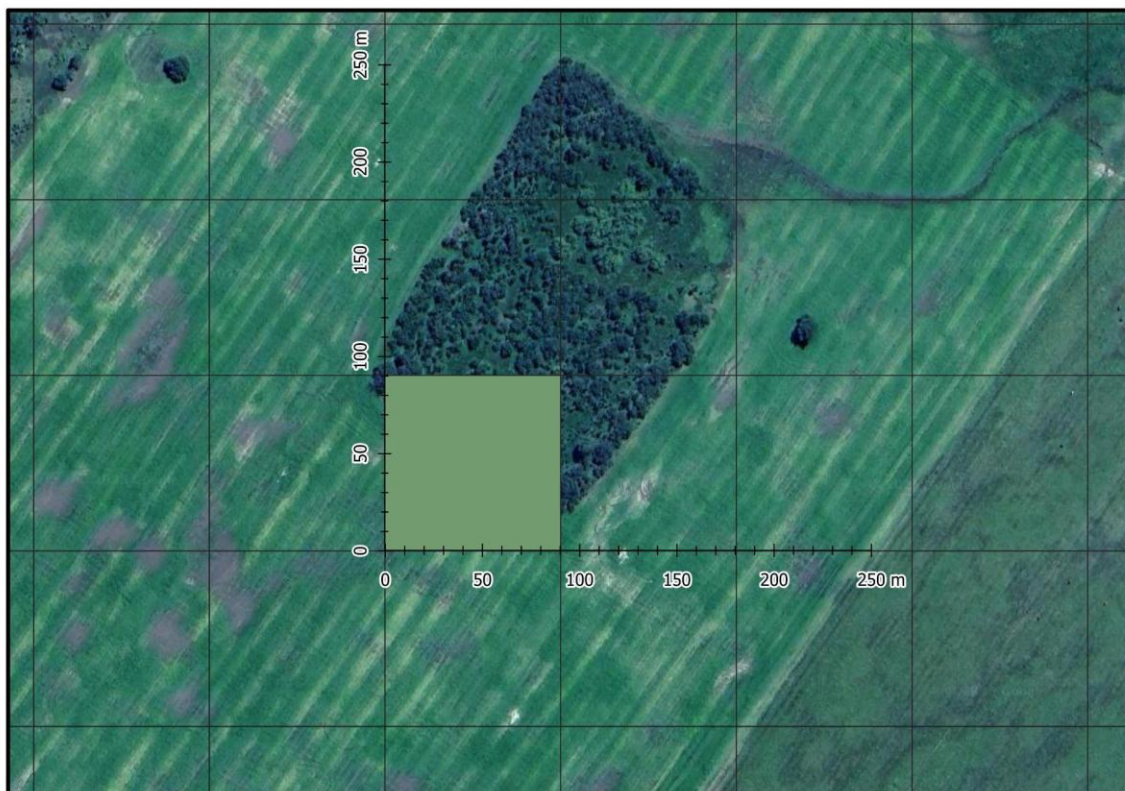


Figura 7. Ejemplo de visualización de la cuadrícula con celdas de 90m x 90m aproximadamente. Se aprecia de fondo una capa base de Google Satellite donde se posibilita la identificación visual de diferentes elementos del territorio.

d. Bases de Datos Geográficas propias

Dado que esta tesis es la continuidad de una línea de trabajo que se viene desarrollando en el Centro Regional de Geomática (CeReGeo) para diferentes áreas de la provincia, y que como resultado de la participación de los integrantes del mencionado centro, se cuenta con una importante base de datos geográficas correspondientes a actividades realizadas previamente para la región, se analizaron estos datos y se utilizaron registros como puntos de validación para analizar la precisión de los productos globales utilizados en la misma. Así por ejemplo se revisaron y analizaron tesis de doctorado, informes, publicaciones y documentos relevantes a partir de los cuales se actualizó y adaptó una base de datos geográfica de datos de terreno generados por el equipo de trabajo del CeReGeo. Entre ellos, se incluyeron la tesis doctoral de Pamela Zamboni (2017) y la tesis doctoral de Virginia Piani (2024), y un informe técnico interno con resultados de relevamientos realizados en el marco de la participación del equipo del CeReGeo en el proyecto FONTAGRO (15416 FTG/RF-15461-RG), cuyos resultados principales en este tema fueron publicados en Ecclesia y colaboradores (2020).

Se descargó de la Infraestructura de Datos Espaciales de la Facultad de Ciencia y Tecnología (IDE FCyT) la base de datos generada en el marco de la tesis de Virginia Piani, la cual incluye información sobre la biomasa de forestaciones de la provincia de Entre Ríos en dos ecorregiones de la Provincia. También se integraron datos generados para diferentes tipos de coberturas vegetales en distintos puntos de la provincia de proyectos de investigación

realizados por el equipo (FONCyT, UADER, INTA, entre otros), tesinas de grado (Albizu, Zamboni, Rodríguez) e informes técnicos; que fueron empleados para mejorar la interpretación de los datos. Se utilizaron en total 254 puntos de validación (Figuras 8 a 10) correspondientes a parcelas con presencia y dominio de cobertura arbórea, entre ellos parcelas de bosques (201 puntos) y parcelas de forestaciones (53 puntos). Se describe en el apartado de validación y análisis de datos, la metodología, fuentes y criterios empleados para la obtención de estos datos.

e. Validación y análisis de datos

Para la validación de los datos de AGB y estimación de carbono almacenado en la provincia de Entre Ríos, se utilizaron, tal como se mencionó previamente, 254 datos de campo distribuidos en tres conjuntos de datos, cada uno correspondiente a diferentes tipos de cobertura vegetal y ubicaciones geográficas dentro de la provincia; cubriendo las ecorregiones del Delta e Islas del Paraná, Pampa mesopotámica y otro para el Espinal entrerriano. No se obtuvieron puntos de validación para la ecorregión de Esteros del Iberá. Estos conjuntos de datos permitieron contrastar y ajustar las estimaciones derivadas de la capa global de biomasa ESA CCI Biomass.

El primer conjunto de datos incluye 186 puntos de bosques con un variado grado de cobertura arbórea en el norte de la provincia de Entre Ríos (Figura 8). Estos bosques, que pueden clasificarse como bosques abiertos y bosques cerrados con o sin presencia de especies exóticas invasoras (EEI) y bajo diferentes situaciones de manejo ganadero, reflejan la heterogeneidad de la cobertura vegetal en la región. Los datos de campo midieron el carbono almacenado en la biomasa arbórea para los años 2017-2018 y 2018-2019. Estos valores se compararon con la estimación de valores de carbono almacenado en biomasa aérea predichos por la capa de Biomass CCI y fueron volcados en una tabla (Tabla 3).

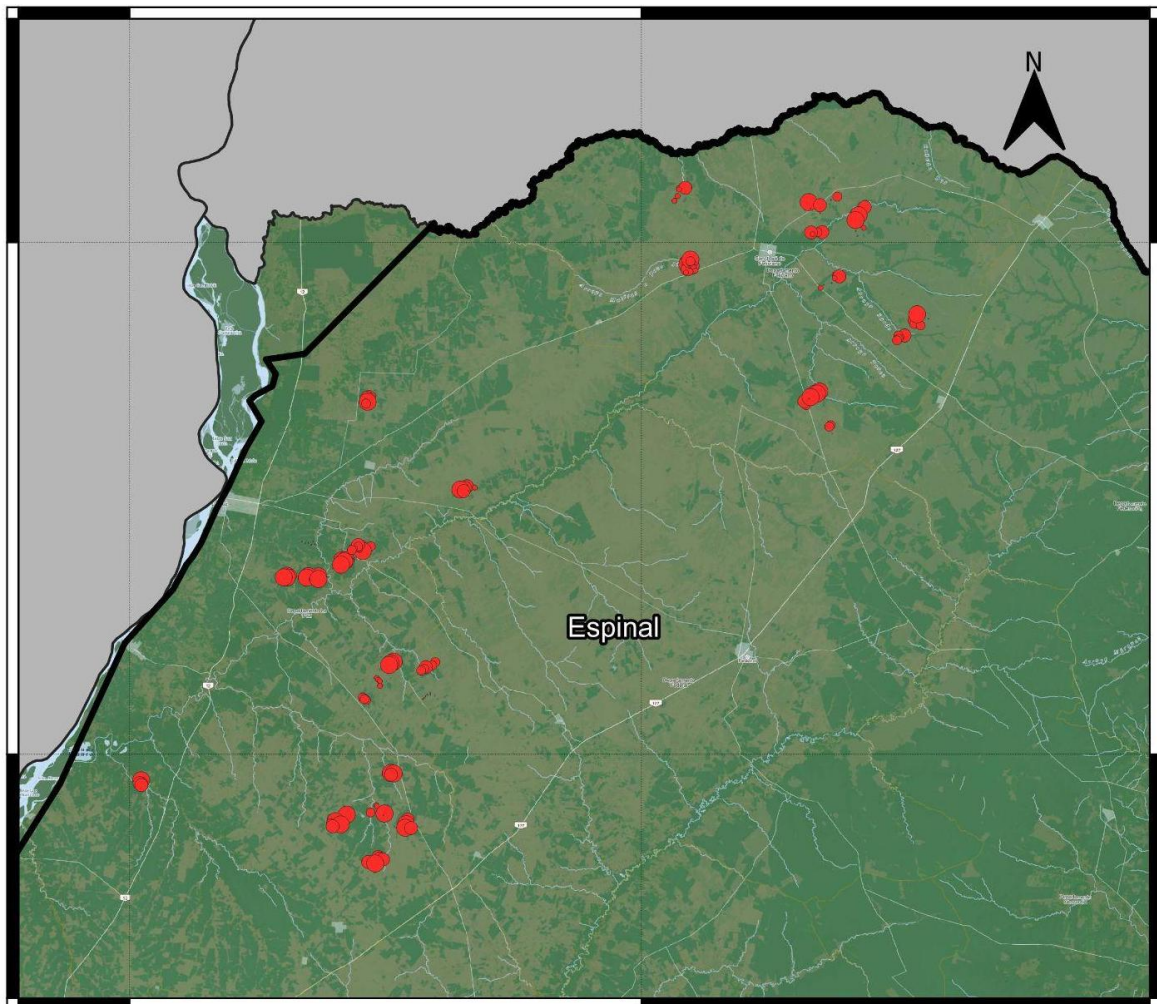


Figura 8. Ubicación de las áreas de muestreo donde se encuentran los 186 puntos pertenecientes al primer conjunto de datos para el Espinal Entrerriano.

El segundo conjunto de datos (Figura 9) incluye 15 puntos ubicados en bosques del Delta del Río Paraná (Zamboni, 2017), una ecorregión caracterizada por humedales y bosques fluviales inundables. Estos ecosistemas son particularmente importantes por su alta capacidad de almacenamiento de carbono. Los datos de campo empleados en este estudio contienen datos de la biomasa arbórea aérea para los años 2014 y 2015, y estos valores se compararon con los de la capa de ESA CCI Biomass para los años 2010 y 2015.

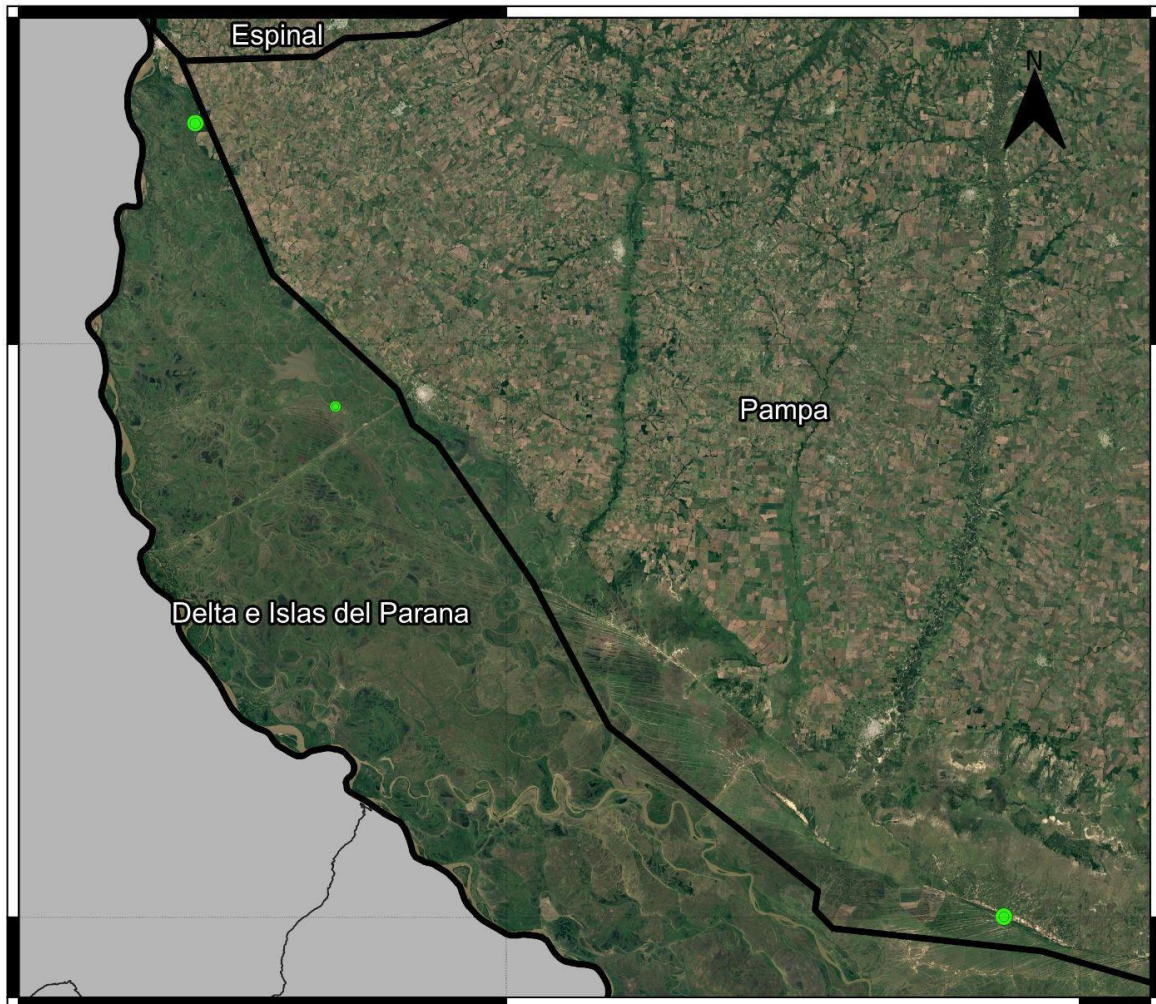


Figura 9. Ubicación de las áreas de muestreo donde se encuentran los 15 puntos pertenecientes al segundo conjunto de datos, en la ecorregión de Delta e Islas del Paraná. La separación de las dos áreas de muestreo impide visualizar claramente el detalle de los puntos, por lo que se muestran a fin de ilustrar su ubicación.

El tercer conjunto de datos (Figura 10) consta de 53 puntos de plantaciones forestales de eucalipto en la costa del Río Uruguay, en el este de la provincia de Entre Ríos, y sauce y álamo en el Delta del Río Paraná (Piani, 2024). Estas plantaciones representan un uso intensivo del suelo con fines productivos. Los datos de campo empleados en este estudio contienen datos de la AGB para el año 2021, y estos valores se compararon con los de la capa de ESA CCI Biomass para los años 2020 y 2021.

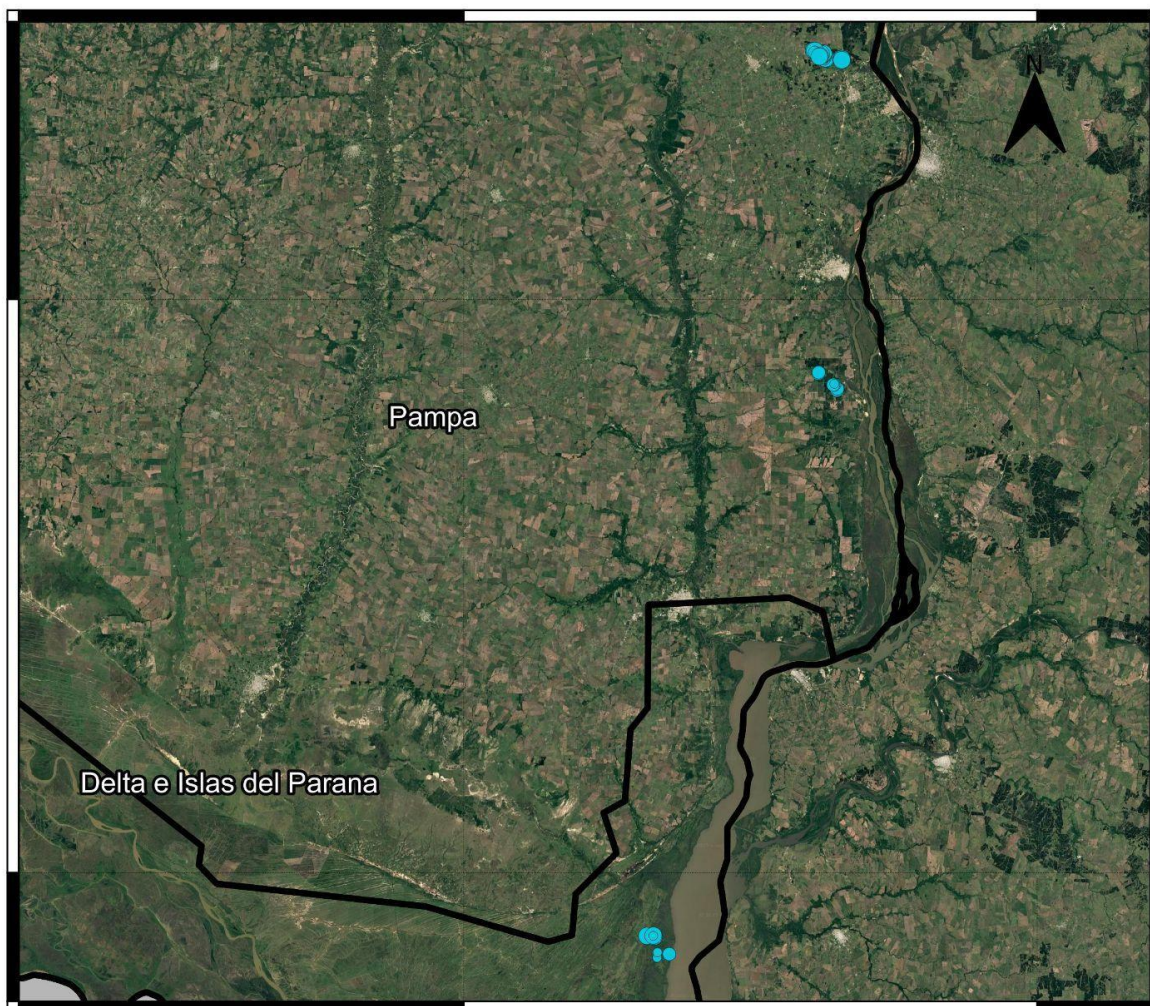


Figura 10. Ubicación de las áreas de muestreo donde se encuentran los 53 puntos pertenecientes al tercer conjunto de datos para las ecorregiones de la Pampa mesopotámica y el Delta e Islas del Paraná.

Todos los datos de terreno fueron obtenidos siguiendo la misma metodología de muestreo de la vegetación recomendada por FAO (1998), que comprende la delimitación de unidades homogéneas de vegetación, la demarcación de parcelas de aproximadamente 400m² la medición de parámetros estructurales de la vegetación y la estimación de la biomasa individual empleando la ecuación de estimación de Biomasa aérea (kg) = AB [m²] * H [m] * Cf * D [kg/m³]; donde: AB = área basal (m²); H = altura (m), Cf= coeficiente de forma adaptado a cada especie; D = densidad de madera (kg/m³). El cálculo de la biomasa aérea en Mg/ha se realizó extrapolando los valores por parcela (en Kg) a toneladas y luego multiplicándolo por la cantidad de plantas por ha. Por lo tanto, estos datos son comparables entre sí.

Para evaluar la precisión de las estimaciones, se realizaron gráficos de dispersión y se aplicaron pruebas estadísticas, incluyendo la prueba de Shapiro-Wilk modificada para evaluar la normalidad de los datos, la prueba t para dos muestras pareadas para comparar las medias, y la prueba de Wilcoxon (prueba W) para muestras pareadas cuando los datos no presentaron una distribución normal. Debido al gran volumen de datos, se decidió realizar el análisis de los mismos en la plataforma de Google Collaboratory (Figura 11), en donde se emplearon las librerías pandas, geopandas, matplotlib, scipy.stats entre otras, para realizar el análisis de datos, creación de tablas y generación de gráficos de torta y gráficos de barra para acompañar los mapas y otros resultados.

Se espera que los valores de AGB y C predichos por ESA CCI Biomass muestren una correlación significativa con los datos de campo. Las pruebas estadísticas proporcionan evidencia cuantitativa sobre la precisión de las estimaciones globales y la necesidad de ajustes metodológicos.

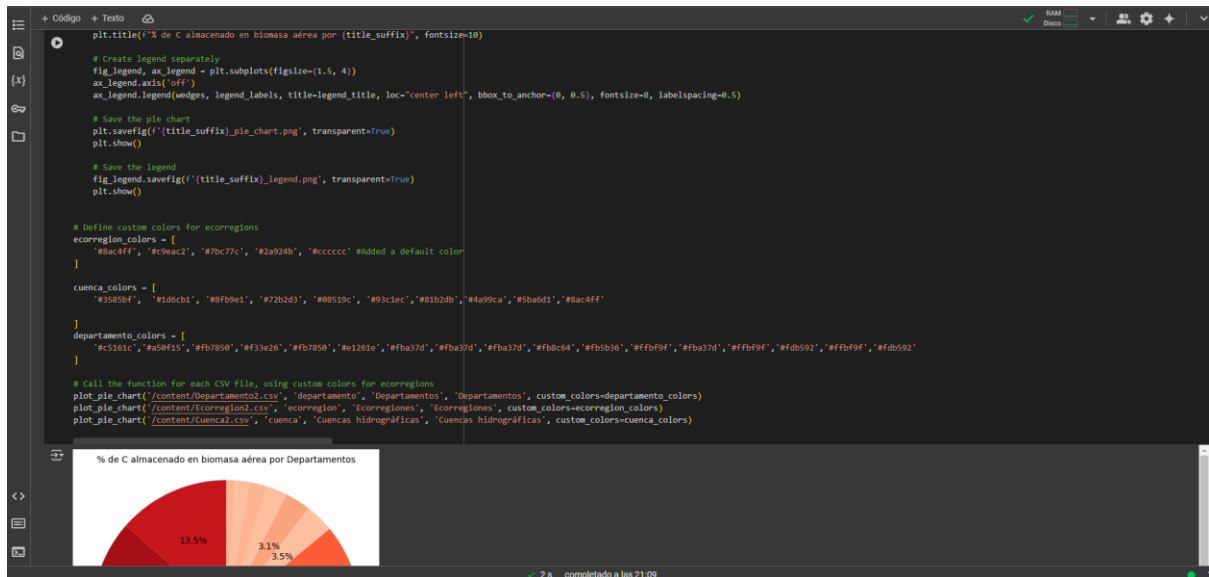


Figura 11. Entorno de Google Collaboratory, herramienta empleada para los análisis de grandes volúmenes de datos.

f. Cobertura y Uso del Suelo

Se incorporaron en el proyecto SIG de QGIS las capas de cobertura de suelo (MapBiomias Argentina) (Proyecto MapBiomias, 2024) y capas auxiliares (límites provinciales e internacionales, capas de cultivos, cursos de agua, ejidos urbanos, ANP, y otros geoservicios) extraídos de IDERA (www.idera.gob.ar) y otros repositorios de datos geográficos como el de la Dir. Hidráulica de Entre Ríos.

La capa de cobertura de suelo utilizada en esta tesis proviene del Proyecto MapBiomias Argentina, que ofrece mapas anuales de cobertura y uso del suelo con una resolución espacial de 30 metros por píxel y son de libre acceso. Estos mapas se generan a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat en la plataforma Google Earth Engine, mediante un enfoque de clasificación pixel a pixel. La Colección 1, publicada en mayo de 2024, abarca el período 1998-2022 e incluye 15 clases de cobertura y uso del suelo. Se descargaron las capas raster en formato GeoTiff (.tif) de la Argentina para los años 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021. Posteriormente, las capas se re proyectaron y se recortaron a la extensión de la provincia de Entre Ríos.

En el área de estudio se registraron las siguientes clases de Cobertura y Uso de Suelo según la clasificación de leyenda empleada por MapBiomias para su Colección 1 (Proyecto MapBiomias, 2024):

Bosque y arbustales cerrados: corresponde a vegetación natural leñosa con dosel continuo de arbóreas o arbustivas, con copas que se tocan o ligeramente separadas, con cobertura mayor o igual al 65%.

Bosque abierto: corresponde a vegetación natural leñosa de arbóreas o arbustivas, con copas discontinuas, con una cobertura mayor al 20% y menor al 65%.

Bosque inundado: corresponde a áreas de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos puros, donde la capa freática se encuentra por lo general en la superficie o cercana a ella (áreas encharcadas). La cobertura vegetal natural formada por árboles, arbustos o una mezcla de ambos está influenciada significativamente por el agua y/o depende de inundaciones.

Pantano y pastizal inundable: corresponde a vegetación natural herbácea predominantemente nativa influenciada por excesos de agua. Ocupa suelos hidromórficos, que se inundan en forma permanente o temporaria. Incluye bañados, esteros y orillas de lagunas y otros cuerpos de agua con vegetación típicamente higrófila, con herbáceas acuáticas y palustres, que ocupan planicies y depresiones que permanecen inundadas por breves (meses) o extensos períodos (años).

Pastizal: corresponde a vegetación natural herbácea, o naturalizada. En general presenta una mezcla de gramíneas y dicotiledóneas herbáceas, o subarbustivas y ocasionalmente leñosas con cobertura inferior al 20 %. Ocupa suelos profundos o someros, hasta muy llanos y rocosos, bien drenados (psamófilo), mal drenados (húmedo, con notable presencia de ciperáceas), y o bajo influencia salina (halófilo). Se suele utilizar con fines ganaderos.

Pastura: corresponde a la vegetación herbácea cultivada con una o más especies forrajeras perennes, en general de gramíneas y leguminosas exóticas. Requiere de intervención humana para permanecer como tal en el tiempo.

Agricultura: corresponde a las áreas ocupadas con cultivos anuales, o sea que hayan sido plantadas o cosechadas durante el año de referencia. Incluye las áreas de cultivos extensivos, verdeos anuales y de horticultura. Se incluyen también áreas con período de descanso entre siembras agrícolas.

Plantación forestal: corresponde al uso de áreas con cultivos de plantas leñosas, por lo general de especies exóticas.

Área sin vegetación: áreas con cobertura vegetal menor al 5 %. Clase mixta que incluye playas, dunas y salinas (cordones arenosos de color blanco brillante, en donde no hay predominio de vegetación de ningún tipo), infraestructura urbana y rural (con predominio de superficies no vegetadas como construcciones y asfalto, excluyendo situaciones de vegetación en asentamientos como arbolado o pastos), áreas de minería (como canteras, minería a cielo abierto, sin presencia de agua), afloramientos rocosos (roca naturalmente expuesta en la superficie sin cobertura vegetal) y otras áreas con escasa o nula cobertura vegetal.

Río o lago: áreas con presencia de agua en superficie de forma permanente. Incluye arroyos, ríos, lagunas, lagos naturales y artificiales, y el océano.

Se realizó un análisis detallado de la composición de coberturas de suelo dentro de cada celda (3.2.c), calculando tanto el área absoluta como el porcentaje de superficie que ocupa cada categoría de cobertura anteriormente mencionada en el área de estudio.

4. Resultados y discusión

a. Revisión de bibliografía de referencia

A partir de la revisión se identificaron un total de 6 publicaciones relacionadas con la provincia de Entre Ríos (Tabla 1) y 3 contribuciones de biomasa aérea para ecorregiones de Argentina (Tabla 2).

Tabla 1. Publicaciones relacionadas con la provincia de Entre Ríos.

Referencia	Año	Cobertura	Especies o comunidad vegetal	Compartimento de carbono	Biomasa	Carbono almacenado	Fracción de C
Aceñolaza et al. 2009	2002	Bosque cerrado	<i>Salix humboldtiana</i>	Hojarasca	6.8	3.4	0.5
	2002	Bosque cerrado	<i>Tessaria integrifolia</i>	Hojarasca	6.5	3.2	0.5
	2002	Bosque cerrado	<i>Albizia inundata</i>	Hojarasca	3.3	1.6	0.5
	2002	Bosque cerrado	<i>Nectandra angustifolia</i>	Hojarasca	9.6	4.8	0.5
Aceñolaza et al. 2007	2007	Bosque cerrado	<i>Salix humboldtiana</i>	Biomasa aérea	225	112.5	0.5
	2007	Bosque cerrado	<i>Tessaria integrifolia</i>	Biomasa aérea	157	78.5	0.5
	2007	Bosque cerrado	<i>Albizia inundata</i>	Biomasa aérea	100	50	0.5
	2007	Bosque cerrado	<i>Salix humboldtiana</i>	Carbono orgánico de suelo	-	53.3	-
	2007	Bosque cerrado	<i>Tessaria integrifolia</i>	Carbono orgánico de suelo	-	48.5	-
	2007	Bosque cerrado	<i>Albizia inundata</i>	Carbono orgánico de suelo	-	140	-
Ledesma et al. 2021	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	111.82	52.78	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	78.05	36.84	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	102.98	48.61	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	52.13	26.02	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	102.81	48.53	0.47-0.5
	2021	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis</i>	Biomasa aérea	108.26	51.1	0.47
Sione et al. 2018	2018	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	80.27	40.14	0.47-0.5
Sione et al. 2021	2019	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven</i>	Biomasa aérea	96.03	45.29	0.47

	2019	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven</i>	Biomasa aérea	88.26	41.88	0.47
	2019	Bosque abierto	<i>Neltuma affinis</i>	Biomasa aérea	26.46	12.47	0.47
Sione et al. 2023	2023	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Biomasa aérea	65.5	30.8	0.47
	2023	Bosque cerrado	<i>Neltuma affinis; Vachellia caven; Neltuma nigra</i>	Carbono orgánico de suelo	-	80.5	-

Tabla 2. Contribuciones de biomasa aérea para ecorregiones de Argentina.

Autor	Año (Año del dato)	Región de estudio / Especie de estudio	Medición de biomasa (Mg/ha)	de	Medición de carbono (Mg/ha)	Fracción de carbono (C=MS*F)	Compartimento de biomasa	Cobertura
Gasparri y Mangui 2004	1998-2002	Parque Chaqueño	98,80		49,40	0,5	Biomasa aérea	Bosques
	1998-2002	Selva Misionera	266,24		133,12	0,5	Biomasa aérea	Bosques
	1998-2002	Selva Tucumano Boliviana	172,87		86,44	0,5	Biomasa aérea	Bosques
	1998-2002	Bosque Andino Patagónico	540,20		270,10	0,5	Biomasa aérea	Bosques
Manrique 2009	2009	Bosque chaqueño	84,36		42,18	0,5	Biomasa aérea	Bosques
	2009	Bosque chaqueño	21,08		10,54	0,5	Biomasa raíces	Bosques
	2009	Bosque chaqueño	4,22		2,11	0,5	Hojarasca	Bosques
Rodriguez 2024	2020	Región de transición sur Espinal-Monte	14,8		7,4	0,5	Biomasa aérea	Bosque abierto
	2020	Región de transición sur Espinal-Monte	58,9		29,5	0,5	Biomasa aérea	Bosque cerrado

b. Biomasa Aérea y almacenamiento de carbono

Se obtuvo un mapa de distribución de la biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos a partir del proyecto generado en QGIS en el que se utilizó el producto Biomass_cci y las capas auxiliares con información territorial (Figura 12). Se aprecia un aumento graduado en la biomasa aérea presente hacia las zonas asociadas a cauces de ríos, arroyos y lagunas; y principalmente al río Paraná, desde el oeste hasta el sur de la provincia, y al río Uruguay en su extensión norte-sur al este de la provincia. Se observa que los valores más altos (> 100 Mg MS/ha) se encuentran en la porción más este y sur de la provincia, sobre la costa del río Uruguay. El 38,5% de la provincia presenta valores iguales o menores a 10 Mg MS/ha, ubicados principalmente en el centro y centro-norte de la provincia.

La distribución de los valores bajos a moderados podría estar relacionado al tipo de suelo y el uso del mismo. Los suelos Vertisoles, caracterizados por su difícil laboreo agrícola,

presentan valores de biomasa aérea bajos o cercanos a 0 Mg MS/ha, lo que explica su predominante uso en ganadería extensiva (INTA, 1990). Por otra parte, en los suelos Alfisoles y Vertisoles, considerados como aptos para la agricultura (Soriano *et al.*, 1991), presentan valores moderados de biomasa aérea.

Distribución de biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos

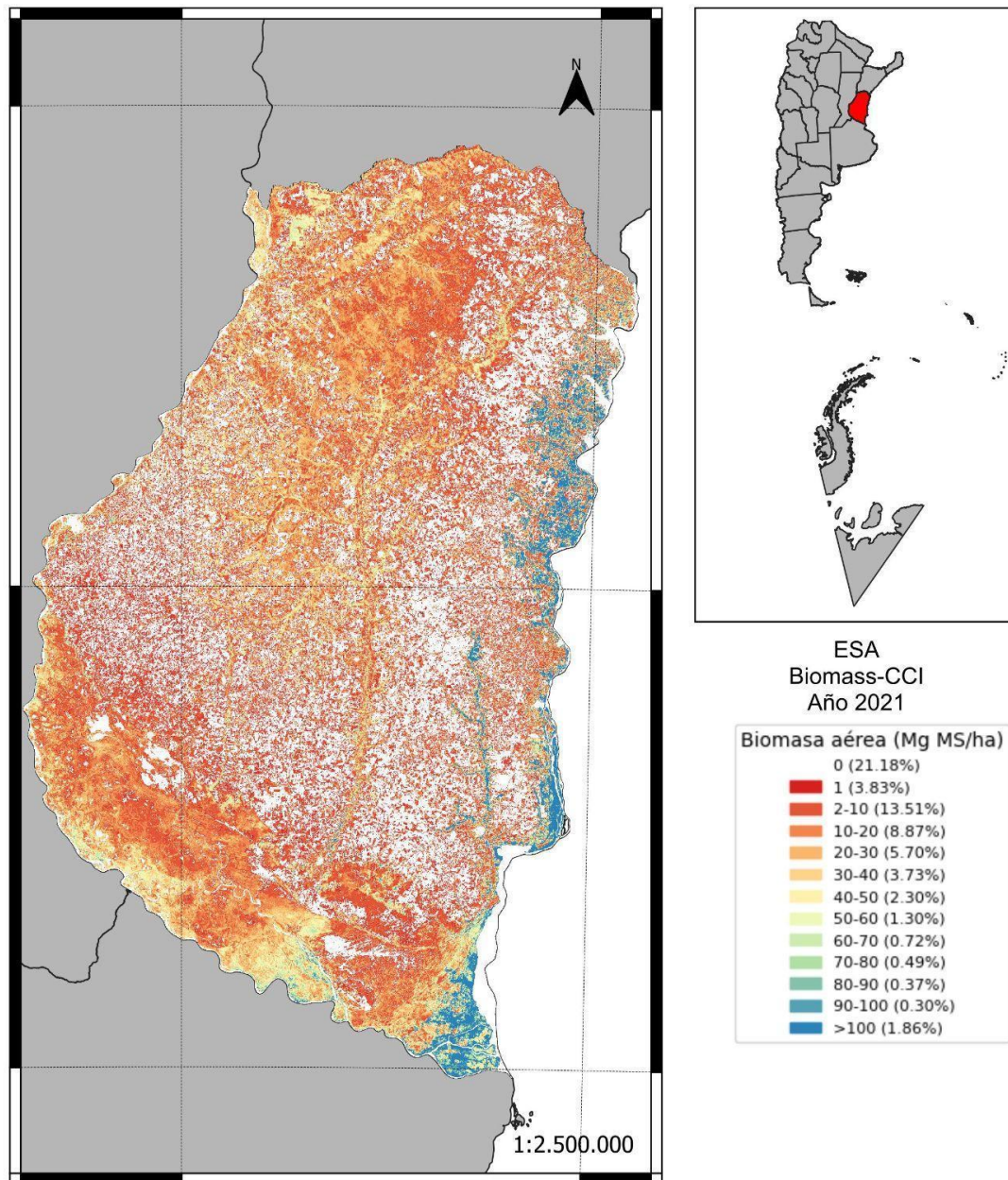


Figura 12. Mapa de distribución de biomasa aérea en la provincia de Entre Ríos utilizando el producto ESA Biomass-CCI para el año 2021.

A nivel de ecorregión (Figura 13), en el Espinal los resultados obtenidos (8,4 Mg C/ha, 44,6% del carbono total) coinciden parcialmente con los valores reportados por Sione

et al. (2023) para bosques semixerofíticos (promedio de 31 Mg C/ha), pero revelan un promedio provincial sustancialmente menor. Esta discrepancia puede explicarse porque el área de estudio integra no solo los bosques analizados por Sione y colaboradores, sino también las áreas degradadas y de uso agropecuario que predominan en esta ecorregión (Eclesia *et al.*, 2020; Ledesma *et al.*, 2021). En la ecorregión del Delta e Islas del Paraná, los valores obtenidos de carbono almacenado en la biomasa aérea (12,9 Mg C/ha) se ubican en el rango intermedio de lo documentado en la literatura. Resultan consistentes con los 4-57 Mg C/ha reportados por Zamboni (2017) para bosques de albardón, pero inferiores a los 50 Mg C/ha encontrados por Aceñolaza *et al.* (2007) en sauzales maduros. La Pampa contribuye con el 26,9% del carbono, con un promedio de 5,8 Mg C/ha, y representa el 37,9% de la superficie.

Carbono almacenado en la biomasa aérea Ecorregiones - Entre Ríos

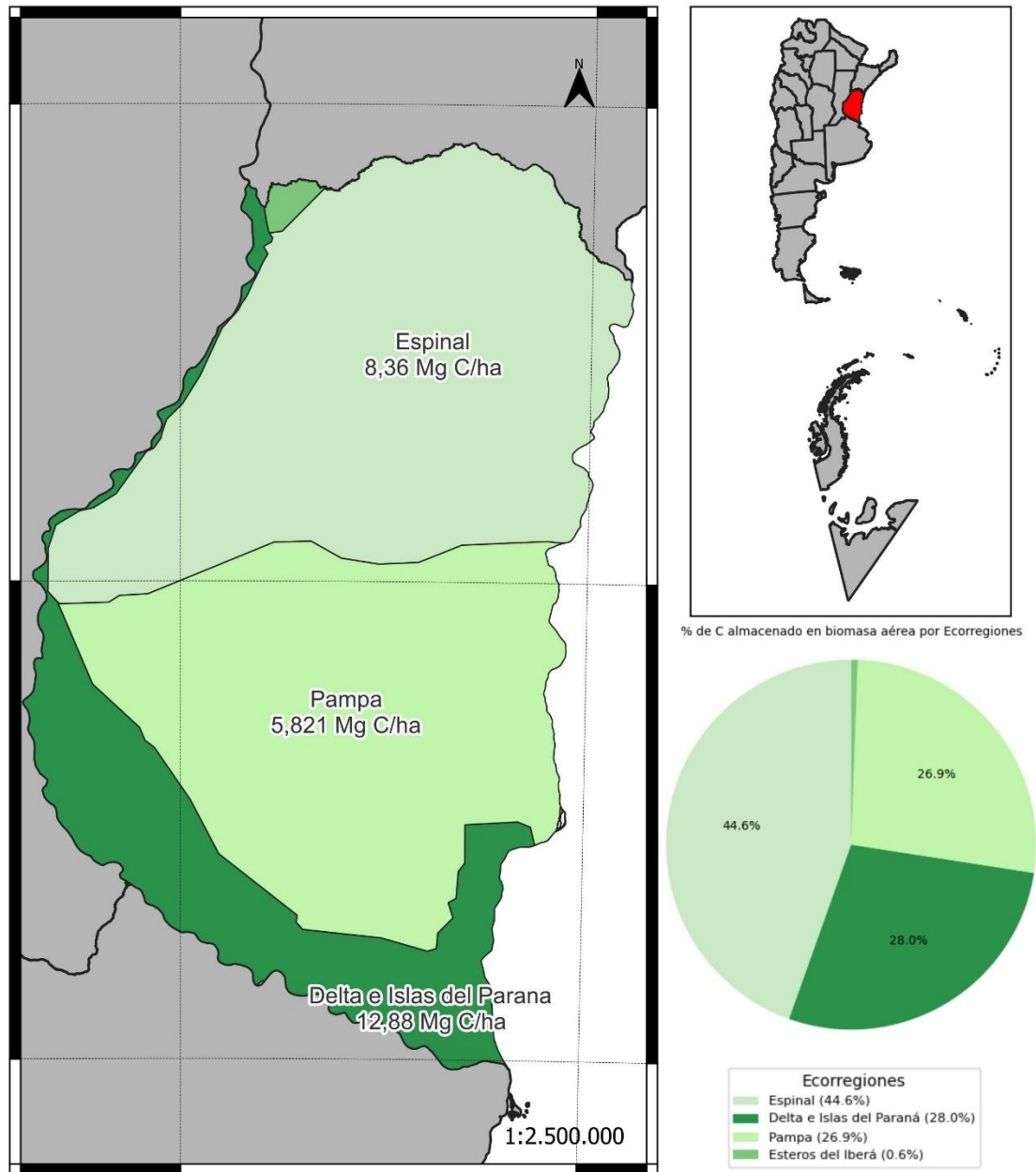


Figura 13. Distribución del Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de ecorregión.

En cuanto a las cuencas hidrográficas (Figura 14), la del Delta del Paraná es la que más carbono almacena, con un 26,0% del total, y un promedio de 9,9 Mg C/ha, cubriendo el 21,5% de la superficie. Los Arroyos menores de Entre Ríos afluentes del Río Uruguay también tienen una contribución significativa, con el 23,3% del carbono y un promedio de 15,8 Mg C/ha, aunque sólo representan el 12,2% de la superficie. El Río Gualeguay almacena el 17,4% del carbono, con un promedio de 5,1 Mg C/ha, y cubre el 28,2% de la superficie. Otras cuencas, como el Río Feliciano y la Propia del Río Uruguay en Argentina, tienen contribuciones menores, con 9,2% y 6,7% del carbono total, respectivamente.

Carbono almacenado en la biomasa aérea Cuencas hidrográficas - Entre Ríos

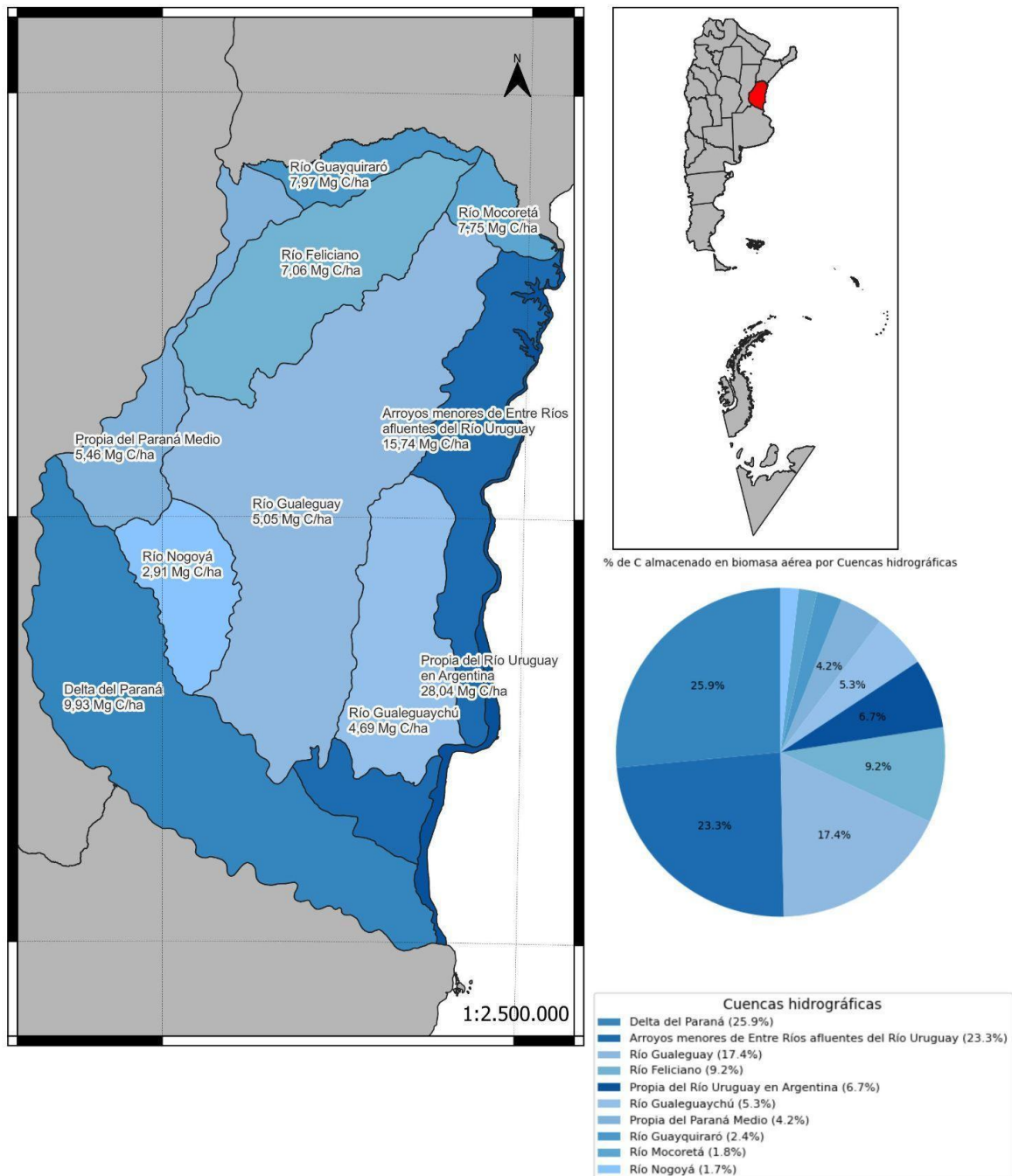


Figura 14. Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de cuencas hidrográficas.

A nivel departamental (Figura 15), Islas del Ibicuy es el que más carbono almacena, con un 13,5% del total y un promedio de 17,6 Mg C/ha, cubriendo el 6,3% de la superficie. Le sigue Concordia, con el 11,3% del carbono y un promedio de 22,1 Mg C/ha, representando

el 4,2% de la superficie. La Paz y Uruguay también tienen contribuciones importantes, con 8,4% y 7,8% del carbono total, respectivamente. En contraste, departamentos como San Salvador y Diamante tienen contribuciones menores, con 1,0% y 1,8% del carbono total, respectivamente.

Carbono almacenado en la biomasa aérea Departamentos - Entre Ríos

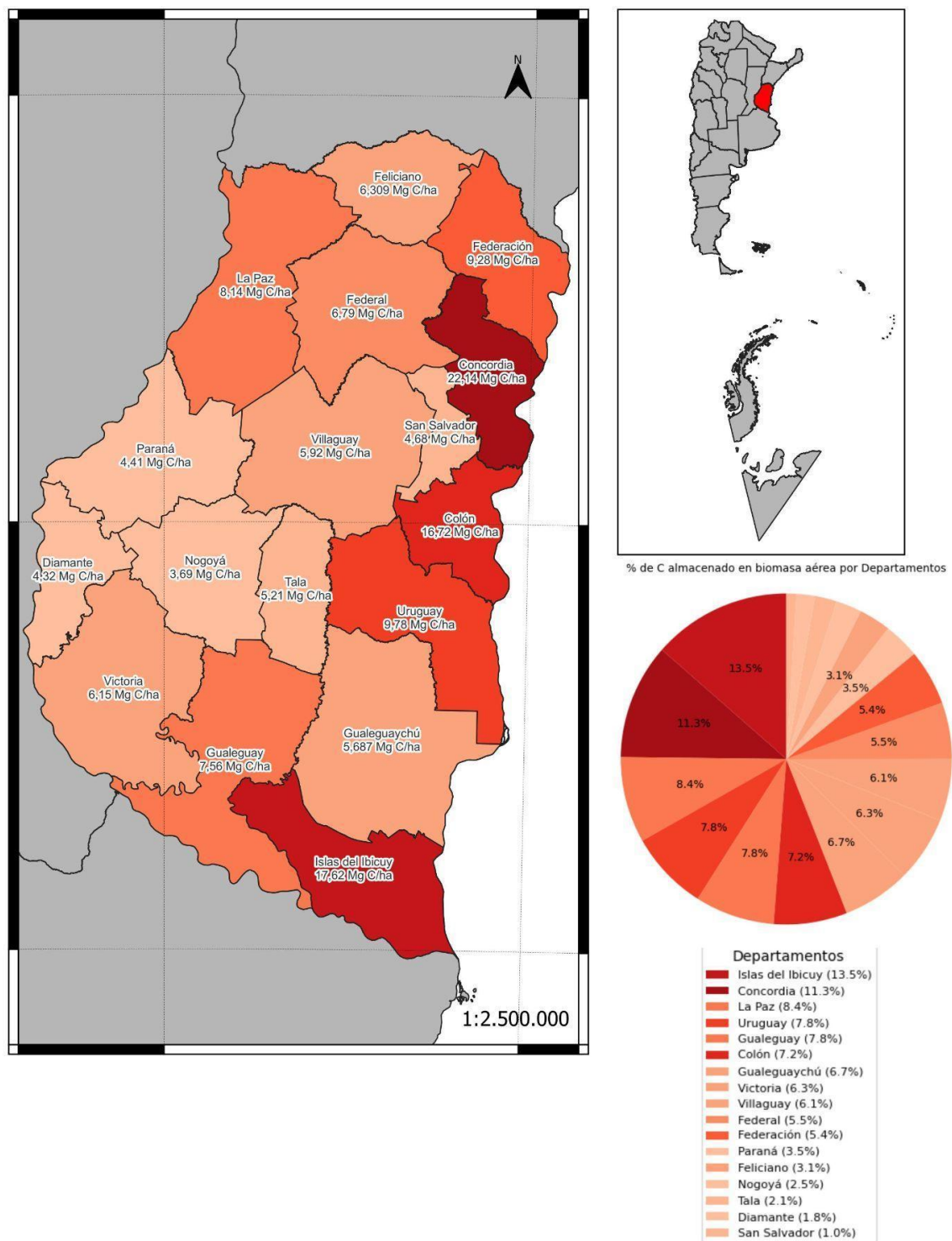


Figura 15. Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de departamentos.

Se obtuvo un mapa (Figura 16) para las unidades de vegetación (Oyarzabal *et al.* 2018). El Bosque de esclerófitas con *Neltuma affinis* (Provincia del Fitogeográfica del Espinal) abarca el 45.3% de la superficie estudiada, pero presenta un almacenamiento de carbono en biomasa aérea de 6.94 Mg C/ha. Sin embargo, debido a su gran extensión, contribuye significativamente al carbono total almacenado (39,3%), lo que refleja su importancia en escalas regionales pese a las condiciones semiáridas que limitan su productividad.

Las unidades vinculadas a la Provincia Fitogeográfica Paranaense muestran la mayor eficiencia por unidad de área. El Bosque y humedal deltaicos alcanzan 12,48 Mg C/ha, el valor más alto entre las unidades de vegetación presentes en Entre Ríos, y contribuyen con el 26,2% del carbono total, pese a ocupar solo el 16,7% de la superficie de la provincia. Por su parte, el Bosque ribereño subtropical, aunque restringido a pequeñas franjas al oeste y norte (0,5% del área), presenta 7.91 Mg C/ha, evidenciando la alta productividad de los ecosistemas fluviales.

El Pastizal megatérmico con bosque en galería (Provincia Fitogeográfica Pampeana) cubre el 37,3% del área y presenta un almacenamiento de carbono de 7,17 Mg C/ha, contribuyendo con el 34,1% al carbono total. Estos resultados coinciden con la reducción de la cobertura forestal reportada por Oyarzabal *et al.* (2018).

Carbono almacenado en la biomasa aérea Unidades de vegetación - Entre Ríos

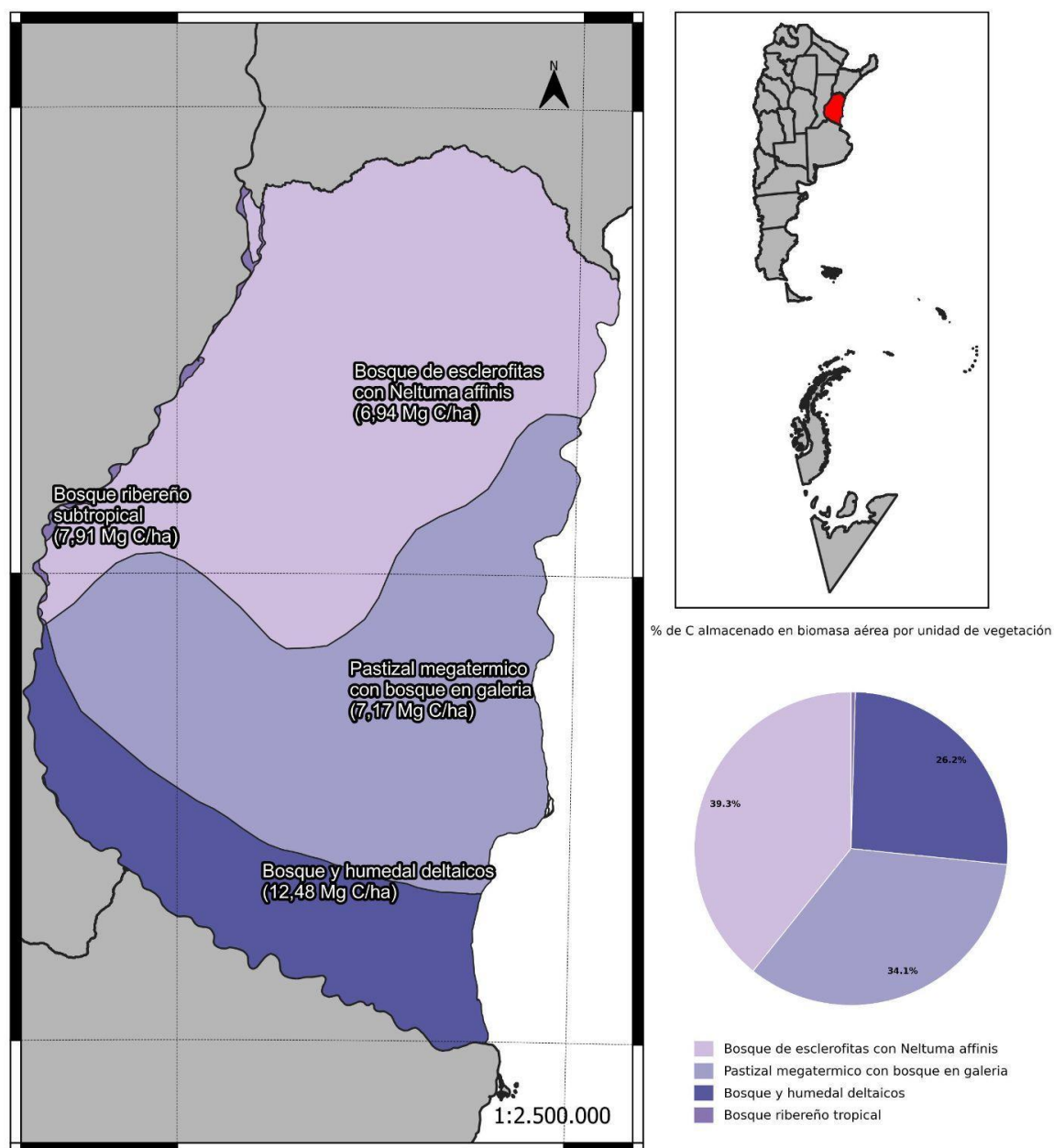


Figura 16. Carbono almacenado en la biomasa aérea a nivel de unidades de vegetación.

Los patrones espaciales muestran que las áreas con mayor almacenamiento de carbono tienden a estar asociadas con ecorregiones como el Espinal y el Delta e Islas del Paraná, así como con cuencas como la Delta del Paraná y los Arroyos menores de Entre Ríos. Estas áreas tienen un mayor almacenamiento de carbono por hectárea, lo que sugiere una vegetación más densa y posiblemente más madura.

En cuanto a los patrones temporales, se obtiene un incremento leve pero generalizado del carbono almacenado en la biomasa aérea en la mayoría de las unidades territoriales empleadas, especialmente en zonas con cobertura forestal densa. En las cuencas, la del Río Uruguay en Argentina presenta los valores más altos, con un aumento gradual desde 26,49 Mg C/ha en 2010 hasta 28,36 Mg C/ha en 2021, mientras que el Río Nogoyá experimenta fluctuaciones más marcadas, con un mínimo en 2010 (2,40 Mg C/ha) y un máximo en 2015 (3,43 Mg C/ha). Las ecorregiones como el Delta e Islas del Paraná mantienen una biomasa elevada y estable, superando los 12 Mg C/ha en la mayoría de los años, mientras que la Pampa muestra un incremento inicial entre 2010 y 2015, seguido de una estabilización. En el Espinal, el carbono almacenado promedio varió entre 8,16 Mg C/ha en 2010 y 8,45 Mg C/ha en 2021, lo que indica una estabilidad en el almacenamiento de carbono durante este período. Los departamentos de Concordia e Islas del Ibicuy destacan con valores consistentemente altos, superando los 22 Mg C/ha y 17 Mg C/ha respectivamente, en contraste con Diamante y Nogoyá, que registran los niveles más bajos, aunque con un crecimiento moderado en el tiempo.

c. Cobertura y Uso del Suelo

Se obtuvo un mapa de cobertura y uso del suelo para la provincia de Entre Ríos a partir del producto MapBiomass (Figura 17). Los patrones de almacenamiento de carbono en la provincia de Entre Ríos revelan marcadas diferencias entre los distintos tipos de cobertura vegetal. Los humedales (pantanos y pastizales inundables) presentan valores intermedios de almacenamiento (8,4 Mg C/ha), pero su amplia distribución (20,22% del territorio) los convierte en los mayores contribuyentes al almacenamiento de carbono en la provincia (28,33%). Estos valores son consistentes con los reportados por Zamboni (2017) para humedales deltaicos (7-105 Mg MS/ha), aunque en el extremo inferior del rango. El bosque inundado, aunque con un alto almacenamiento de carbono (6,31 Mg C/ha), tiene un bajo impacto a escala regional (0,18% del carbono almacenado total) por su mínima extensión (0,07% del área de la provincia).

Los bosques muestran una clara gradación según su estructura: mientras los bosques abiertos (5,51 Mg C/ha) cubren cerca del 20% del área y aportan el 26% del carbono, los bosques cerrados alcanzan los valores más altos por unidad de superficie (10,98 Mg C/ha), aunque su limitada extensión (5%) reduce su contribución relativa (18%). Esta diferencia entre los bosques abiertos y los bosques cerrados coincide con los hallazgos de Sione *et al.* (2021) para el Espinal, donde bosques más densos almacenaban hasta 45 C MS/ha frente a 12 Mg C/ha en formaciones abiertas.

Las plantaciones forestales registran los mayores valores de almacenamiento de carbono (29,33 Mg C/ha), superando a los bosques nativos, lo que coincide con los datos de Piani (2024) para forestaciones de salicáceas en la porción inferior del rango (35-235 MgC/ha). Su limitada distribución (1,71% de la superficie provincial) limita su impacto total (13,01% del carbono almacenado total), evidenciando que su potencial como sumideros depende críticamente de políticas de expansión sostenible.

En el extremo opuesto, los sistemas agrícolas muestran un marcado bajo aporte como reservorio de carbono (0,67 Mg C/ha), con una contribución marginal (3,39% del carbono almacenado total) pese a ocupar el 24,31% de la superficie del territorio. Los pastizales presentan valores (1,52 Mg C/ha) que se sitúan apenas por encima del extremo inferior documentado por *Eclesia et al.* (2020) para sitios abiertos de tipo sabana o mixtos.

Este patrón es también evidente en pasturas (0,86 Mg C/ha), cuyos valores son hasta 10 veces menores que los de pastizales naturales, coincidiendo con las alertas de *Eclesia et al.* (2020) sobre la pérdida de capacidad de secuestro en sistemas ganaderos intensivos.

Las áreas con cobertura vegetal menor al 5% (1,38 Mg C/ha) y los cuerpos de agua (0,49 Mg C/ha) cumplen un rol irrelevante en el almacenamiento de carbono. Estos valores que pueden parecer evidentemente demasiado altos para sectores donde no cabría esperar vegetación arbórea puede verse explicado por la asociación de estos mismos a coberturas de mayor cobertura vegetal como parques urbanos o bosque en galería, de manera que interfiere con valores anómalos debido a la resolución espacial de los productos de biomasa aérea y cobertura de suelo.

Entre los resultados registrados por MapBiomass, se identificaron zonas clasificadas como plantación forestal que, en realidad, corresponden a áreas con vegetación leñosa, posiblemente con una alta presencia de especies exóticas y un elevado valor de biomasa. Esta condición les otorga una fenología similar a las forestaciones, lo que podría explicar la clasificación errónea. Este hallazgo pone en evidencia la dificultad de discriminar entre vegetación espontánea y cultivada, lo que resalta la necesidad de intensificar el análisis en estos sitios y de contar con un conocimiento del terreno para una correcta interpretación del territorio.

Un caso concreto se observó en la Reserva de la Escuela Alberdi, donde, a pesar de que no existe plantación forestal, MapBiomass registró 1,5 hectáreas bajo esta categoría, cuando en realidad corresponden a bosque cerrado (Galarza y Quinodoz, 2012).

Mapa de cobertura y uso de suelo para la provincia de Entre Ríos

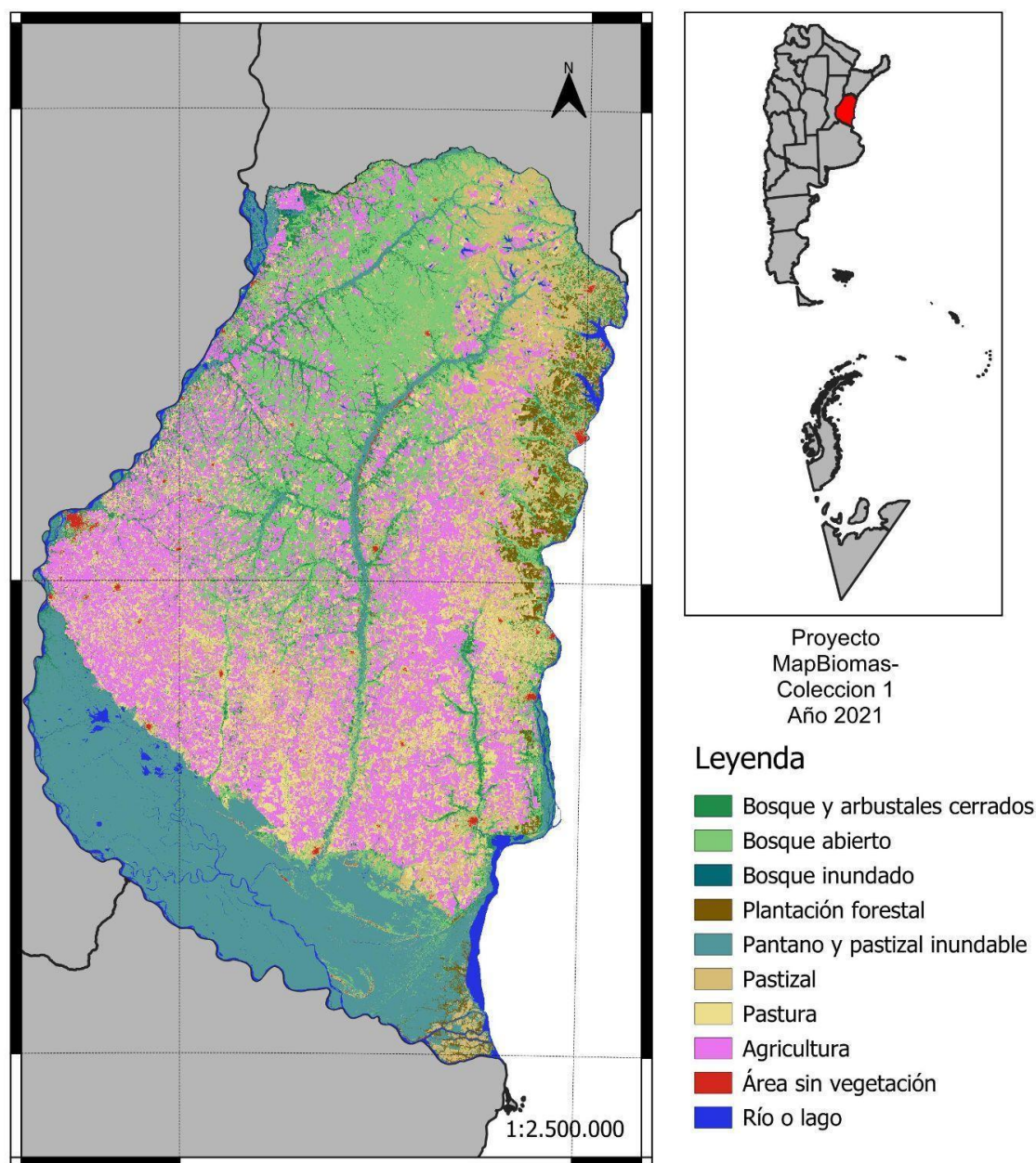


Figura 17. Mapa de cobertura y uso de suelo para la provincia de Entre Ríos utilizando el producto Proyecto MapBiomass - Colección 1 para el año 2021.

d. Validación

Los resultados de análisis estadístico para los conjuntos de datos utilizados a partir de puntos de validación se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Resultados de análisis estadístico para los conjuntos de datos utilizados.

Cobertura / Año	n	Diferencia Media	Desviación Estándar de la diferencia	Shapiro-Wilk (p-valor)	t-test Pareado (p-valor)	Wilcoxon (p-valor)
Bosque 2017	186	18,85	52,93	<0,001	<0,001	<0,001
Bosque 2018		18,47	52,60	<0,001	<0,001	<0,001
Bosque 2019		18,83	52,72	<0,001	<0,001	<0,001
Plantación forestal 2020	53	94,99	93,31	0,074	<0,001	<0,001
Plantación forestal 2021		101,58	91,87	0,018	<0,001	<0,001
Bosque 2010	15	28,77	27,08	0,199	<0,001	<0,001
Bosque 2015		32,77	26,63	0,223	<0,001	<0,001

En el primer conjunto de datos (Figuras 18 a 20), correspondiente a bosques con un variado grado de cobertura arbórea para los años 2017, 2018 y 2019, los resultados indicaron que la prueba de Shapiro-Wilk arrojó valores de $p = <0,05$ en todos los casos, sugiriendo que los datos no siguen una distribución normal. En consecuencia, se empleó la prueba de Wilcoxon para comparar las medias, obteniendo valores de $p = <0,05$, lo que indica diferencias estadísticamente significativas entre las estimaciones de biomasa y los valores observados. La diferencia media en 2017 fue de 18,85 MgMS/ha con un desvío estándar de 52,94 MgMS/ha, en 2018 fue de 18,48 MgMS/ha con un desvío estándar de 52,60 MgMS/ha, y en 2019 fue de 18,83 MgMS/ha con un desvío estándar de 52,73 MgMS/ha.

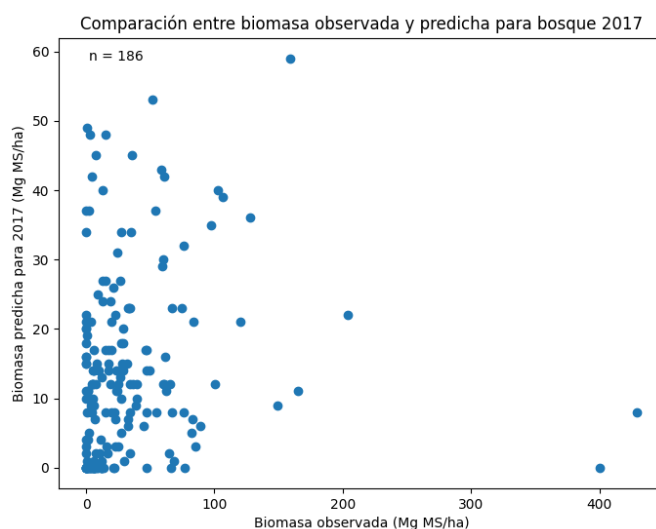


Figura 18. Gráfico de dispersión de los puntos del primer conjunto de datos para el año 2017.

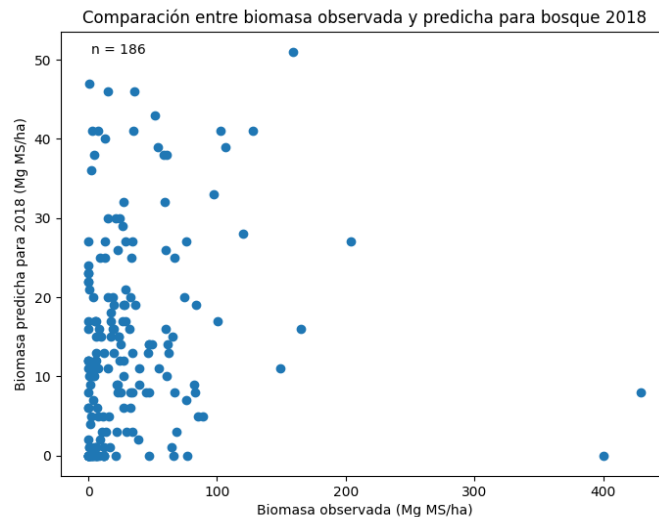


Figura 19. Gráfico de dispersión de los puntos del primer conjunto de datos para el año 2018.

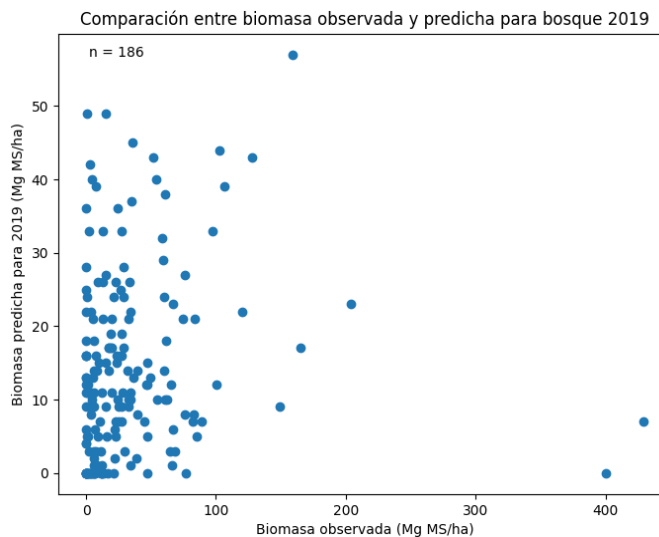


Figura 20. Gráfico de dispersión de los puntos del primer conjunto de datos para el año 2019.

El segundo conjunto de datos (figuras 21 y 22), correspondiente a plantaciones forestales para el año 2021, obtenidos de la tesis doctoral de Virginia Piani (2024), mostraron resultados mixtos en la prueba de normalidad. Para el año 2020, el p-valor de Shapiro-Wilk fue de 0,07, lo que sugiere que la distribución de los datos no difiere significativamente de una normal, permitiendo el uso de la prueba t para muestras pareadas. Sin embargo, para 2021, la normalidad fue rechazada ($p = 0,02$), por lo que se empleó la prueba de Wilcoxon. En ambos casos, las pruebas de comparación indicaron diferencias significativas entre las estimaciones y los valores observados ($p < 0,05$). La diferencia media en 2020 fue de 94,99 MgMS/ha con un desvío estándar de 93,31 MgMS/ha, mientras que en 2021 fue de 101,58 MgMS/ha con un desvío estándar de 91,87 MgMS/ha. Este conjunto de datos presentó los valores de biomasa más altos, entre 73,01 Mg MS/ha y 470,98 Mg MS/ha, y la mayor media de diferencia respecto a los valores de biomasa estimados.

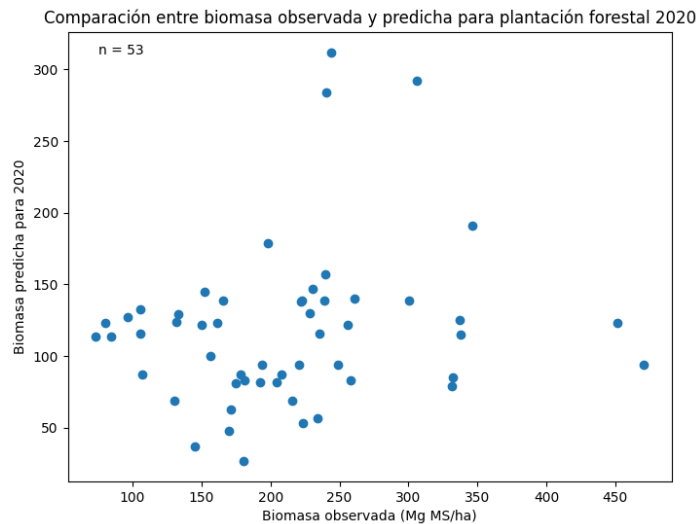


Figura 21. Gráfico de dispersión de los puntos del segundo conjunto de datos para el año 2020.

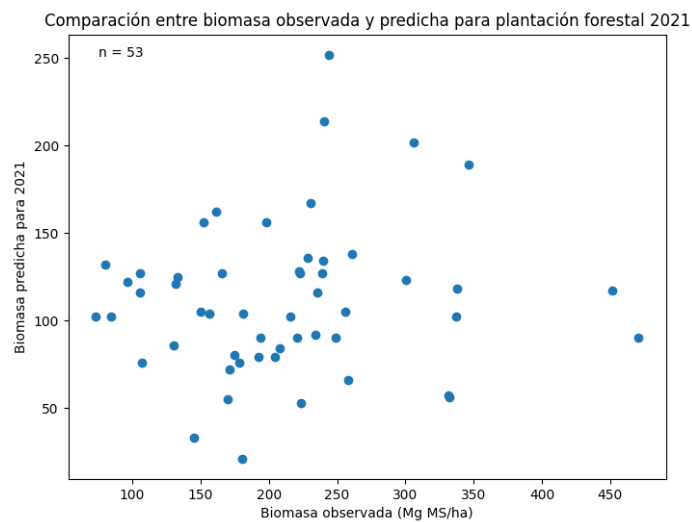


Figura 22. Gráfico de dispersión de los puntos del segundo conjunto de datos para el año 2021.

El tercer conjunto de datos (figuras 23 y 24), correspondientes a bosques para los años 2014 y 2015, provenientes de la tesis doctoral de Pamela Zamboni (2017), fueron evaluados mediante la prueba de Shapiro-Wilk modificada para determinar la normalidad de la distribución. Se presentó una distribución normal, por lo que se aplicó la prueba t para muestras pareadas para comparar las medias de las estimaciones con los valores observados. La diferencia media en 2010 fue de 12,45 MgMS/ha con un desvío estándar de 34,21 MgMS/ha, mientras que en 2015 fue de 15,78 MgMS/ha con un desvío estándar de 40,12 MgMS/ha.

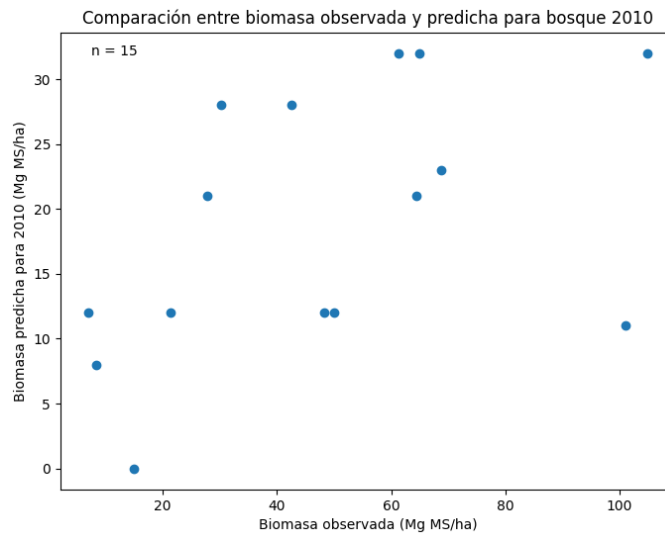


Figura 23. Gráfico de dispersión de los puntos del tercer conjunto de datos para el año 2010.

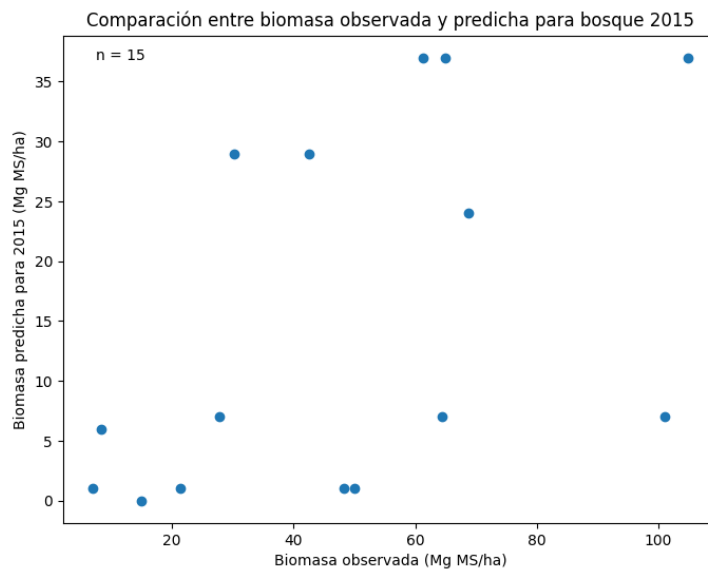


Figura 24. Gráfico de dispersión de los puntos del tercer conjunto de datos para el año 2015.

Dado que las pruebas de comparación de medias revelaron diferencias significativas en todos los casos, se concluye que las estimaciones de biomasa presentan una desviación considerable respecto a los valores observados, lo que sugiere la necesidad de ajustes en los métodos de estimación utilizados. Los valores de desviación positivos indican que la biomasa observada es mayor a la estimada y los valores altos indican que esta diferencia es considerablemente grande.

Tomando en cuenta los valores de referencia para otras regiones de nuestro país, como el Parque Chaqueño, la Selva Misionera, la Selva Tucumano-Boliviana y el Bosque Andino Patagónico, Gasparri y Manghi (2004) registraron valores de biomasa aérea cercanos a los 99 Mg MS/ha (Parque Chaqueño) para zonas representadas por baja proporción de coberturas arbóreas; datos mayores a los estimados en esta tesis para coberturas similares (bosques abiertos, con baja densidad de plantas, maduros). Asimismo, los registros para zonas con alta cobertura arbórea y desarrollo de los bosques como en la Selva Misionera los

valores reportados alcanzaron los 266 Mg MS/ha; valores similares a los estimados en esta tesis para zonas de bosques cerrados y densos. En general los rangos de los valores registrados coinciden con los reportados para los diferentes ecosistemas estudiados de la provincia.

Los reportes analizados para los bosques nativos del Espinal en la provincia de Entre Ríos de 80 Mg MS/ha en promedio (Sione *et al.*, 2018; Ledesma *et al.*, 2021) son representativos de los registros proporcionados por los productos globales; lo que indica la alta utilidad de estos productos principalmente a escala regional.

La variabilidad de los valores observados refleja la heterogeneidad de los distintos ecosistemas, por lo que el análisis de los patrones de distribución de la biomasa y el carbono y su relación con unidades territoriales delimitadas con criterios funcionales (ecorregiones, cuencas, cobertura y uso del suelo, etc.) y su asociación a unidades de gestión territorial (Departamentos), resulta de gran utilidad y conveniencia para generar información imprescindible para el ordenamiento territorial.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta tesis apoyan la idea de que es posible cartografiar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de la provincia de Entre Ríos utilizando bases de datos globales y regionales, modelos y ecuaciones, pero es esencial ajustar estos modelos a las condiciones locales del área de estudio. Esto incluye considerar la heterogeneidad de los ecosistemas, el uso de los suelos, las variables climáticas y la composición de las comunidades vegetales presentes en el ecosistema para obtener estimaciones más precisas y representativas. Los valores de biomasa reportados para diversos ecosistemas de Argentina, como el Parque Chaqueño, la Selva Misionera y el Bosque Andino Patagónico, constituyen referencias útiles. Sin embargo, los registros específicos de los ecosistemas del Espinal, la Pampa y el Delta del Paraná resultan particularmente relevantes, especialmente cuando corresponden a antecedentes de la provincia de Entre Ríos. Estos datos son fundamentales para comparar y contrastar los resultados de esta tesis con las estimaciones de biomasa o carbono almacenado reportadas por otros autores, permitiendo así evaluar la coherencia de los valores estimados a partir de productos globales.

Los resultados obtenidos en esta tesis muestran que las áreas con mayor almacenamiento de carbono están asociadas a las ecorregiones del Espinal y el Delta e Islas del Paraná, así como a cuencas como la del Delta del Paraná y los Arroyos menores de Entre Ríos afluentes del Río Uruguay.

En términos temporales, los valores de carbono y biomasa aérea muestran una estabilidad relativa a lo largo de los años, con variaciones mínimas pero sostenidas de aumento de biomasa en algunos sectores. El análisis de la distribución de biomasa y carbono en función de unidades territoriales con criterios funcionales (ecorregiones, cuencas hidrográficas, unidades de vegetación) y su vinculación con unidades de gestión

(departamentos) se presenta como una herramienta de utilidad para el ordenamiento territorial. Este enfoque permite integrar la información generada en escalas globales y regionales con las particularidades locales, lo que resulta fundamental para abordar desafíos como la conservación, la mitigación del cambio climático y la planificación del uso del suelo. En este sentido, los productos globales, aunque útiles, deben ser complementados con estudios detallados y adaptados a las condiciones específicas de cada región para maximizar su aplicabilidad y precisión. Los resultados obtenidos a partir de los valores de estimaciones globales, sin un previo ajuste a la escala local o regional, no deben ser tomados como valores absolutos sino que pueden ser utilizados de manera relativa para interpretar patrones espaciales y temporales.

Los productos globales y regionales, como MapBiomass y ESA Biomass CCI, presentan limitaciones en contextos regionales, como la dificultad para discriminar entre vegetación espontánea y cultivada, o la subestimación de biomasa para áreas con escasa o dispersa vegetación leñosa. Estas limitaciones resaltan la necesidad de complementar los productos globales con conocimiento del terreno, además de validar los resultados con datos de campo, para superar estas limitaciones y maximizar su utilidad en la gestión territorial.

6. Bibliografía

1. Aceñolaza, P.; Zamboni, L.P.; Gallardo Lancho, J. (2007). Estimación de C del suelo en tres bosques de la llanura aluvial del Bajo Paraná (R. Argentina). En: Juan F. GALLARDO (edt.). "La captura de Carbono en ecosistemas terrestres iberoamericanos". S.i.F.yQ.A., Salamanca. 39-53.
2. Aceñolaza, P.; Zamboni, L.P.; Gallardo Lancho, J. (2009). Litterfall production of forests at the pre-Delta area of the Paraná River (Argentina). *Bosque*. 30. 135-145.
3. Bianchi, A. R., y Cravero, S. A. (2010). *Atlas Climático Digital de la República Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
4. Bravo, F.; Delgado, J.A.; Gallardo, J.F.; Bravo-Oviedo, A.; Ruiz-Peinado, R.; Merino, A.; Montero, G.; Cámara, A.; Navarro, R.; Ordoñez, C.; Canga, E. (2007). Métodos para cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales. En Bravo F (coord.). *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático*. (pp. 65-112). Fundación Gas Natural
5. Brown, S. y Lugo, A. E. (1982). The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon Cycle. *Biotropica*, 14, 161-187. <http://dx.doi.org/10.2307/2388024>
6. Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. FAO Forestry Paper 134, Rome: For the Food and Agriculture Organization of the United Nations.
7. Chuvieco Salinero, E. (2008). *Teledetección ambiental*. Editor, Grupo Planeta (GBS). 594 pp.
8. Ecclesia, R. P.; Lezana, Lucrecia, Zamboni, Pamela; Canavelli, Sonia Beatriz. (2020). Importancia del campo natural para el almacenaje de carbono en sistemas ganaderos de cría. *Serie Extensión / EEA Paraná (INTA)*, no. 86, p. 32-37
9. FAO. (1998). *FRA 2000. Directrices para la evaluación en los países tropicales y subtropicales*. Programa de Evaluación de los Recursos Forestales. 45 pp.

10. Galarza, R. A. y Quinodoz, G. I. (2012). Relevamiento del Área Natural Protegida correspondiente a la Escuela Juan Bautista Alberdi y ubicación de ejemplares de *Prosopis* sp. mediante el empleo de sistemas de información geográfica, para su estudio y caracterización. Trabajo Final de Tesis para la obtención del Título de Licenciado en Biología. 97 pp.
11. Gasparri, I. y Manghi, F. (2004). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas (Informe Final). Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
12. Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
13. Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, P.V.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.V.; Goetz, S.J.; Loveland, T.R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C.O.; Townshend, J.R.G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 342 (6160): 850-853. DOI: 10.1126/science.1244693
14. Hochmair, H. H., Juhász, L., & Kemp, T. (2024). Correctness Comparison of ChatGPT-4, Gemini, Claude-3, and Copilot for Spatial Tasks. *Transactions in GIS*, 28(7), 2219-2231.
15. INTA. (1990). Atlas de suelos de la República Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Proyecto PNUD ARG. 85/019.
16. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Lim, B., Treanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D. J., Callender B.A. (eds), IPCC/OECD/IEA.
17. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). Good practice guidance for land Use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, pp 2.7-2.17.
18. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, pp 1.1-1.21.
19. Ledesma, S. G.; Sione, M. S.; Oszust, J. D.; Rosenberger, L. J. (2021). Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina). *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, 20(1), 331–345. <https://doi.org/10.14409/fa.v20i1.10274>
20. Legg, S. (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. *Interaction*, 49(4), 44-45.
21. Maldonado, F. D., Sione, W., & Tentor, F. R. (2012). Posibilidades para la cartografía de la provincia de Entre Ríos usando la extensión de la faja Gauss-Krüger. *Scientia Interfluvius*, 3(1-2), 07-16. Recuperado a partir de <https://revista.uader.edu.ar/index.php/aasif/article/view/61>
22. Mo, L.; Zohner, C.M.; Reich, P.B. et al. (2023) Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature* 624, 92–101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06723-z>
23. Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L., Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., Maturo, H. M., Aragón, R., Campanello, P. I., Prado, D., Oesterheld, M., & León, R. J. (2018). Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral*, 28(1), 040–063. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.399>

24. Piani, V. (2024). Evaluación de ecosistemas forestales del sur mesopotámico: un enfoque funcional y multitemporal en base a geomática. Tesis Doctorado en Ciencias Aplicadas. Universidad Nacional de Luján. Argentina. 122 pp.
25. Proyecto MapBiomias Argentina- Colección 1 de los Mapas Anuales de Cobertura y Uso del Suelo en Argentina, accedido en 29/11/2024 a través del enlace: <https://argentina.mapbiomas.org/herramientas/>
26. Santoro, M. y Cartus, O. (2024): ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 and 2021, v5. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 22 August 2024. doi:10.5285/02e1b18071ad45a19b4d3e8adafa2817. <https://dx.doi.org/10.5285/02e1b18071ad45a19b4d3e8adafa2817>
27. Sione, Silvana & Wilson, Marcelo & Andrade, Hernán & Rosenberger, Leandro & Sasal, Maria & Gabioud, Emmanuel. (2018). CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA ARBÓREA DE LOS BOSQUES NATIVOS DEL ESPINAL (ARGENTINA).
28. Sione, S. M. J., Ledesma, S. G., Rosenberger, L. J., Oszust, J. D., Carpp, I. A., Wilson, M. G., Andrade Castañeda, H. J. y Sasal, M. C. (2019). Fracción de carbono en la biomasa de *Prosopis affinis* Spreng. en un bosque nativo del Espinal (Argentina). *Agronomía & Ambiente. Revista de la Facultad de Agronomía UBA*, 39(1), 6-15.
29. Sione, S. M. J.; 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. <https://doi.org/10.14483/2256201X.16166>
30. Sione, S.M.J., Wilson, M.G., Ledesma, S.G. et al. Driving factors of tree biomass and soil carbon pool in xerophytic forests of northeastern Argentina. *Ecol Process* 12, 64 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00478-1>
31. Soriano, A., León, R., Sala, O., Lavado, R., & Deregibus, V. (1991). Río de la Plata Grasslands. *Ecosystems of the World*, 8(1), 367-407. Elsevier.
32. Wang, Y., Li, M., Jin, G. (2024). Exploring the optimization of spatial patterns for carbon sequestration services based on multi-scenario land use/cover changes in the changchun-Jilin-Tumen region, China. *Journal of Cleaner Production*, Volume 438, 140788, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140788>
33. Zamboni, L.P. (2017). Dinámica del fuego en el Complejo Litoral del Río Paraná, integrando información satelital y del terreno. Tesis Doctorado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Salta. Argentina. 98 pp.
34. Zamboni, L.P.; Sione, W.; Tentor, F.; Aceñolaza P. (2017). Fuel model cartography for the parana river fluvio littoral complex from field and remote sensing data. *Scientia Interfluvius* 8: 65-76.
35. Zhang, Y., Wei, C., Wu, S., He, Z., & Yu, W. (2023). GeoGPT: understanding and processing geospatial tasks through an autonomous GPT. arXiv preprint arXiv:2307.07930.