



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
**CIENCIAS
AGRARIAS**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO – FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

TESIS DE GRADO: INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN ECOSISTÉMICA DE
ALMACENAMIENTO DE CARBONO Y SERVICIOS
ECOSISTÉMICOS ASOCIADOS EN PLANTACIÓN DE
EUCALIPTOS DE DERIVADOS VÍNICOS S.A. UBICADA EN SAN
MARTÍN, MENDOZA, ARGENTINA.**

LLAVER, Bárbara María



Mendoza, Argentina 2023

**EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN ECOSISTÉMICA DE ALMACENAMIENTO DE
CARBONO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS ASOCIADOS EN PLANTACIÓN
DE EUCALIPTOS DE DERIVADOS VÍNICOS S.A. UBICADA EN SAN
MARTÍN, MENDOZA, ARGENTINA.**

Autora

Bárbara María Llaver

bllaver@est.fca.uncu.edu.ar

Director de tesis

Ing. Agr. Leandro Mastrantonio

lmastra@fca.uncu.edu.ar

Comisión evaluadora

Ing. RNR M. Julieta D'Amario Fernández

Ing. Agr. Lucas Gabriel López

Dra. Milagros Ginebra Aguilar

RESUMEN

La problemática actual referida al cambio climático nos afecta a todos por igual y es por ello que los individuos, las empresas y las organizaciones se encuentran en la búsqueda de estrategias y soluciones que puedan contribuir a la mitigación del mismo. En este contexto es que la empresa Derivados Vínicos S.A. busca conocer el stock de carbono de su plantación de *Eucalyptus camaldulensis* ubicada en Palmira, San Martín, Mendoza, Argentina. Esto le permitirá tomar decisiones sobre el tipo de manejo que se lleva a cabo para la mejora del almacenamiento de carbono y/o reducción de sus pérdidas.

Por otro lado, este tipo de ecosistemas modificados antrópicamente contribuyen a la provisión de servicios ecosistémicos a partir de los cuales la humanidad se ve beneficiada. Algunos de ellos son la regulación del clima, la calidad del aire, el ciclo de los nutrientes, entre otros.

Debido a lo mencionado anteriormente, es que el presente trabajo tuvo como objetivo principal evaluar la función ecosistémica de almacenamiento de carbono otorgada por la plantación de *Eucalyptus camaldulensis* de la empresa y los distintos servicios ecosistémicos asociados a dicha función. Para ello se analizaron dos componentes del ecosistema: suelo y biomasa, ya que a partir de la fotosíntesis las plantas fijan dióxido de carbono de la atmósfera y transfieren carbono a la biomasa vegetal, y a la biomasa del suelo donde se almacena como carbono orgánico en su forma de reserva más lábil. Por otro lado, existe un aporte de carbono al suelo por el efluente producido en la planta industrial.

Para la consecución de los objetivos se realizó un muestreo en el área de estudio de suelos y de biomasa. Las muestras de suelo tomadas a 30 cm de profundidad, fueron analizadas en laboratorio para determinar el contenido de carbono orgánico, obteniéndose una media de 121,41 t/ha. Para la determinación de carbono en biomasa se midió la altura, el diámetro a la altura de pecho y la densidad de plantación de los forestales, obteniéndose un valor medio de carbono total de 113,66 t/ha. Adicionalmente, se realizaron diversos análisis estadísticos para determinar la relación entre diferentes índices espectrales de vegetación y los valores obtenidos de biomasa. A partir de ello es que se calculó la tasa de almacenamiento de carbono en biomasa a lo largo de los años. Los índices espectrales se calcularon con el software QGIS, y se crearon mapas de representación de los resultados obtenidos a partir del mismo.

En la determinación de la provisión relativa de las funciones ecosistémicas de almacenamiento de carbono en biomasa y en suelo a los distintos servicios ecosistémicos se aplicó una adaptación de la metodología ECOSER. Los resultados sugieren que el almacenamiento de carbono en suelo aporta en mayor medida al servicio ecosistémico de actividad biológica del suelo, ciclo de nutrientes y fertilidad, mientras que el almacenamiento de carbono en biomasa aporta mayoritariamente a la regulación del clima.

De acuerdo a los resultados del presente trabajo, puede afirmarse que el establecimiento de la plantación de *Eucalyptus camaldulensis* aumentó el contenido de carbono del ecosistema. Esto no coincide con estudios previos realizados para la misma especie y ello puede deberse a que la plantación es regada con efluente de un proceso productivo que presenta gran cantidad de residuos orgánicos en solución coloidal. Además, este trabajo aporta información relevante que contribuye al conocimiento de la dinámica del carbono en ecosistemas modificados por el ser humano y esto resulta clave en la toma de decisiones relacionadas al tipo de manejo aplicable en este tipo de ecosistemas.

Palabras clave: funciones ecosistémicas, servicios ecosistémicos, biomasa, suelo, carbono, *Eucalyptus camaldulensis*

ABSTRACT

The current problem of climate change affects us all the same, and that is why individuals, companies and organizations are searching for strategies and solutions that can contribute to its mitigation. In this context, the company Derivados Vínicos S.A. seeks to know the carbon stock of its plantation of *Eucalyptus camaldulensis* located in Palmira, San Martín, Mendoza, Argentina. This would allow them to make decisions about the management that is carried out to improve carbon sequestration and the reduction of its losses.

Furthermore, this type of human-modified ecosystem contributes to the provision of ecosystem services from which humanity benefits. Some of them are climate regulation, air quality, and nutrient cycles, among others.

The main objective of this work was to evaluate the ecosystem function of carbon storage provided by the company's *Eucalyptus camaldulensis* plantation and the different ecosystem services associated. In order to evaluate this, two components of the ecosystem were analyzed: soil and biomass. Plants fix carbon dioxide from the atmosphere and transfer it to plant biomass through photosynthesis, in addition, the carbon is transferred from the biomass to the soil where it is stored in the form of organic carbon in the soil in the most labile reserve. Moreover, there is a contribution of carbon to the soil from the effluent produced in the industrial plant.

To achieve the objectives, soil and biomass sampling were carried out in the study area. Soil samples were analyzed in a laboratory to determine organic carbon in soil, obtaining an average of 121,41 tons per hectare. To determine carbon in biomass the height and diameter at chest height of the foresters were measured, getting an average total carbon value of 113,66 tons per hectare. Additionally, various statistical analyzes were carried out to determine the relationship between the different vegetation spectral indices and the values obtained for biomass. Based on this, the carbon storage rate in biomass was calculated over the years. Spectral indices were calculated using QGIS software and maps representing the results obtained were created.

In the determination of the relative provision of the ecosystem functions of carbon storage in biomass and soil to the different ecosystem services, an adaptation of the ECOSER methodology was applied. The results showed that carbon storage in soil contributes to a greater extent to the biological activity of the soil, nutrients cycle and fertility ecosystem service, while the carbon storage in biomass contributes more to the climate regulation.

According to the results of the present work, it can be stated that the plantation establishment of *Eucalyptus camaldulensis* increased the carbon content of the ecosystem. This is not aligned with previous studies conducted on the same species, and this could be attributed to the plantation being irrigated with effluent from the production process that contains a substantial amount of organic waste in colloidal solution. Furthermore, this work provides relevant information that contributes to understanding carbon dynamics in ecosystems altered by human activity, which is crucial for decision-making regarding the appropriate management of these types of ecosystems.

Key words: ecosystem functions, ecosystem services, biomass, soil, carbon, *Eucalyptus camaldulensis*

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, Silvia y Segundo, por su apoyo incondicional durante este recorrido. Porque me dieron la posibilidad de estudiar y me inculcaron los mejores valores.

A mis hermanas, Mariam y Victoria, quienes han sido mi modelo a seguir y siempre me motivaron para salir adelante y hoy poder cosechar el fruto del esfuerzo dedicado a la carrera.

A mi mejor amigo Santiago, quien me acompaña desde hace un tiempo y siempre tiene el consejo justo.

A Candelaria y Rocío, quienes fueron mis primeras amigas en la facultad, excelentes personas y compañeras de vida con quienes espero seguir compartiendo mi camino.

A mis amigos de la facultad, grandes profesionales con quienes he compartido tardes de estudio, mates, salidas de estudio y mucho más. Quienes hicieron este camino más ameno y divertido.

A mi director Leandro Mastrantonio, quien ha sido mi mentor en esta última etapa y me ayudó mucho en el desarrollo de la presente tesis.

A la empresa Derivados Vínicos S.A., por el apoyo económico y por siempre estar dispuestos a colaborar conmigo y mi director.

A Julieta D'Amario, Lucas López y Milagros Ginebra, quienes evaluaron el trabajo y aportaron su conocimiento y experiencia en el tema que enriquecieron esta tesis.

A la Universidad Nacional de Cuyo, la Facultad de Ciencias Agrarias y sus docentes, por brindarme educación pública de calidad.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivos.....	1
2.	Marco Teórico	2
2.1.	Funciones y servicios ecosistémicos	2
2.2.	Cambio climático global y bonos de carbono	3
2.3.	Almacenamiento de carbono en biomasa	4
2.4.	Almacenamiento de carbono en suelos.....	4
2.5.	Protocolo ECOSER.....	5
3.	Materiales y metodología.....	6
3.1.	Área de estudio	6
3.2.	Descripción metodológica.....	7
3.2.1.	Método de muestreo	7
3.2.2.	Almacenamiento de carbono en biomasa	7
3.2.3.	Variabilidad espacio-temporal de carbono en biomasa	8
3.2.4.	Almacenamiento de carbono orgánico en suelo	10
3.2.5.	Variabilidad espacial de COS	11
3.2.6.	Determinación de los servicios ecosistémicos	12
4.	Resultados y discusión	13
4.1.	Almacenamiento de carbono en biomasa	13
4.2.	Variabilidad espacio-temporal de carbono en biomasa.....	17
4.3.	Almacenamiento de carbono orgánico en suelo	30
	Análisis estadístico descriptivo	33
4.4.	Variabilidad espacial de COS	33
4.4.1.	Comparación respecto al carbono regional.....	35
4.5.	Determinación espacial de la provisión relativa de los servicios ecosistémicos.....	39
5.	Conclusiones	43
6.	Bibliografía.....	45
7.	ANEXOS	48
	ANEXO I: Imágenes área de estudio	48
	ANEXO II: Resultados Echevarría (2009)	55
	ANEXO III: Mapas Índices de Vegetación 2023.....	57
	ANEXO IV: Interpolaciones	60
	ANEXO V: Carbono almacenado en el ecosistema.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujos del protocolo ECOSER.....	6
Figura 2: Área de estudio: bosques norte y sur de Derivados Vínicos S.A. Palmira, San Martín, Mendoza, Argentina.....	6
Figura 3: medición de DAP de los forestales.....	8
Figura 6: Determinación del volumen de sedimentación.....	11
Figura 7: Mapa puntos de muestreo de Biomasa.....	14
Figura 8: Mapa de densidad de plantación de los cuarteles (individuo/ha).	15
Figura 9: Mapa de biomasa por cuartel (t/ha).....	15
Figura 10: Mapa de carbono total por cuartel (t/ha).	16
Figura 11: Gráfico de correlaciones lineales entre los índices de vegetación y la biomasa.....	19
Figura 12: Biomasa estimada (kg) para el año 1996.....	21
Figura 13: Biomasa estimada (kg) para el año 2001.....	22
Figura 14: Biomasa estimada (kg) para el año 2006.....	22
Figura 15: Biomasa estimada (kg) para el año 2011.....	23
Figura 16: Biomasa estimada (kg) para el año 2016.....	23
Figura 17: Biomasa estimada (kg) para el año 2021.....	24
Figura 18: Biomasa estimada (kg) para el año 2023.....	24
Figura 19: Regresión simple no lineal entre biomasa (kg) y carbono aéreo (t/ha).....	25
Figura 20: Regresión simple no lineal entre biomasa (kg) y carbono radicular (t/ha).	25
Figura 21: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 1996.....	26
Figura 22: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2001.....	27
Figura 23: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2006.....	27
Figura 24: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2011.....	28
Figura 25: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2016.....	28
Figura 26: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2021.....	29
Figura 27: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2023.....	29
Figura 28: Tasa de almacenamiento de carbono en biomasa (1996-2023).....	30
Figura 29: Mapa puntos de muestreo de suelos.....	31
Figura 30: Interpolación COS (t/ha).	35
Figura 31: Interpolación COS (t/ha) elaborado a partir del mapa INTA 2023.	36
Figura 32: Variación absoluta COS (t/ha).	37
Figura 33: Variación relativa COS.....	37
Figura 34: Valores promedio de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm de suelo en los tres uso de suelos considerados por Gyenge et al.	38
Figura 35: Provisión relativa del SE regulación del clima en el área de estudio.	40
Figura 36: Provisión relativa del SE producción potencial de cultivos en el área de estudio.	40
Figura 37: Provisión relativa del SE calidad del aire en el área de estudio.	41

Figura 38: Provisión relativa del SE producción forestal en el área de estudio.	41
Figura 39: Provisión relativa del SE potencial de recreación en el área de estudio.	42
Figura 40: Provisión relativa del SE ciclo de nutrientes en el área de estudio.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factor de conversión R	8
Tabla 2: Matriz de valoración de aporte relativo utilizada para la consulta a expertos	12
Tabla 3: Propiedades dasonómicas de los cuarteles muestreados	13
Tabla 5: Cálculo de carbono total	16
Tabla 6: Estadística descriptiva de las variables biomasa y carbono total (n=18)	17
Tabla 7: Estadística descriptiva de los índices de vegetación calculados para el año 2023	18
Tabla 8: Matriz de correlaciones lineales entre los índices de vegetación y la biomasa.	19
Tabla 9: Autovalores.....	20
Tabla 10: Autovectores	20
Tabla 11: Análisis de regresión lineal	21
Tabla 12: Coeficientes de regresión y estadísticos asociados	21
Tabla 13: Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)	21
Tabla 14: Estadística descriptiva CT.....	30
Tabla 15: Resultados obtenidos en laboratorio y % de COS presente en las muestras.	31
Tabla 16: Estadística descriptiva de la variable COS (n=40)	33
Tabla 17: Cálculo de COS (t/ha).	33
Tabla 18: Estadística descriptiva del mapa de interpolación COS (t/ha).	35
Tabla 19: Estadística descriptiva del mapa de interpolación COS (t/ha) elaborado a partir del mapa INTA 2023.....	36
Tabla 20: Matriz de valoración	39

1. Introducción

La búsqueda de alternativas para enfrentar la problemática ambiental ha llevado al reconocimiento de la estrecha dependencia que existe entre las características y procesos de los ecosistemas y de aquellos propios de las sociedades humanas. En este contexto, al hablar de servicios ecosistémicos (SE) hacia la sociedad se enfatiza la interdependencia que existe entre sistemas ecológicos y sistemas sociales (Daily, 1997; Díaz et al. 2006; Laterra et al., 2011).

Los ecosistemas naturales proporcionan flujos de bienes y servicios tanto directos como indirectos a los agentes económicos y a la sociedad en general. Muchos de estos servicios constituyen un soporte fundamental para la existencia de la vida misma. Es por esta razón que los ecosistemas son considerados como capital natural de la sociedad (Lavín et al. 2018).

Valorar los servicios ecosistémicos con métodos monetarios a menudo pasa por alto los servicios intangibles que dan forma a las sociedades, culturas y a la calidad de vida y el valor intrínseco de la biodiversidad (Shukla et. al, 2019). Es por ello que es importante valorar los SE desde una perspectiva biofísica y social.

En particular, el almacenamiento de carbono de los montes nativos y de los cultivos forestales aparece a través del tiempo con valoración creciente para la sociedad. Esto es consecuencia de su relación con el calentamiento global y de una creciente toma de conciencia de la sociedad. Precisamente, una de las fuentes principales del almacenamiento de carbono se encuentra en las masas forestales naturales o implantadas. Otro de los grandes reservorios de carbono es el suelo (Laterra et al., 2011).

Si bien las plantaciones forestales poseen un objetivo claramente productivo (generar biomasa para distintos tipos de industrias), también se encuentra ampliamente valorada la prestación de numerosos servicios ecosistémicos, entre ellos, la capacidad de mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO². Así, se ha tomado en cuenta la capacidad de los sistemas forestales de almacenar carbono (C) tanto en biomasa como en compuestos orgánicos del suelo, para desarrollar políticas que favorezcan la instalación de plantaciones con el propósito de mitigar emisiones de GEI (Gyenge et al., 2022). En este sentido, la empresa Derivados Vínicos S.A. busca compensar el CO₂ emitido en cada proceso productivo a través de la captura y almacenamiento de carbono en su plantación forestal.

Para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible, por un lado, conocer la dinámica del C en los ecosistemas forestales y, por otra, las modificaciones a los flujos de C derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo. Un primer paso indispensable para lograr este propósito, es contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema (Ordóñez y Maser, 2001).

1.1. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general evaluar la función ecosistémica de almacenamiento de carbono otorgada por la plantación de *Eucalyptus camaldulensis* de la empresa "Derivados Vínicos S.A." ubicada en Palmira, Mendoza, Argentina y los

distintos servicios ecosistémicos asociados a esta función.

Los objetivos particulares son:

- i) Estimar las funciones ecosistémicas de almacenamiento de carbono en suelo y almacenamiento de carbono en biomasa.
- ii) Cuantificar la variabilidad espacio-temporal de carbono en suelo y en biomasa en la plantación.
- iii) Estimar el aporte relativo de cada función ecosistémica a distintos servicios ecosistémicos.
- iv) Estimar espacialmente la provisión relativa de los servicios ecosistémicos relevantes.

2. Marco Teórico

2.1. Funciones y servicios ecosistémicos

A medida que los organismos interactúan entre sí y con su entorno físico, producen, adquieren o descomponen la biomasa y los compuestos orgánicos. Estos también mueven los minerales del agua, los sedimentos y el suelo hacia y entre los organismos, y de regreso al medio ambiente físico. Las plantas terrestres también transportan agua desde el suelo hacia la atmósfera. En el desempeño de estas funciones, estas proveen materiales a los humanos en forma de madera, fibras y materiales de construcción, y contribuyen a la regulación de la calidad del suelo, aire y agua (Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2003).

Los componentes del ecosistema incluyen elementos bióticos (la biodiversidad), elementos abióticos (condiciones climáticas, geomorfológicas, edáficas) y las interacciones entre ellos (los procesos ecosistémicos). Todos estos factores son centrales para la provisión de servicios ecosistémicos (Laterra et al., 2011).

Las funciones ecosistémicas (FE) constituyen aquellos procesos intrínsecos de los ecosistemas que contribuyen a la provisión de servicios directos a la sociedad o “servicios ecosistémicos”. Los servicios ecosistémicos son los beneficios que la humanidad obtiene de los ecosistemas. Estos incluyen servicios de aprovisionamiento como agua y comida; servicios de regulación como control de inundaciones o enfermedades; servicios culturales tales como beneficios espirituales, recreacionales; y servicios de soporte como el reciclaje de nutrientes, que mantiene las condiciones para la vida en la Tierra (MEA, 2003).

Según la clasificación propuesta por MEA (2003), los SE que proporcionan los ecosistemas forestales son: a) de aprovisionamiento, como fuente de recursos genéticos y madera; b) de regulación, como purificación del agua, control de la erosión del suelo y regulación del clima;

c) servicios culturales educacionales y estéticos; y d) aquellos servicios de soporte referidos a la formación del suelo y el reciclaje de nutrientes en el mismo.

A pesar de que a lo largo de los años han surgido diversas definiciones de servicios ecosistémicos (SE), en este trabajo se tomará en consideración la aportada por MEA (2003), ya que incluye en ella tanto los ecosistemas naturales como aquellos que han sido modificados por el ser humano, como es el caso de la plantación de *Eucalyptus camaldulensis* que presenta la empresa Derivados Vínicos S.A.

Los individuos, las empresas y las organizaciones, como parte de la sociedad, contribuyen con el cuidado del ambiente y con la oferta de bienes y servicios ambientales (BSA), según distintos gradientes de información, filosofía, cultura, poder adquisitivo, compromiso, entre otros (Laterra et al., 2011). Derivados Vínicos S.A. es una empresa comprometida con el cuidado del ambiente y que aporta BSA. Algunas de las acciones de la empresa en este sentido tienen que ver con el tratamiento del efluente generado en los distintos procesos productivos y el destino final del mismo en el predio forestado con aproximadamente 110.000 árboles, los cuales capturan dióxido de carbono (CO₂) reduciendo así la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Además, al almacenar carbono en su biomasa y reducir la presión sobre los bosques nativos por madera, las plantaciones forestales son una alternativa de mitigación del cambio climático (Ramírez & Chagna, 2019).

2.2. Cambio climático global y bonos de carbono

El calentamiento global es un término que hace referencia al aumento de la temperatura media del planeta Tierra. En la actualidad, el cambio climático global se atribuye generalmente a la concentración en la atmósfera de los llamados gases de efecto invernadero (GEI) por arriba de los niveles históricos; y, debido a su abundancia, el dióxido de carbono (CO₂) es el GEI más importante producido por las actividades humanas (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007).

Según estimaciones de la misma empresa el cultivo forestal mitiga sus emisiones totales, es por ello que, conociendo el valor real del carbono almacenado se podría buscar la comercialización de bonos de carbono. Los “Créditos de carbono” o “bonos de carbono” son certificados intercambiables que se comercializan bajo los mercados de carbono y que pueden representar:

- a. El derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO₂eq).¹
- b. La reducción o remoción de una tCO₂eq de la atmósfera, que se usa para compensar emisiones de GEI (Gonda, 2022).

El mercado de carbono en Argentina no está regulado legalmente en la actualidad, es por ello que si la empresa ambiciona participar del mismo puede hacerlo desde los mercados voluntarios de bonos de carbono. Los mismos no están regulados por los gobiernos y operan sin un tope de emisiones (Gonda, 2022). Esto traería como consecuencia un incremento monetario para la empresa Derivados Vínicos S.A.

Bajo los mecanismos de compensación, los créditos de carbono son generados por proyectos que buscan evitar, reducir o eliminar emisiones de GEI de la atmósfera (Gonda, 2022). Los mecanismos de compensación consisten en reducciones de emisiones alcanzadas a través de proyectos de mitigación, como es el caso de la plantación forestal que contiene la empresa.

¹ tCO₂eq: concentración de gases que causaría el mismo forzamiento radiativo medio mundial que la mezcla dada de CO₂ con otros gases de efecto invernadero y aerosoles. (IPCC, 2006)

2.3. Almacenamiento de carbono en biomasa

Para caracterizar de manera integral el rol de la vegetación boscosa en la dinámica del C, es importante determinar la tasa de captura de CO₂, directamente relacionada con la velocidad de acumulación de biomasa. El ritmo con que se produce esta acumulación responde a numerosos factores, empezando por aquellos que rigen el desarrollo del proceso fotosintético (intensidad lumínica, temperatura, concentración de CO₂) y de la respiración que hace uso de parte de los fotoasimilados, generando una producción primaria neta. El balance positivo entre ambos procesos se evidencia en el crecimiento de los tejidos vegetales por unidad de tiempo, un parámetro medible que permite caracterizar la dinámica de los ecosistemas (Ledesma et. al, 2021).

Las estructuras que almacenan el C en árboles son aquellas que conforman la biomasa aérea y la radicular. La mayor cantidad de C que se almacena en los árboles se fija a través del proceso de la fotosíntesis y se acumula en la biomasa aérea (Perea-Ardila et. al, 2021). La materia seca contiene en promedio un 50% de C almacenado según el IPCC (2006).

2.4. Almacenamiento de carbono en suelos

El suelo representa uno de los recursos clave para la mitigación y adaptación al cambio climático por su capacidad de almacenar compuestos carbonados tanto orgánicos como inorgánicos (Gyenge et. al, 2022). El Carbono Orgánico en suelo (COS) es un componente muy dinámico y clave para el funcionamiento de los ecosistemas (productivos o conservados) y servicios ecosistémicos que pueden brindar (Schlesinger, 1997).

Cuantificar el COS es el primer paso para dimensionar las reservas de un suelo y tomar decisiones sobre cómo mejorar el almacenamiento de C y/o reducir su pérdida, analizando la respuesta de los ecosistemas ante cambios ambientales como producto de la variación climática o ante decisiones relacionadas con el manejo. De esta manera, definir un esquema de monitoreo del C del suelo se torna indispensable para diseñar, evaluar y promover estrategias o políticas de almacenamiento de C atendiendo tanto a las posibles respuestas productivas como así también, cumpliendo con los objetivos de reducción de emisiones de GEI a nivel nacional (Gyenge et. al, 2022).

Cuando se trata de CO₂, el almacenamiento de COS comprende tres etapas: 1) la extracción del CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis de las plantas; 2) la transferencia de carbono del CO₂ a la biomasa vegetal; y 3) la transferencia de carbono de la biomasa vegetal al suelo donde se almacena en forma de COS en la reserva más lábil (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2017).

Se estima que la reserva global de COS almacena 1.500 PgC en el primer metro de suelo, lo cual supone más carbono que el contenido en la atmósfera (aproximadamente 800 PgC) y la vegetación terrestre (500 PgC) combinados (FAO y Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos [GTIS], 2015).

En principio, la cantidad de COS almacenada en un suelo determinado depende del balance entre la cantidad de C que entra en el suelo a través del aporte continuo de

material orgánico (esencialmente de origen vegetal), y la que sale del suelo (principalmente como gases de respiración basados en C procedente de la mineralización microbiana y, en menor medida, de la lixiviación del suelo como carbono orgánico disuelto). Localmente, el C también se puede perder o ganar a través de la erosión o deposición del suelo, lo que lleva a la redistribución del C del mismo a escala local, paisajística y regional. Por lo tanto, los niveles de almacenamiento de COS se controlan principalmente gestionando la cantidad y el tipo de residuos orgánicos que entran en el suelo (es decir, el aporte de C orgánico al sistema del suelo) y minimizando las pérdidas de C del suelo (FAO y GTIS, 2015). Derivados vínicos S.A. está incorporando constantemente C a su sistema a través del riego de los cuarteles con efluentes ricos en materia orgánica generado en sus procesos productivos. Es importante tener en cuenta el tipo de manejo que se realiza en el área o el uso que se le da al suelo ya que, según la FAO (2017), los impactos antropogénicos en el suelo pueden convertirlo en sumidero o fuente neta de GEI.

La plantación objeto de estudio está ubicada en San Martín, Mendoza, correspondiente a una zona árida, parte de la plantación se encuentra en un paleocauce del río Mendoza y parte en las márgenes del mismo. El suelo es un entisol de escaso desarrollo del tipo torrifluvente típico (Regairaz, 2000). El almacenamiento de carbono en tierras de zonas áridas es un proceso lento que se ve afectado y limitado por diversos elementos bioclimáticos (temperatura, humedad, precipitaciones) y según Gaitán et al. (2023) para el área de estudio la media de COS es de 35,6 t/ha. Además, estos terrenos son susceptibles a diversos tipos de degradación, incluida la erosión eólica y ciertas prácticas de gestión que causan fácilmente la degradación. En consecuencia, los suelos de tierras áridas deben ser gestionados de manera sostenible para mantener sus niveles existentes de COS y fomentar su potencial de almacenamiento de COS (Naciones Unidas, 2011; FAO y GTIS, 2015).

2.5. Protocolo ECOSER

El análisis de los servicios o beneficios que proveen los ecosistemas a las sociedades humanas representa un enfoque de investigación relativamente reciente que se ha difundido gracias a que establece un vínculo explícito entre el bienestar humano y el adecuado funcionamiento de los ecosistemas (Latterra et. al, 2011). Sin embargo, resulta complejo definir un método completo y certero de valoración de los diversos SE.

El protocolo ECOSER es un esquema de procedimientos para la evaluación no monetaria y el modelado de la distribución espacial de servicios ecosistémicos y de la vulnerabilidad ambiental asociada a la pérdida de los mismos, aplicable a un amplio rango de escalas espaciales y calidad de información (Latterra, 2011).

ECOSER se compone de dos etapas o módulos (Figura 1):

- 1) la evaluación y mapeo funcional del paisaje (área donde se aplique el protocolo) donde el producto generado son los mapas de FE, diferentes SE y sus beneficios asociados;
- 2) la evaluación de la VSE frente a la pérdida de beneficios derivados de los SE (Latterra, 2015). En este trabajo se realizaron los primeros pasos del módulo uno (Flujo de FE, y flujos de SE).

Este protocolo entiende a las FE como los atributos y procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen al automantenimiento de los ecosistemas y que soportan el

flujo de servicios ecosistémicos, y entiende a estos últimos como el conjunto de funciones ecosistémicas capaces de transformar el capital natural en beneficios potenciales para los individuos y sociedades humanas.



Figura 1: Diagrama de flujos del protocolo ECOSER para la evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos (SE) y estimación de la vulnerabilidad socio-ecológica (VSE) a la pérdida de los mismos.

3. Materiales y metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a los cuarteles de plantación de la empresa Derivados Vínicos S.A. ubicada en Palmira en el departamento de San Martín, Mendoza (Figura 2: mapa área de estudio).

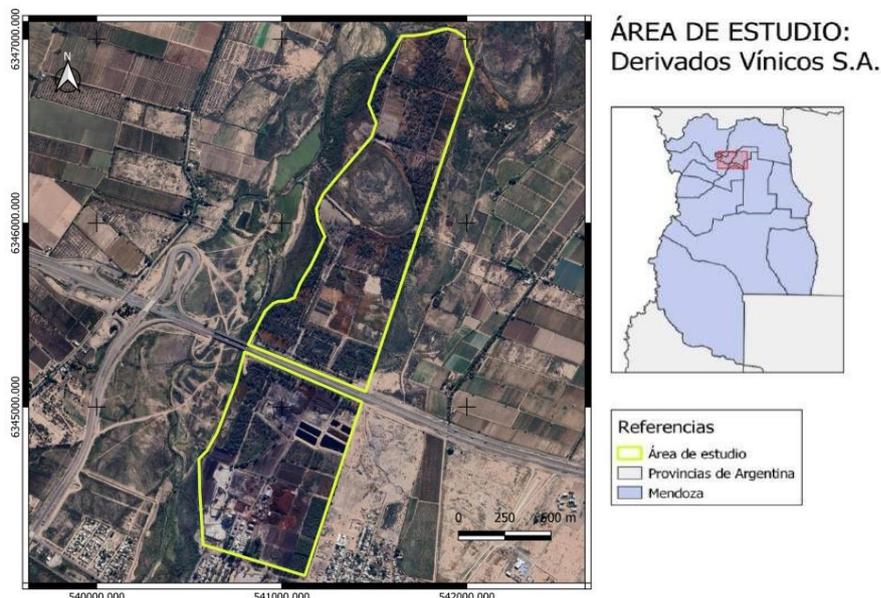


Figura 2: Área de estudio: bosques norte y sur de Derivados Vínicos S.A. Palmira, San Martín, Mendoza, Argentina.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

Derivados Vínicos es una industria de base biológica; una biorefinería que utiliza el conocimiento y la tecnología para acompañar la labor regenerativa de la naturaleza. Se especializa en el reciclaje de biomasa residual vínica; es decir, en la reutilización y la transformación productiva de recursos biológicos renovables (orujos y borras),

descartados del proceso de elaboración del vino. De esa manera, buscan mejorar el desempeño ambiental y la sostenibilidad de la cadena de valor del vino argentino. En la elaboración de sus productos (ácido tartárico, metatartárico, cremor tártaro, aceite de pepita de uva, entre otros) generan gran cantidad de efluentes, los mismos tienen como destino final la plantación de eucaliptos.

Actualmente, la empresa cuenta con un predio de 109 hectáreas, de las cuales 96 están forestadas con más de 110.000 árboles. La principal especie cultivada es *Eucalyptus camaldulensis*, que es de rápido crecimiento y tolerante a factores de estrés como salinidad, sequía y anegamiento. Esta plantación es irrigada mediante el método de inundación con aguas residuales ricas en nutrientes, previamente tratadas y acondicionadas para su reúso agrícola.

La superficie regada con efluente es de 75 ha de *E. camaldulensis*, 4 ha de bosque mixto *Eucalyptus-Populus sp.* y 3,2 ha de vid (Cabernet sauvignon). Con agua de pozo se riegan 10,2 ha de vid (Bonarda) y 4,6 ha de *Populus sp.* El bosque está dividido en cuarteles de diferentes edades, superficies y densidades de plantación (Echevarría, 2009).

El efluente llega al bosque con un caudal medio, en forma continua durante 11 meses al año, de 400 m³/h. Las características físico-químicas son: conductividad eléctrica menor a 2250 µS/cm, pH entre 6,5 – 7,5 y considerable carga orgánica (Echevarría, 2009).

3.2. Descripción metodológica

3.2.1. Método de muestreo

Para determinar el muestreo a realizar se descargaron imágenes satelitales del satélite Landsat 8 de la plantación forestal con fecha de captura del 16 de marzo del año 2022.

Se calculó el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) (cálculos especificados en apartado 3.2.3.), los cuales fueron clasificados en forma no supervisada mediante el algoritmo K-means, con el fin de obtener zonas homogéneas de biomasa, correspondientes a estratos de muestreo, sobre los cuales se realizó un muestreo aleatorio estratificado, tanto de suelos como de árboles. Además se consideró la accesibilidad debido a la inundación del terreno y el crecimiento de la vegetación (Ver [Anexo I](#)).

3.2.2. Almacenamiento de carbono en biomasa

Los puntos de muestreo de biomasa se localizaron utilizando la aplicación móvil Mobile Topographer Pro (versión 15.0.2), luego en cada punto se determinó una franja de 20 metros de largo por 10 metros de ancho respetando la dirección de plantación en cada cuartel (n=18).

La biomasa se estimó mediante la ecuación alométrica desarrollada por Echevarría (2009) para la especie *Eucalyptus camaldulensis* en el área de estudio, para la cual fue necesaria la medición del diámetro a la altura de pecho (DAP) de todos los árboles ubicados dentro de la franja. Además, se realizó la medición de la altura total de árboles representativos de cada franja. La ecuación es la siguiente:

$$\text{Biomasa del árbol (kg)} = 0,1108 * \text{DAP}^{2,6041}$$

La circunferencia del árbol se midió con una cinta métrica a 1,3 m sobre la base del mismo (Figura 3). Luego se aplicó la fórmula: $\text{DAP} = \text{circunferencia a la altura de pecho} / \pi$. La altura de los árboles se obtuvo con un hipsómetro Suunto. En aquellos cuarteles donde se podía visualizar elevada heterogeneidad se tomaron dos mediciones de altura y se realizó un promedio, en cambio, en los cuarteles homogéneos se determinó únicamente una altura.



Figura 3: medición de DAP de los forestales

Luego, para la estimación del contenido de carbono presente en biomasa aérea, se multiplicó el valor obtenido de biomasa por el factor de conversión propuesto por el IPCC (2006) $\text{CF} = 0,47$ (siendo CF: fracción de carbono).

Para la estimación del carbono radicular se utilizó el factor de conversión R (relación biomasa subterránea/biomasa aérea), propuesto también por el IPCC (2006), que presenta distintos valores dependiendo de la cantidad de toneladas por hectárea de biomasa presentes en el área de estudio (Tabla 1). Luego, se realizó la sumatoria de los valores obtenidos de carbono aéreo total y carbono radicular para obtener el carbono total (CT).

Tabla 1: Factor de conversión R

Biomasa (t/ha)	R
<50	0,44
50-150	0,28
>150	0,2

Por último, se realizó el análisis estadístico descriptivo de los datos correspondientes a biomasa aérea y a carbono total en el software Infostat/P (Di Renzo et al., 2020)

3.2.3. Variabilidad espacio-temporal de carbono en biomasa

Para determinar la variabilidad espacio-temporal de carbono en biomasa, se

descargaron imágenes satelitales históricas del United States Geological Survey [USGS] (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) del satélite LandSat 5 y 8, a partir del año 1996 (primera plantación realizada por la empresa) y cada 5 años, se calcularon diversos índices espectrales mediante el uso del software QGIS 3.28.

Los índices espectrales de vegetación (IEV) permiten detectar la presencia de vegetación en determinada zona y la actividad de la misma. En términos generales, un índice de vegetación puede definirse como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretenden extraer de los mismos la información relativa a la vegetación, minimizando las perturbaciones debidas a factores tales como el suelo o la atmósfera (Gilbert, 1997; Olaya, 2014).

Los índices de vegetación calculados (Bannari et al., 1995) fueron:

- Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI): permite localizar zonas con presencia de vegetación.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

- Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde (GNDVI): es una versión modificada del NDVI que adiciona sensibilidad a la variación del contenido de clorofila en el cultivo.

$$GNDVI = (NIR - GREEN) / (NIR + GREEN)$$

- Índice de Vegetación Mejorado (EVI): se utiliza para cuantificar el verdor de la vegetación. Además, corrige condiciones atmosféricas y el ruido de fondo del dosel. Es más sensible en áreas con vegetación densa.

$$EVI = G * ((NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * B + L))$$

- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI): corrige el NDVI por la influencia del brillo del suelo en zonas donde la cobertura vegetal es baja.

$$SAVI = ((NIR - RED) / (NIR + RED + L)) * (1 + L)$$

- Índice de Diferencia Normalizada de Humedad (NDMI): sirve para determinar el contenido de humedad de la vegetación.

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

- Índice de Estrés Hídrico (MSI): se utiliza en el análisis del estrés del dosel, la predicción de productividad y el modelado biofísico.

$$MSI = MidIR / NIR$$

- Índice de Clorofila (GCI): estima el contenido de clorofila en las hojas de diversas especies vegetales.

$$GCI = (NIR / GREEN) - 1$$

Siendo, NIR: la banda de infrarrojo cercano, RED: banda roja, GREEN: banda verde, G y L: factores de ajuste de fondo, C1 y C2: coeficientes de resistencia atmosférica, B: banda azul, SWIR: banda de infrarrojo de onda corta, MidIR: banda de infrarrojo medio.

Luego de la obtención de los IEV, se determinó la relación de los mismos con los datos de biomasa relevados en campo durante el periodo estival 2022/23 mediante análisis estadísticos. Se aplicó correlación lineal para todos los índices para conocer la relación lineal entre los mismos. Mediante el análisis multivariado de componentes principales y el análisis de regresión lineal de la variable biomasa en función de los índices de vegetación, se obtuvo el modelo que permitió predecir la biomasa del área de estudio para los distintos años analizados.

Luego, a partir del análisis de regresión no lineal, se estableció la relación funcional de carbono aéreo y carbono radicular con biomasa media por individuo. De esta manera se obtuvieron dos ecuaciones que permitieron estimar el carbono aéreo y el carbono radicular en toda el área de estudio, luego estas capas ráster se sumaron para obtener el valor correspondiente a carbono total. Esto permitió establecer tasas de almacenamiento de carbono en biomasa para cada año estudiado.

3.2.4. Almacenamiento de carbono orgánico en suelo

Se extrajeron muestras de suelo del uso “forestales” (n=32) y del “monte nativo” (n=8), considerando la variabilidad observada a campo y mediante imágenes satelitales. Las muestras se tomaron en los primeros 30 cm de profundidad, ya que la misma está asociada a que los suelos forestales contienen un 50% de carbono orgánico en suelo en esos primeros 30 cm (Penman et al., 2003), y fueron colocadas en bolsas separadas y rotuladas para luego ser analizadas en laboratorio (Figuras 4 y 5).



Figura 4: Pozo de 0,3 m en el cuartel 58.



Figura 5: Muestras de suelo en sus respectivas bolsas rotuladas.

En laboratorio se midió el carbono orgánico oxidable por dicromato de potasio (Walkley Black, 1934).

Se realizó la conversión de COS % a t/ha, a partir de la determinación de volumen de sedimentación (VS) mediante el procedimiento propuesto por Nijensohn y Maffei (1996) (Figura 6).



Figura 6: Determinación del volumen de sedimentación.

Luego se estimó el contenido de cada una de las fracciones granulométricas de cada muestra mediante las siguientes funciones de edafotransferencia obtenidas por Mastrantonio et al. (2013)

$$\text{Arcilla} = -18,04 + 0,29 * VS \quad R^2 = 0,88$$

$$\text{Limo} = -53,3 + 0,96 * VS \quad R^2 = 0,85$$

$$\text{Arena} = 171,4 - 1,24 * VS \quad R^2 = 0,90$$

Una vez obtenidos estos valores, se estimaron las densidades aparentes (D_{Aparente}) de cada fracción granulométrica; y un promedio de las tres para la obtención del Promedio D_{Aparente} (t/m^3).

$$D_{\text{Aparente}}(\text{arcilla}) = -0,0211 * \text{Arcilla} + 1,7445$$

$$D_{\text{Aparente}}(\text{limo}) = -0,0063 * \text{Limo} + 1,7931$$

$$D_{\text{Aparente}}(\text{arena}) = 0,005 * \text{Arena} + 1,2877$$

Como la muestra de suelo se realizó a 30 cm de profundidad, se calculó la masa del suelo (t/ha) a partir del producto entre D_{Aparente} media y el volumen de una hectárea de suelo ($3000 m^3/ha$). Luego se aplicó la siguiente fórmula para la obtención de COS en g/ha y se realizó una conversión de unidades a COS en t/ha para poder compararlo posteriormente con los datos obtenidos por INTA (Gaitán et al., 2023).

$$COS(g/ha) = (\text{Peso S} * COS\%) / 0,0001 \quad COS(t/ha) = COS(g/ha) * 1.000.000$$

Siendo Peso S el peso del suelo en t/ha y $COS\%$ el contenido de carbono orgánico en suelo expresado en porcentaje.

3.2.5. Variabilidad espacial de COS

A partir de los valores calculados de COS (t/ha) para cada muestra de suelo, se estimaron los valores de la misma en toda el área de estudio, mediante la técnica geoestadística de Kriging Ordinario. Una vez obtenido el mapa de variabilidad espacial de carbono orgánico se lo comparó con el mapa de almacenamiento de COS (t/ha, 0-30 cm) en los suelos de la República Argentina generado por el INTA (Gaitán et al., 2023).

3.2.6. Determinación de los servicios ecosistémicos

A partir de la determinación de las funciones ecosistémicas de almacenamiento de carbono en suelos y biomasa, se consultó a un panel de expertos en la temática, quienes ponderaron el aporte de cada una de las funciones ecosistémicas a las distintas clases de servicios ecosistémicos. El panel de expertos (n=15) estuvo compuesto por especialistas de las disciplinas involucradas en el trabajo (climatología, hidrología, edafología, geomática y tecnologías ambientales).

Para determinar los SE se aplicó una adaptación de la metodología propuesta por el Protocolo Ecoser (Lattera et. al, 2015). Se creó una matriz de doble entrada (Tabla 2), conformada por las funciones y los servicios ecosistémicos. La valoración del aporte relativo de cada función (columnas) a cada servicio (filas) varía entre 0: aporte bajo o despreciable, y 1: para los servicios donde esa función ejerce su máxima contribución.

Tabla 2: Matriz de valoración de aporte relativo utilizada para la consulta a expertos

		FUNCIONES ECOSISTÉMICAS	
		Almacenamiento de carbono en suelo	Almacenamiento de carbono en biomasa
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	Regulación del clima		
	Producción potencial de cultivos		
	Calidad del aire		
	Producción forestal		
	Potencial de recreación		
	Actividad biológica del suelo/ciclo de los nutrientes/fertilidad		

En el cuerpo de la misma se ubicaron los aportes de las funciones a los distintos servicios ecosistémicos. Luego se estandarizaron los aportes y se calculó la media aritmética de todas las ponderaciones. Estos valores se utilizaron para determinar espacialmente la provisión relativa de los servicios ecosistémicos relevantes mediante el mapeo de los mismos. Para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$PSENi = FECOSj * VS_{i(COS)} + FE_{CTj} * VS_{i(CT)}$$

Siendo $PSENi$ la provisión relativa del servicio ecosistémico i normalizada (rango 0-1), $FECOSj$ el valor de carbono orgánico en suelo normalizado (rango 0-1) en el pixel j , $VS_{i(COS)}$ el valor social relativo de la función ecosistémica de almacenamiento de carbono en

suelo respecto al servicio ecosistémico i , $FECT_j$ el valor de carbono total en biomasa normalizado (rango 0-1) en el pixel j , VSi (CT) el valor social relativo de la función ecosistémica de almacenamiento de carbono en biomasa respecto al servicio ecosistémico i .

4. Resultados y discusión

4.1. Almacenamiento de carbono en biomasa

En la Tabla 3 se presentan los resultados medios de DAP y altura (H) de los árboles en los distintos cuarteles muestreados (Figura 7). Como primera apreciación de los datos, se puede observar la elevada variabilidad respecto al diámetro de los troncos de los árboles y su altura, esto se debe a la elevada heterogeneidad respecto a las edades de los árboles por las diferentes fechas de plantación.

Tabla 3: Propiedades dasonómicas de los cuarteles muestreados

Cuartel	DAP medio (m)	H media (m)	Área de la circunferencia (m ²)
38	0,076	7,153	0,005
34	0,105	7,906	0,009
28-29-30	0,090	7,435	0,006
67	0,185	11,859	0,027
45	0,272	20,255	0,058
20	0,290	18,824	0,066
22	0,202	13,177	0,032
13-14	0,184	14,909	0,027
5	0,092	11,294	0,007
4	0,105	13,177	0,009
2	0,132	19,012	0,014
1	0,091	11,144	0,007
45	0,225	18,824	0,040
45	0,239	16,565	0,045
53	0,271	16,565	0,058
55	0,255	18,259	0,051
61	0,303	18,071	0,072
62	0,343	19,577	0,092

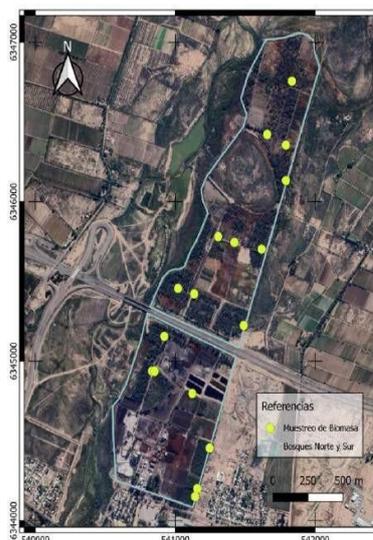


Figura 7: Mapa puntos de muestreo de Biomasa.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de biomasa media por individuo en cada cuartel muestreado. Los mismos se obtuvieron a partir de la ecuación alométrica desarrollada por Echevarría (2009) mencionada anteriormente en la metodología.

Esta ecuación se obtuvo mediante la generación de un modelo de regresión entre el DAP y la masa de diferentes clases diamétricas presentes en la plantación (Ver [Anexo 2](#)). Luego se calculó a partir de la densidad de plantación (individuos por hectárea), las toneladas de biomasa por hectárea presentes en cada cuartel.

Tabla 4: Biomasa por cuartel

Cuartel	Biomasa media por individuo (kg)	Densidad (ind/ha)	Biomasa (kg/ha)	Biomasa (t/ha)
38	21,689	900	19520,062	19,520
34	50,349	750	37761,405	37,761
28-29-30	33,397	1150	38406,966	38,407
67	222,289	400	88915,791	88,916
45	602,851	450	271282,734	271,283
20	710,316	350	248610,525	248,611
22	278,740	650	181181,141	181,181
13-14	217,845	750	163383,925	163,384
5	36,273	1350	48968,819	48,969
4	50,117	2200	110256,598	110,257
2	91,416	1950	178261,322	178,261
1	34,840	2200	76647,448	76,647
45	367,342	700	257139,303	257,139
45	429,298	400	171719,179	171,719
53	596,021	700	417214,715	417,215
55	511,178	250	127794,528	127,795
61	801,795	300	240538,367	240,538
62	1104,217	250	276054,163	276,054

Adicionalmente, se generó un mapa que representa las densidades por cuartel muestreado ya que se observó gran variabilidad en el área de estudio respecto a esa variable (Figura 8). Los distintos colores representan las categorías. Esto coincide con lo obtenido por Echevarría (2009), quien estableció que la densidad varía entre 250 ind/ha en los parches arcillosos hasta 1350 ind/ha siendo la media de 926 ind/ha.

Por el mismo motivo, se realizó también un mapa que representa la biomasa en t/ha por cuartel (Figura 9). Analizando ambos mapas puede notarse que, en general, los cuarteles con menor densidad son aquellos que presentan mayor contenido de biomasa.

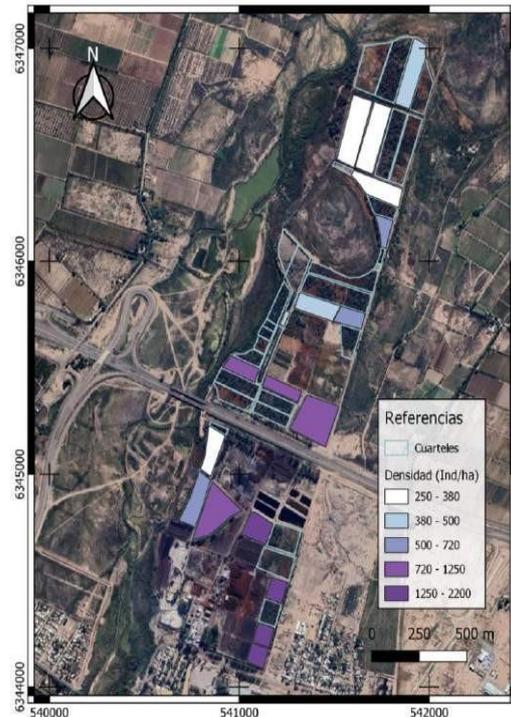


Figura 8: Mapa de densidad de plantación de los cuarteles (individuo/ha).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

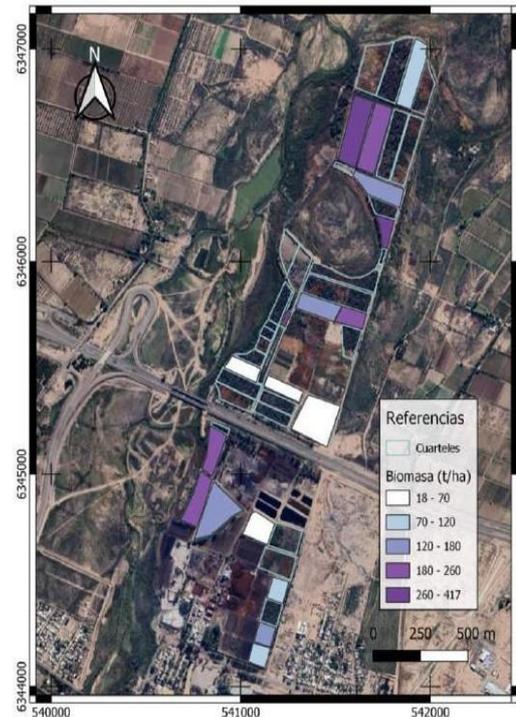


Figura 9: Mapa de biomasa por cuartel (t/ha).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de carbono aéreo y carbono radicular. Los cálculos se realizaron aplicando los factores de conversión propuestos por el IPCC (2006) mencionados anteriormente en la metodología. La sumatoria de carbono aéreo y carbono radicular da como resultado el carbono total presente en cada cuartel, y el mismo representa la función ecosistémica de almacenamiento de carbono en biomasa.

Tabla 5: Cálculo de carbono total

Biomasa (t/ha)	Carbono Aéreo (tC ha ⁻¹)	Carbono Radicular (tC ha ⁻¹)	Carbono Total (tC ha ⁻¹)
19,520	9,174	8,589	17,763
37,761	17,748	16,615	34,363
38,407	18,051	16,899	34,950
88,916	41,790	24,896	66,687
271,283	127,503	54,257	181,759
248,611	116,847	49,722	166,569
181,181	85,155	36,236	121,391
163,384	76,790	32,677	109,467
48,969	23,015	21,546	44,562
110,257	51,821	30,872	82,692
178,261	83,783	35,652	119,435
76,647	36,024	21,461	57,486
257,139	120,855	51,428	172,283
171,719	80,708	34,344	115,052
417,215	196,091	83,443	279,534
127,795	60,063	35,782	95,846
240,538	113,053	48,108	161,161
276,054	129,745	55,211	184,956

Se generó un mapa que representa el carbono total por cuartel en t/ha (Figura 10). Puede observarse a simple vista su elevada variabilidad, esto está relacionado con la heterogeneidad que hay respecto a las edades de los árboles. Además, aquellos cuarteles que presentaron mayor cantidad de biomasa en t/ha son aquellos que presentan mayor contenido de carbono total.

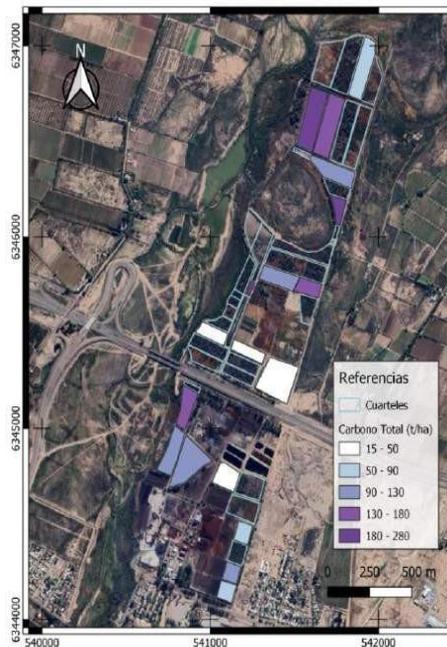


Figura 10: Mapa de carbono total por cuartel (t/ha).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

4.2. Variabilidad espacio-temporal de carbono en biomasa

En la Tabla 6 se presentan las medidas de resumen de las variables “Biomasa (t/ha)” y “Carbono Total (t/ha)”, realizadas con el software Infostat. Se calculó la media, la desviación estándar (D.E.) y la mediana. Además, se muestran los valores mínimos y máximos obtenidos para cada variable de estudio. Como pudo notarse en la Figura 9 y la Figura 10, existe una elevada variabilidad respecto a la biomasa y al carbono total.

Tabla 6: Estadística descriptiva de las variables biomasa y carbono total (n=18)

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo	Mediana
Biomasa (t/ha)	164,09	106,75	19,52	417,22	167,55
CT (t/ha)	113,66	68,14	17,76	279,53	112,26

La media del carbono aéreo (CA) es de 77,123 t/ha, mientras que la media de carbono radicular (CR) es de 36,541 t/ha, estos valores son cercanos a lo obtenido por Gamarra (2001) quien estimó 72,12 t/ha y 21,64 t/ha para el CA y CR respectivamente para la especie *Eucalyptus globulus* en Perú. Por lo tanto, las medias de carbono total (CT) también coinciden, para Gamarra (2001) fue de 93,76 t/ha y en este estudio el valor medio de CT es de 113,66 t/ha. El valor de CA es similar también a lo obtenido por Marcelo-Bazán et al. (2023) para la especie *Eucalyptus viminalis* en Perú quien obtuvo un valor medio de 56,79 t/ha.

Tanto el valor medio de biomasa como el valor mínimo, disminuyeron de manera considerable respecto a los valores obtenidos por Echevarría en el año 2009, quien consiguió una media de 203,63 t/ha y un mínimo de 86,8 t/ha. Sin embargo, el valor máximo obtenido en el 2023 supera al valor máximo de 295,29 t/ha de biomasa obtenido en el año 2009.

La biomasa neta para el área de estudio (96 ha) es de 12306,75 t, esto corresponde a un aumento del 41% respecto a lo obtenido por Echeverría (2009) (8693,6 t). Sin embargo, es importante destacar que en el caso del estudio del 2009 solamente se muestreó el bosque norte, el cual tiene una superficie de 75 ha.

Análisis estadístico descriptivo de índices espectrales

Se presentan en la Tabla 7 las medidas de resumen (media, desviación estándar, mínimo, máximo y mediana) para los distintos índices espectrales de vegetación estimados para el área de estudio para el año 2023. Para observar la variabilidad espacial de los distintos IEV se recomienda ver el [Anexo III](#).

Tabla 7: Estadística descriptiva de los índices de vegetación calculados para el año 2023

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo	Mediana
EVI	1,59	0,32	1,08	2,33	1,57
GCI	0,66	0,17	0,49	1,19	0,6
GNDVI	0,24	0,04	0,2	0,37	0,23
MSI	0,83	0,08	0,63	0,94	0,85
NDMI	0,09	0,05	0,03	0,23	0,08
NDVI	0,23	0,05	0,18	0,36	0,21
SAVI	0,34	0,07	0,27	0,54	0,31

Análisis de correlación lineal

En la Figura 11 se ven representados los resultados obtenidos en el software Infostat para el análisis de correlación lineal entre los IEV y la biomasa en kg. Se puede observar que existe cierta correlación lineal, tanto positiva como negativa entre los distintos índices, a excepción del índice EVI. Luego, en la Tabla 8 se muestra la matriz de correlaciones lineales obtenidas, siendo la mayoría de los p-valor significativos.

Puede observarse que los índices restantes presentan correlación lineal positiva entre sí a excepción del índice MSI, el cual presenta correlación lineal negativa con cada uno de ellos. Esto se debe a que el mismo expresa el estrés hídrico del dosel y los demás índices expresan vigor, clorofila, etc.

En cuanto a la relación lineal de los índices respecto a la biomasa, sólo existe correlación significativa ($\alpha=0,05$) con el índice MSI, aunque, excepto con el EVI, la correlación lineal es significativa para un $\alpha=0,1$ (Tabla 8).

Se concluye que existe correlación lineal entre los distintos índices espectrales, por lo tanto, no podrían utilizarse todos ellos en un análisis de regresión múltiple debido a que se produce multicolinealidad.

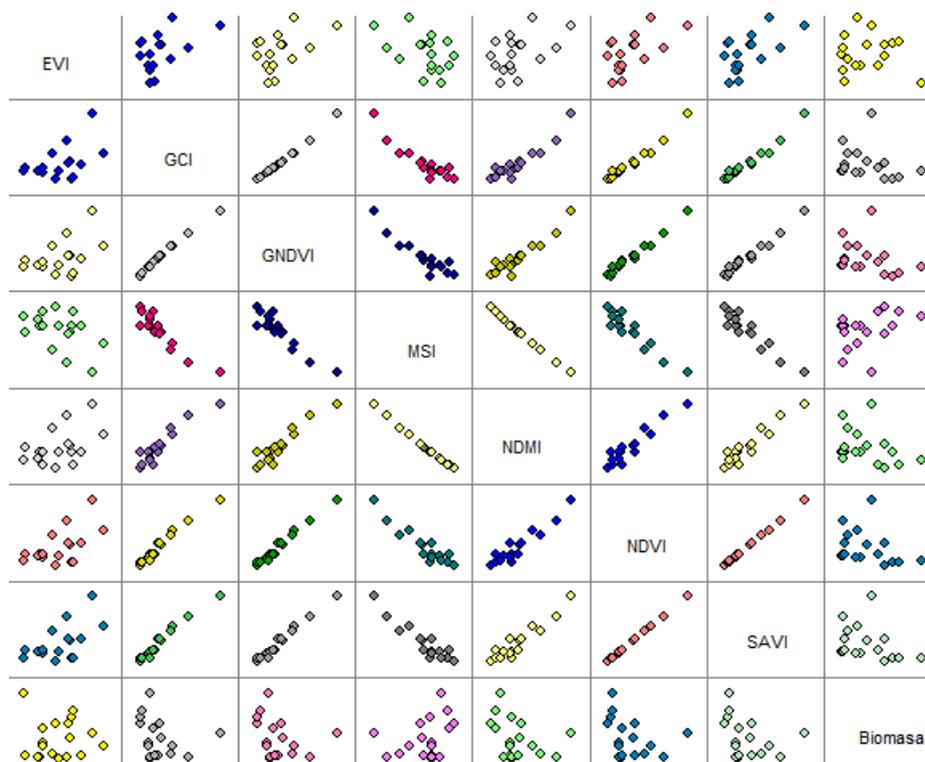


Figura 11: Gráfico de correlaciones lineales entre los índices de vegetación y la biomasa.

Tabla 8: Matriz de correlaciones lineales entre los índices de vegetación y la biomasa.

	EVI	GCI	GNDVI	MSI	NDMI	NDVI	SAVI	BIOM
EVI	1,00	0,19	0,20	0,21	0,21	0,04*	0,04*	0,87
GCI	0,34	1,00	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,07
GNDVI	0,33	1,00	1,00	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,07
MSI	-0,32	-0,89	-0,88	1,00	0,00*	0,00*	0,00*	0,04*
NDMI	0,32	0,90	0,89	-1,00	1,00	0,00*	0,00*	0,05
NDVI	0,50	0,98	0,98	-0,89	0,90	1,00	0,00*	0,06
SAVI	0,50	0,98	0,98	-0,89	0,90	1,00	1,00	0,06
BIOM	-0,04	-0,44	-0,45	0,49	-0,48	-0,47	-0,47	1,00

Nota: * Implica significancia ($p < 0,05$)

Análisis de componentes principales (ACP)

A continuación, se muestran los resultados generados a partir del software Infostat para el análisis multivariado de componentes principales (Tablas 9 y 10). El mismo se realizó utilizando todos los índices de vegetación calculados para cada punto de muestreo del año 2023.

Tabla 9: Autovalores

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	5,87	0,84	0,84
2	0,86	0,12	0,96
3	0,26	0,04	1,00
4	0,01	1,30E-03	1,00
5	1,50E-03	2,10E-04	1,00
6	5,80E-05	8,20E-06	1,00
7	3,20E-12	0	1,00

En la Tabla 9 se puede observar que el lambda 1 explica el comportamiento del 84% de los datos, es por ello que para los análisis posteriores se tomó en cuenta únicamente este valor.

Tabla 10: Autovectores

Variable	e1	e2	e3
EVI	0,19	0,95	-0,12
GCI	0,40	-0,13	0,34
GNDVI	0,40	-0,13	0,37
MSI	-0,39	0,16	0,58
NDMI	0,39	-0,16	-0,55
NDVI	0,41	0,06	0,22
SAVI	0,41	0,06	0,22

Respecto a los valores de autovectores (Tabla 10) se puede notar que los índices SAVI y NDVI son los que mayor aporte hacen al componente principal 1 (CP1), siguiendo los índices GCI y GNDVI, luego NDMI y MSI. El índice EVI es el índice de menor aporte.

Análisis de regresión lineal

Se realizó el análisis de regresión lineal para la variable biomasa en función del componente principal 1 (CP1). En las siguientes tablas (Tablas 11, 12 y 13) se muestran los resultados del software Infostat.

Tabla 11: Análisis de regresión lineal

Variable	R2	R2 Aj	ECMP	AIC	BIC
Biomasa	0,22	0,17	109497,02	246,14	248,64

Tabla 12: Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
Const	337,1	72,97	181,56	492,63	4,62	0,0003		
CP1	-63,95	31,04	-130,12	2,22	-2,06	0,0572	4,24	1

Tabla 13: Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	384063,92	1	384063,92	4,24	0,0572
CP 1	384063,92	1	384063,92	4,24	0,0572
Error	1357850,42	15	90523,36		
Total	1741914,34	16			

El modelo ajustado es el siguiente:

$$Biomasa (kg) = 337,1 - 63,95 * (e1_{EVI} * EVI + e1_{GCI} * GCI + e1_{GNDVI} * GNDVI + e1_{MSI} * MSI + e1_{NDMI} * NDMI + e1_{NDVI} * NDVI + e1_{SAVI} * SAVI)$$

Finalmente, para conocer la variabilidad temporal de biomasa, se estimó la misma en kilogramos para cada año (1996, 2001, 2006, 2011, 2016, 2021, 2023) a partir del modelo obtenido. Se obtuvieron entonces 7 capas correspondientes a cada año analizado y se generaron los siguientes mapas (Figuras 12,13,14,15,16, 17 y 18).

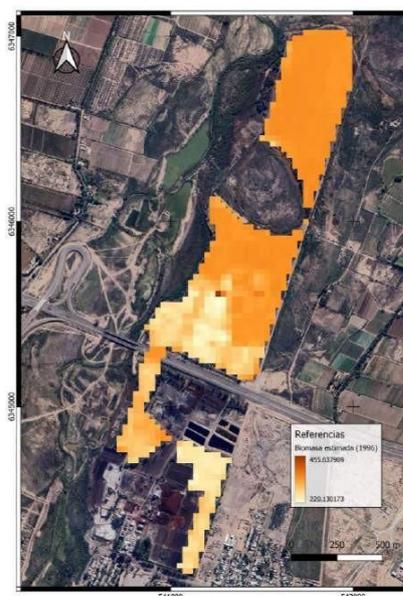


Figura 12: Biomasa estimada (kg) para el año 1996.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

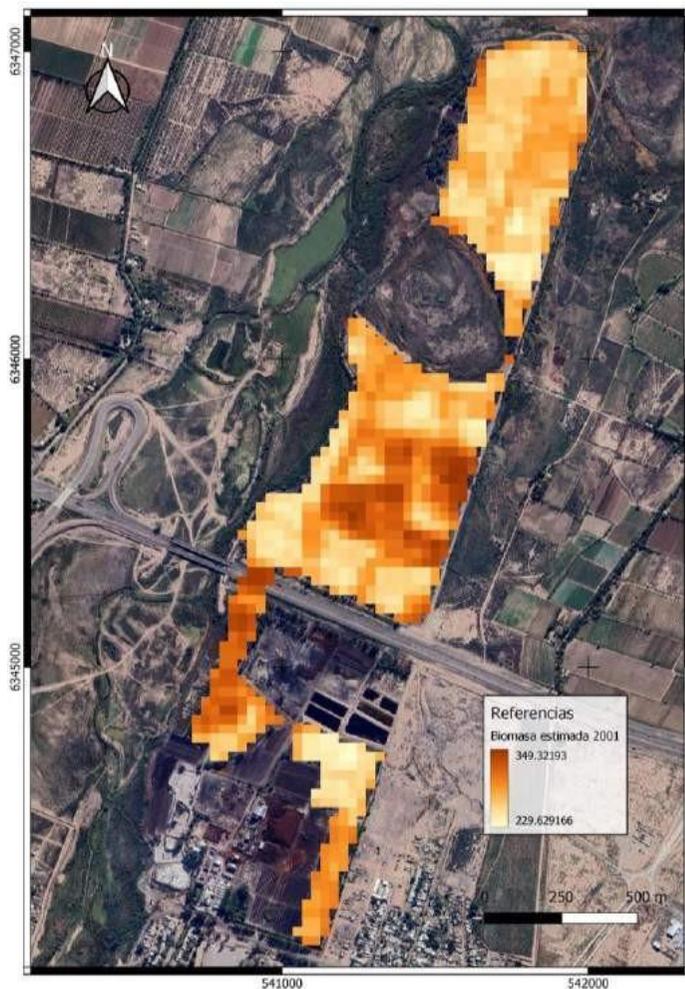


Figura 13: Biomasa estimada (kg) para el año 2001.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

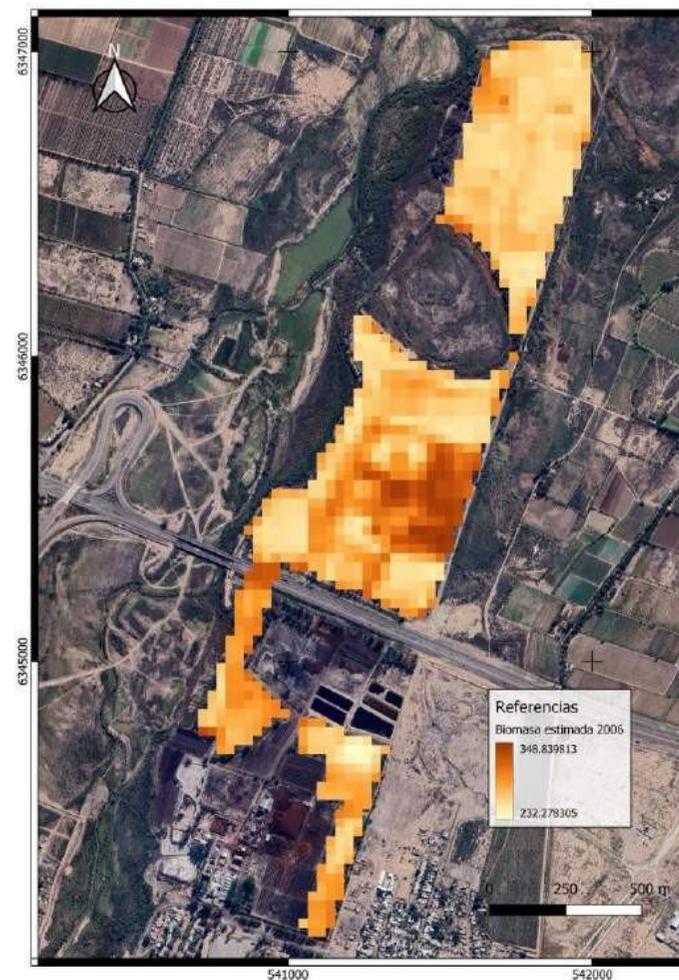


Figura 14: Biomasa estimada (kg) para el año 2006.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

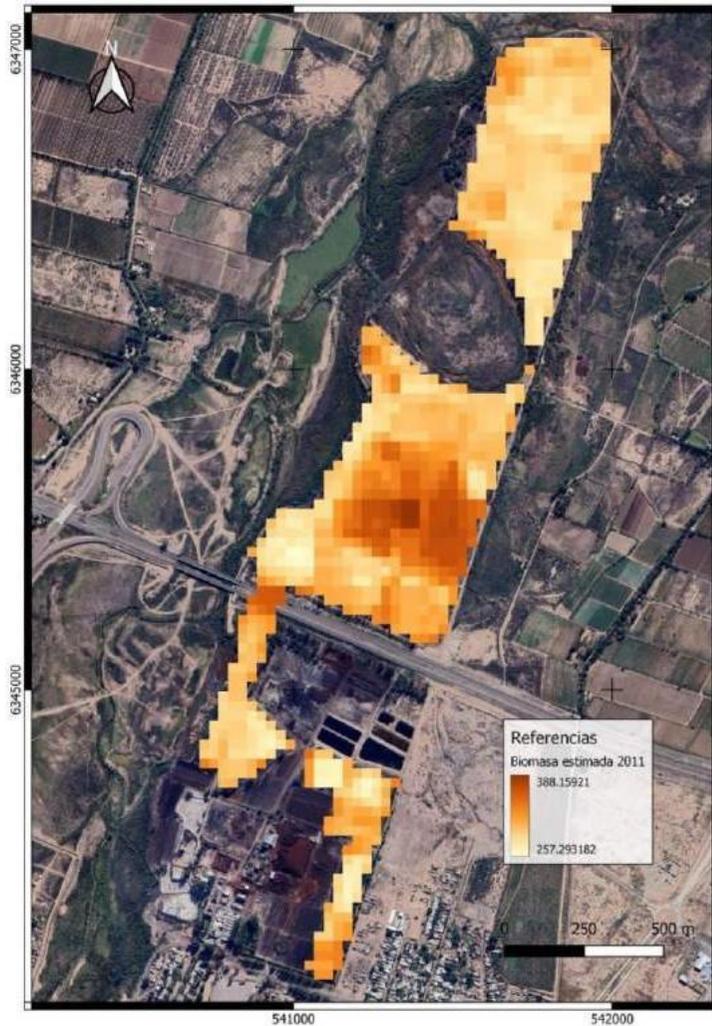


Figura 15: Biomasa estimada (kg) para el año 2011.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

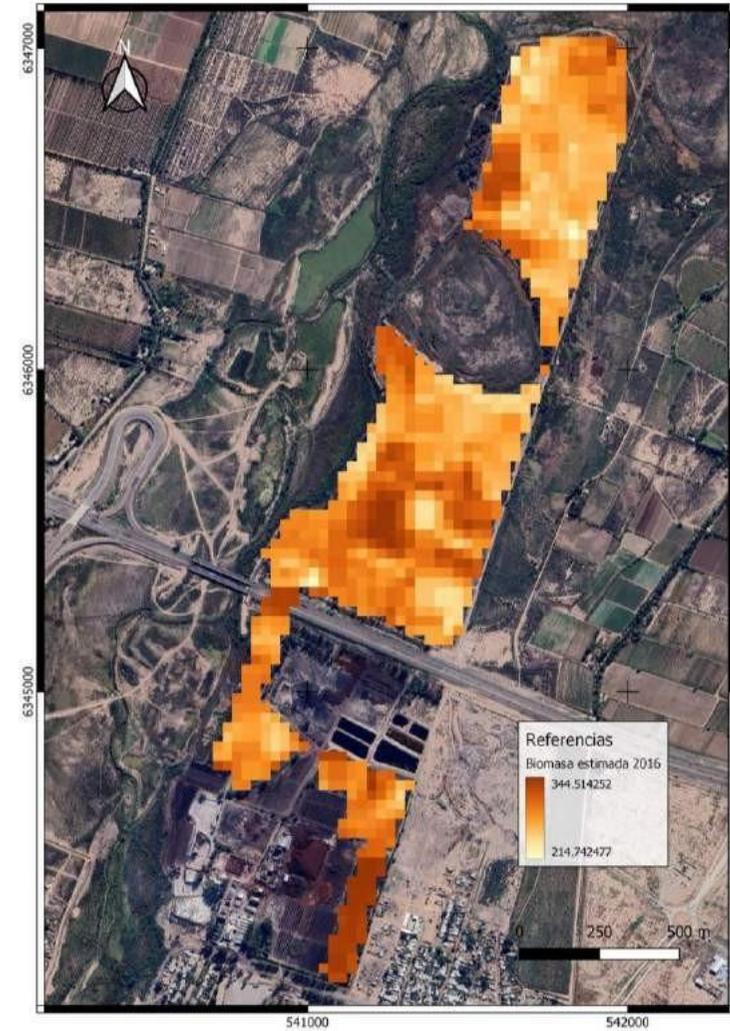


Figura 16: Biomasa estimada (kg) para el año 2016.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

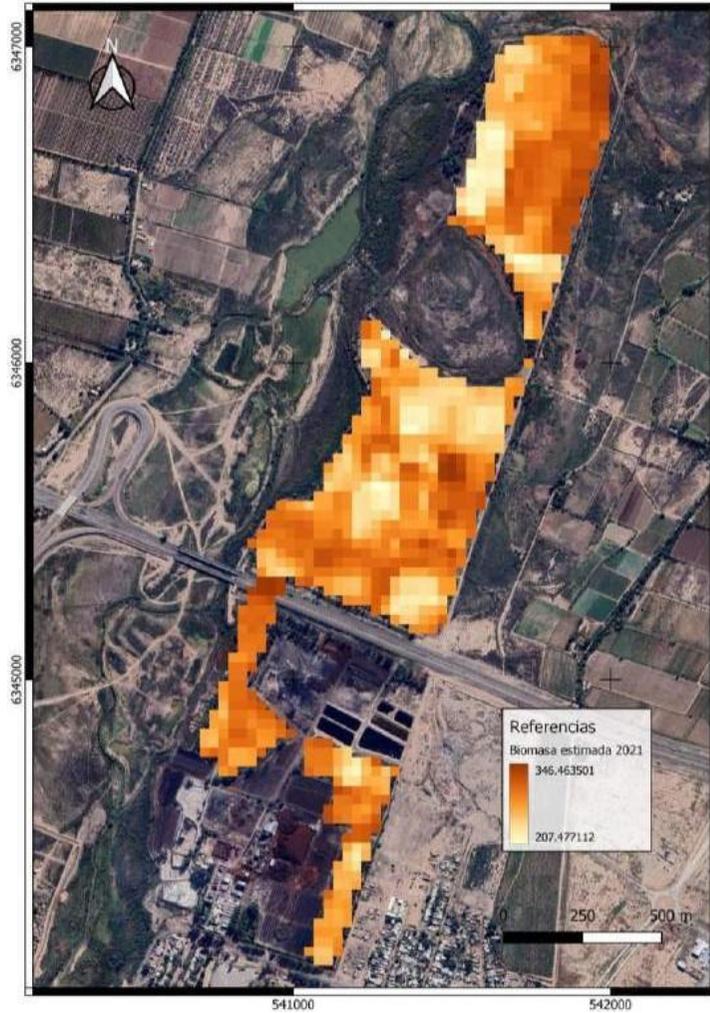


Figura 17: Biomasa estimada (kg) para el año 2021.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

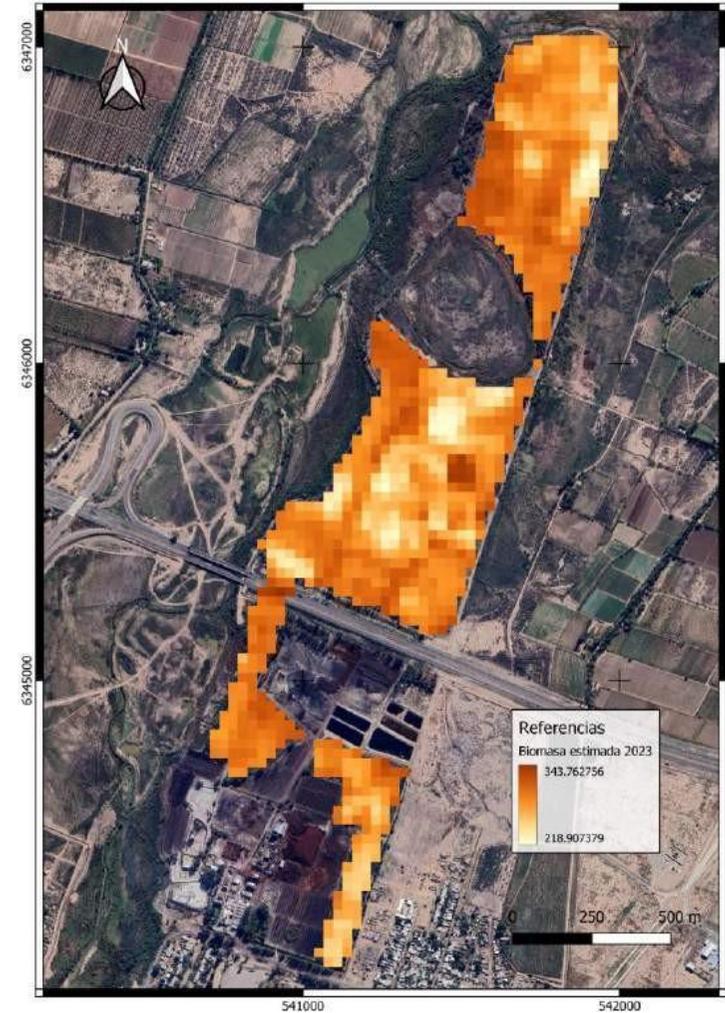


Figura 18: Biomasa estimada (kg) para el año 2023.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

Análisis de regresión simple no lineal

A partir de los datos obtenidos de carbono aéreo y carbono radicular (t/ha) se estableció la relación funcional entre esas dos variables y la biomasa media por individuo en kilogramos, mediante regresión simple no lineal para determinar la variación espacio temporal del carbono total (Figuras 19 y 20).

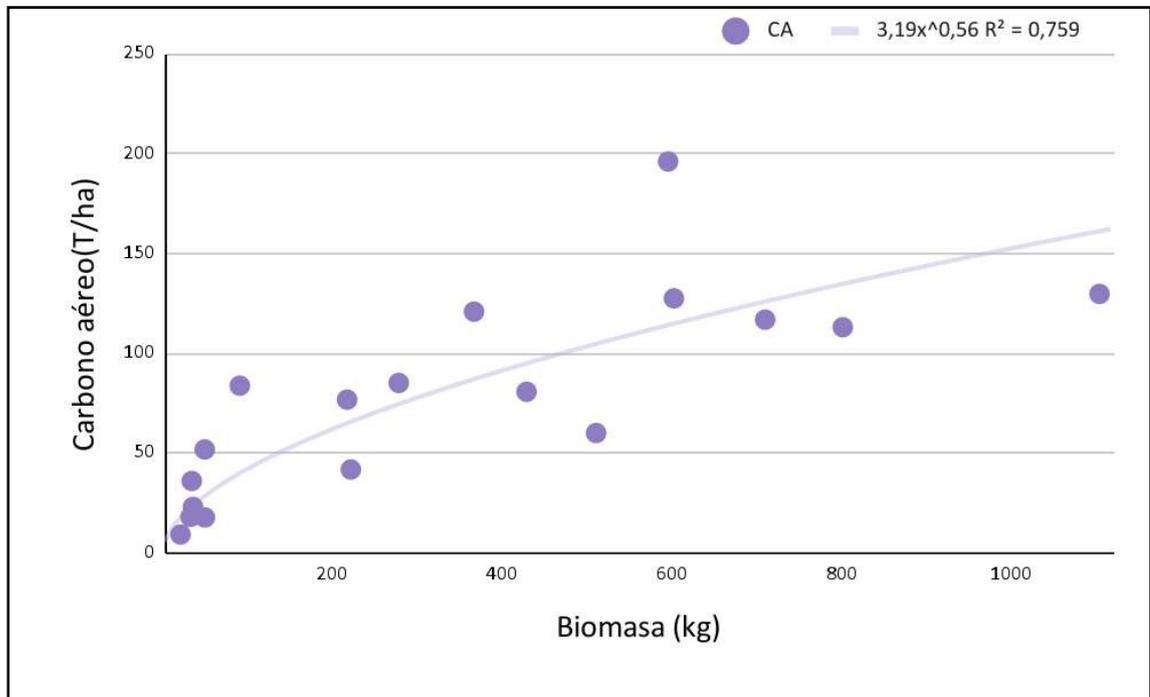


Figura 19: Regresión simple no lineal entre biomasa (kg) y carbono aéreo (t/ha).

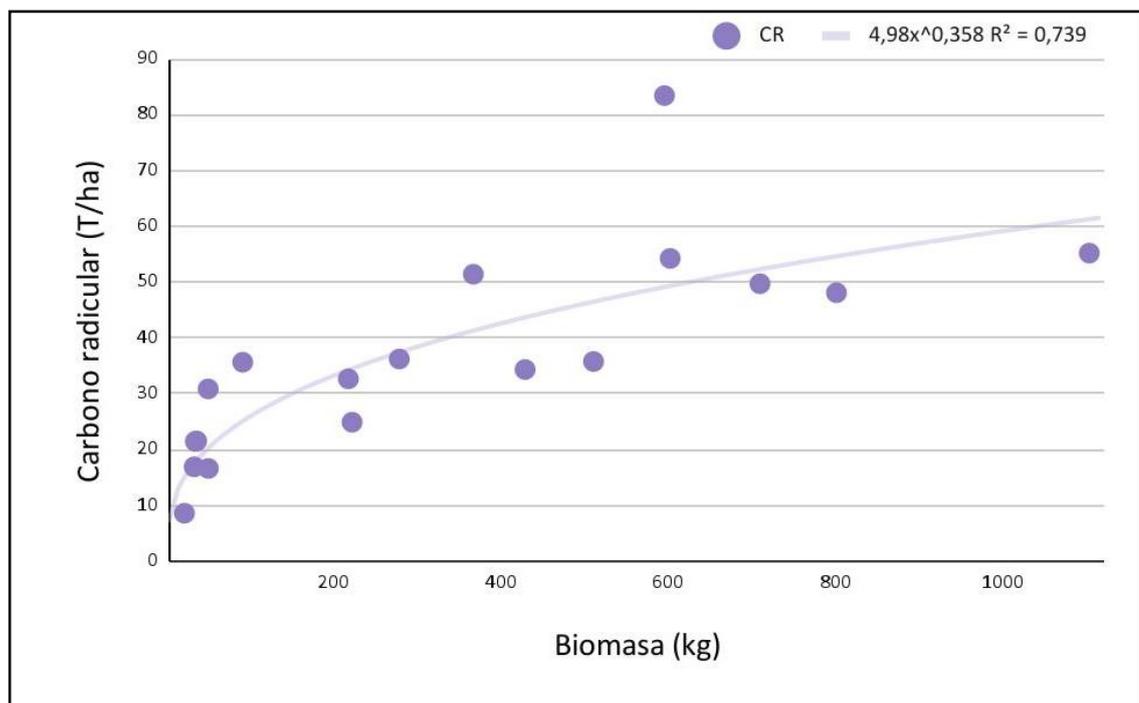


Figura 20: Regresión simple no lineal entre biomasa (kg) y carbono radicular (t/ha).

De esta forma con las ecuaciones obtenidas, en el software QGIS, a partir la calculadora ráster se generaron dos capas para cada año analizado, una correspondiente a carbono aéreo y otra a carbono radicular, utilizando el valor de biomasa predicho para cada año en el software infostat a partir del análisis de componentes principales. Se realizó luego la suma de ambas capas para obtener una capa donde cada pixel representa el carbono total en t/ha (Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27).

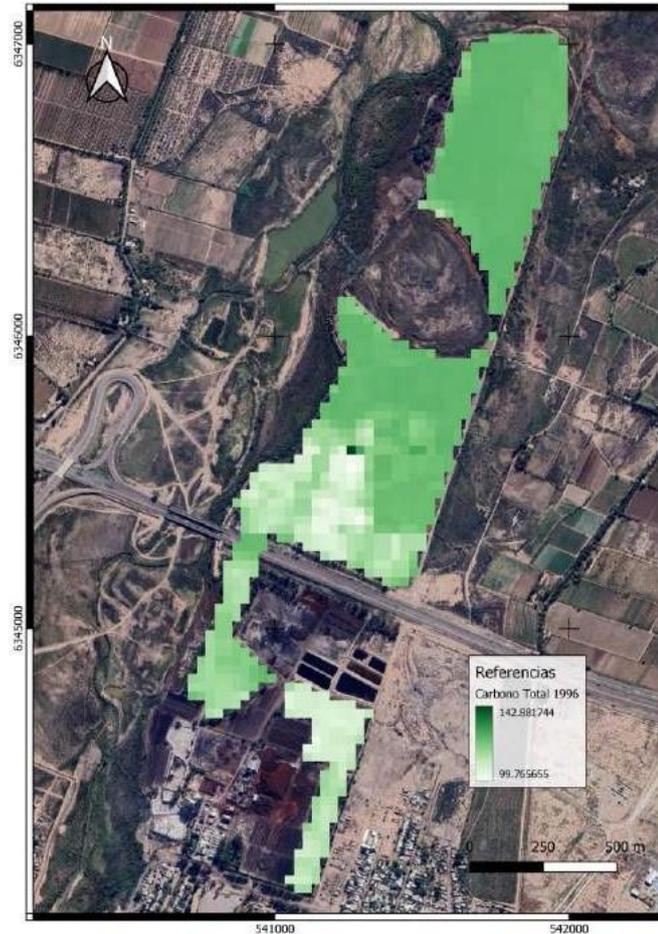


Figura 21: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 1996.
Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

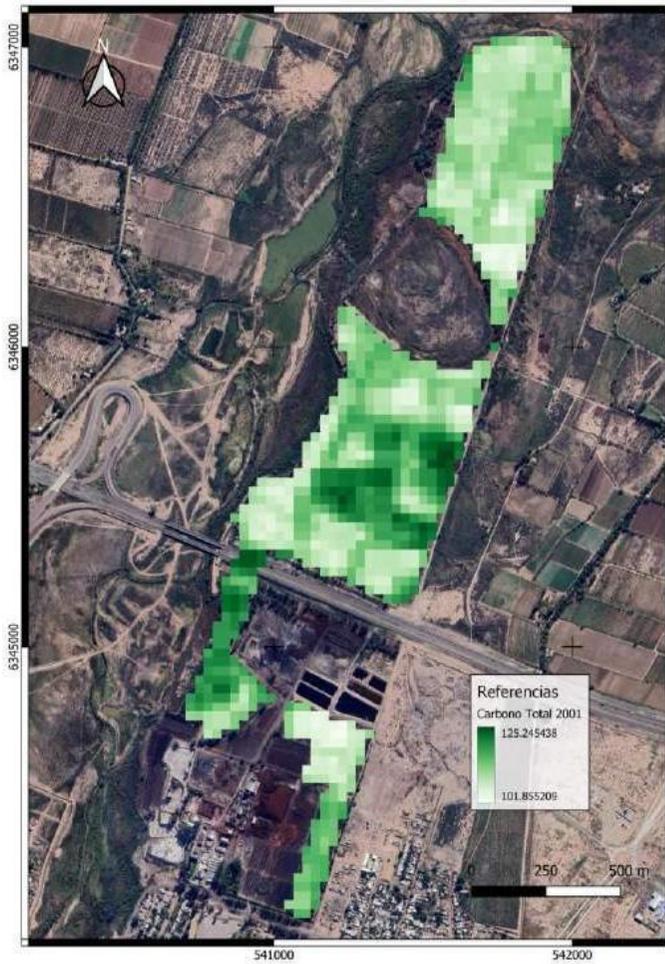


Figura 22: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2001.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

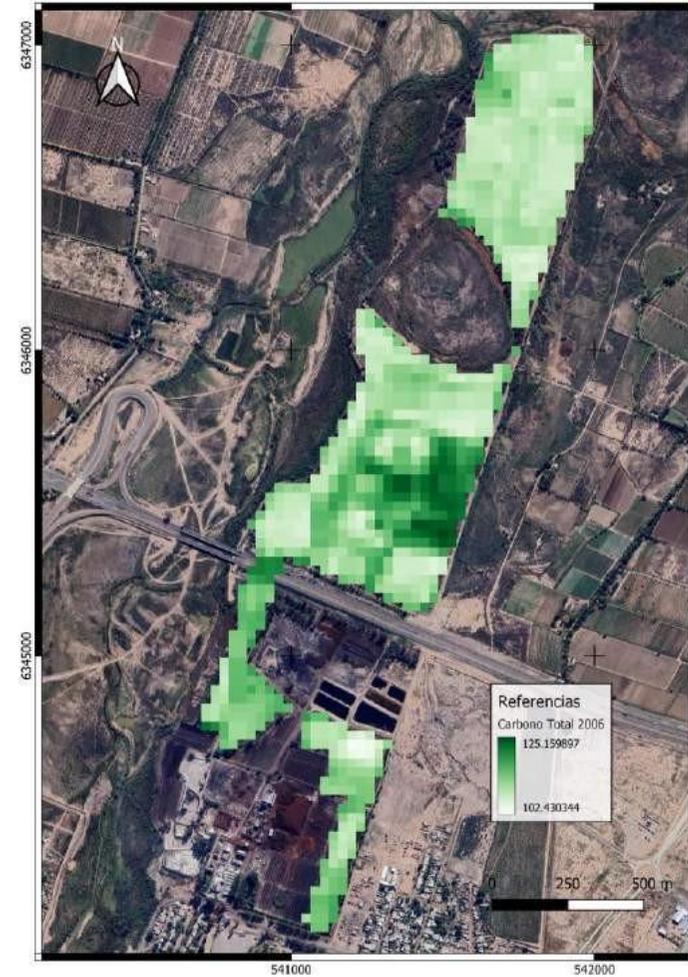


Figura 23: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2006.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

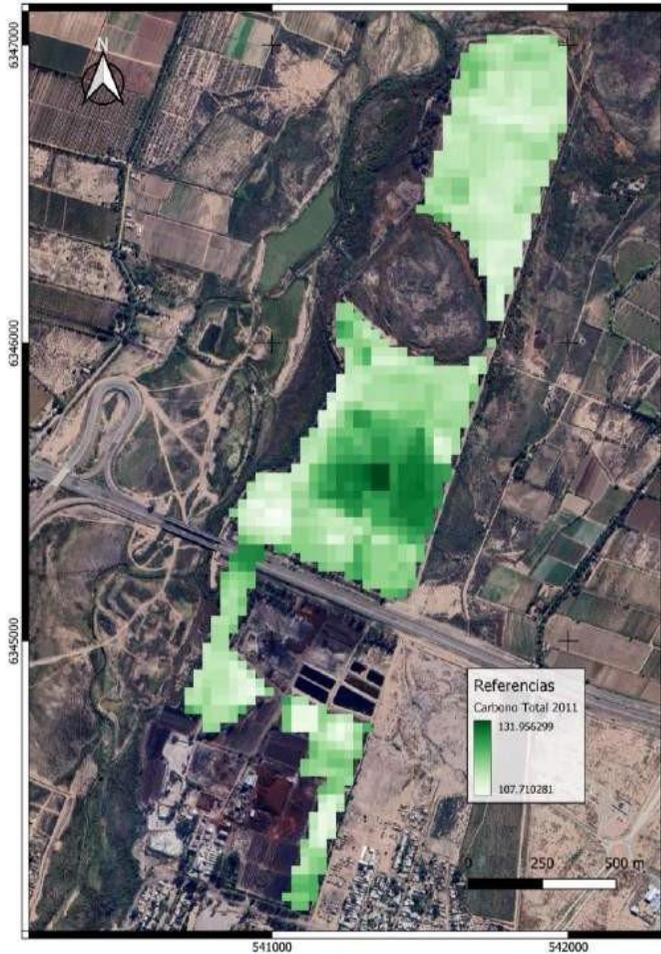


Figura 24: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2011.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

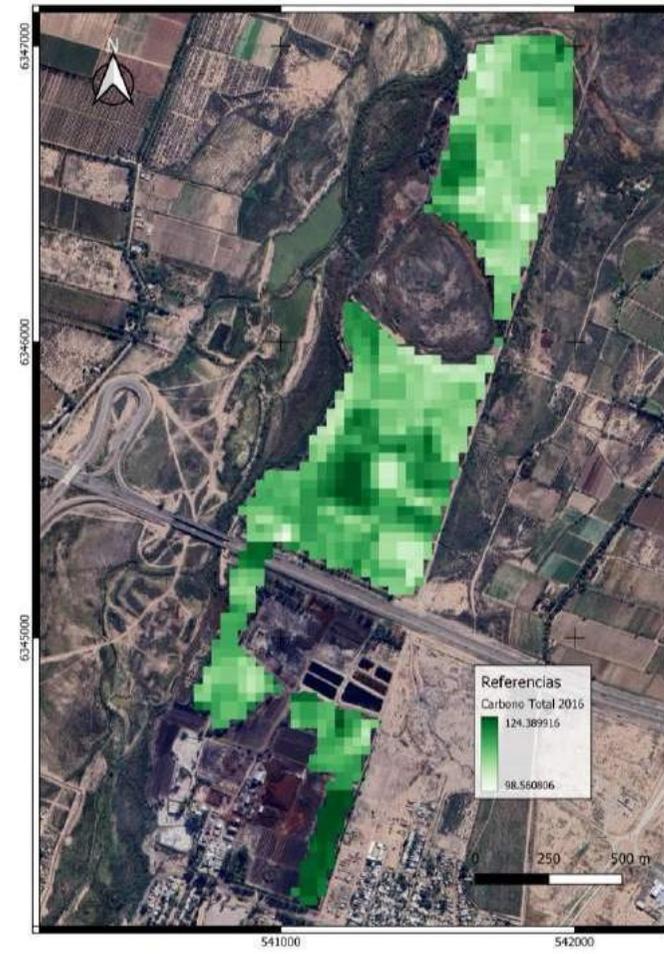


Figura 25: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2016.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

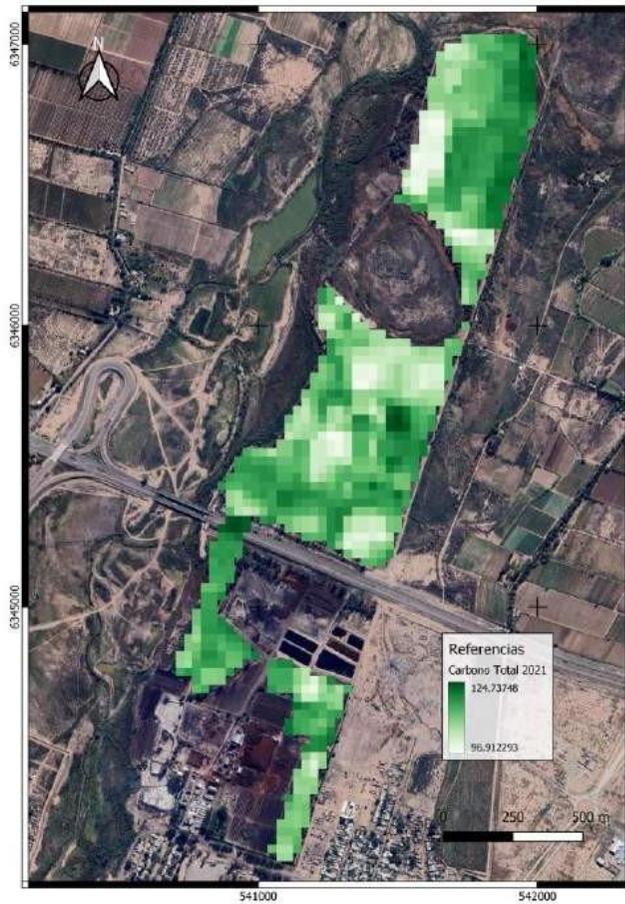


Figura 26: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2021.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

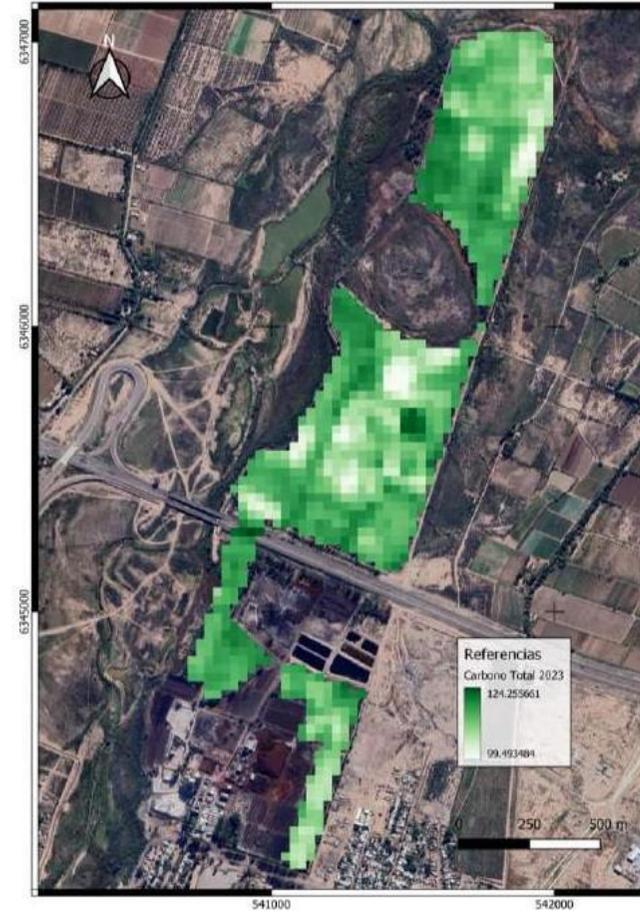


Figura 27: Estimación de carbono total (t/ha) para toda el área de estudio en el año 2023.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

Se presentan a continuación los resultados de la aplicación de estadística descriptiva en QGIS en cada capa ráster de estimación de carbono total (Tabla 14).

Tabla 14: Estadística descriptiva CT

Año	CT medio (t/ha)	D.E.
1996	119,55	6,53
2001	112,70	5,04
2006	112,13	4,35
2011	117,47	4,67
2016	113,59	4,97
2021	112,36	6,00
2023	113,67	4,60

A partir de estos datos se creó el gráfico de tasas de almacenamiento de carbono en biomasa (Figura 28).

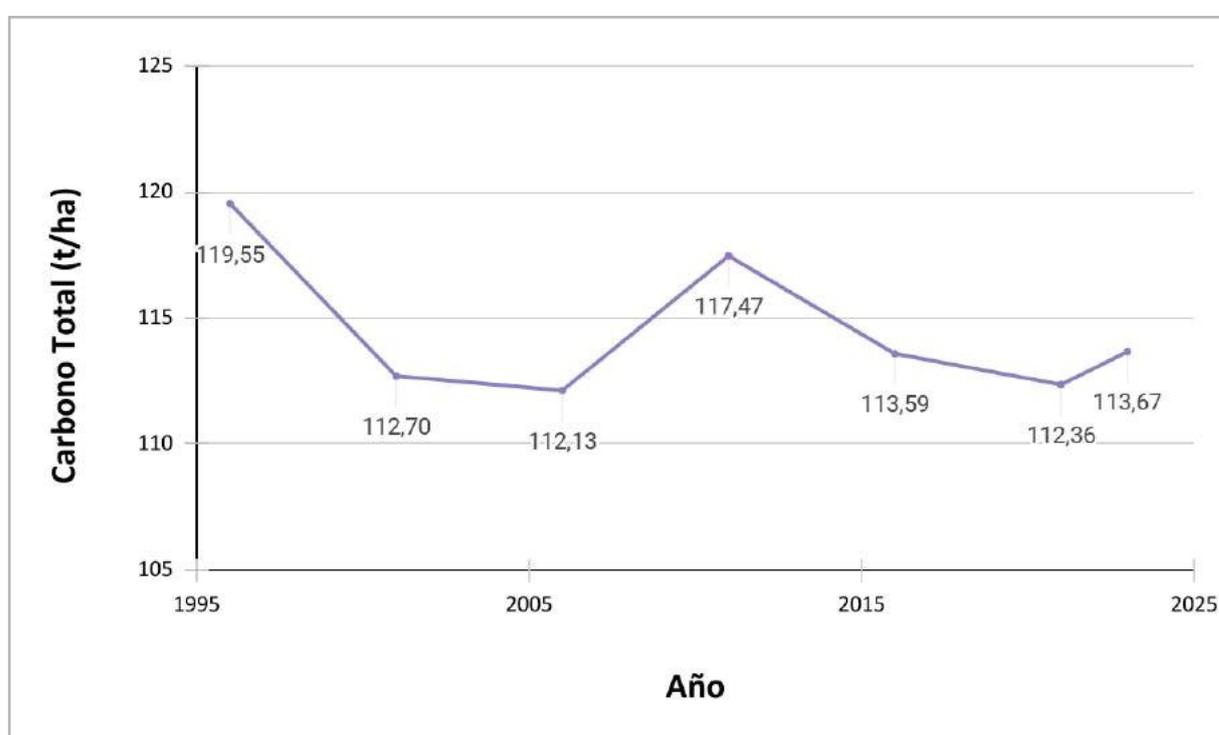


Figura 28: Tasa de almacenamiento de carbono en biomasa (1996-2023).

En el gráfico puede observarse cómo ha ido variando con los años el contenido de carbono total en biomasa, sin embargo, esta variación no ha sido muy pronunciada. El primer año de plantación es el que presenta mayor contenido de CT (119,55 t/ha) y el año 2006 es el que menor contenido de CT presentó (112,13 t/ha).

4.3. Almacenamiento de carbono orgánico en suelo

En la Figura 29 se muestran los puntos de muestreo de suelos.

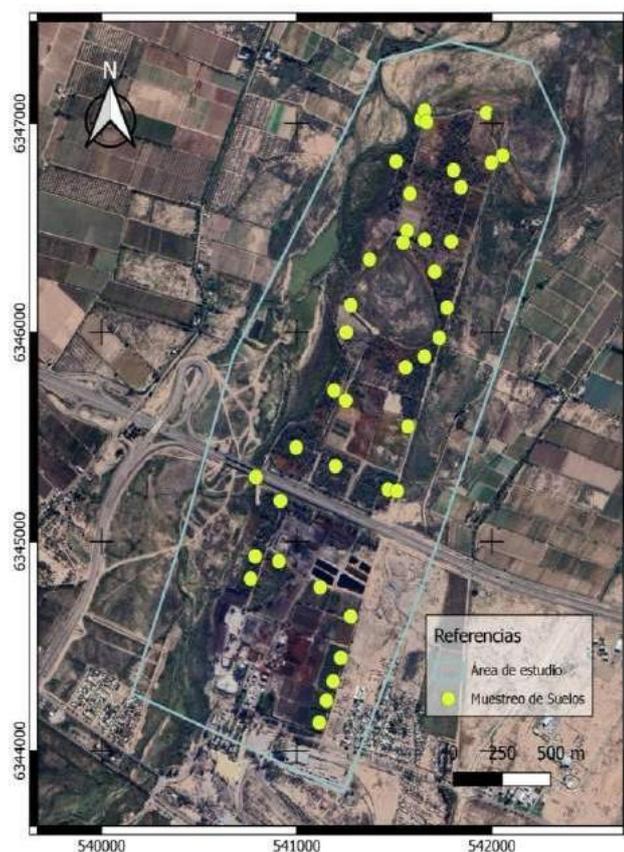


Figura 29: Mapa puntos de muestreo de suelos.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

En la Tabla 15 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos respecto al porcentaje de materia orgánica presente en cada muestra de suelo. Además, se muestra cuánto de ese porcentaje corresponde a carbono orgánico.

Tabla 15: Resultados obtenidos en laboratorio y % de COS presente en las muestras.

Muestra	M.O. (g%g)	COS (g%g)
1	5,12	2,9696
2	1,82	1,0556
3	43,52	25,2416
6	5,6	3,248
8	3,03	1,7574
9	1,22	0,7076
10	2,48	1,4384
11	2,24	1,2992
12	1,22	0,7076
13	17	9,86
14	0,62	0,3596
15	3,92	2,2736

16	1,76	1,0208
17	0,07	0,0406
19	2,02	1,1716
21	5,46	3,1668
22	17,12	9,9296
23	1,79	1,0382
24	8,07	4,6806
25	31,31	18,1598
26	0,34	0,1972
27	1,44	0,8352
28	1,83	1,0614
29	0,67	0,3886
30	1,34	0,7772
31	4,15	2,407
32	1,34	0,7772
33	18,93	10,9794
34	4,3	2,494
35	0,13	0,0754
36	8,96	5,1968
37	4,71	2,7318
38	13,11	7,6038
39	12,48	7,2384
40	2,88	1,6704
41	2,92	1,6936
42	1,95	1,131
43	2,29	1,3282
44	1,25	0,725
45	4,03	2,3374

En general se puede observar un elevado contenido de materia orgánica, y por consiguiente de carbono orgánico. Esto coincide con lo obtenido por Echevarría (2009), donde la primera capa de suelo (0-40 cm) presentó porcentajes de materia orgánica de 2% a 4%, siendo un alto porcentaje comparado con los suelos típicos de Mendoza que presentan entre 0,1% y 0,5%. Esto se debe entre otras causas, al depósito continuo de

residuos orgánicos en solución coloidal que aporta el riego-efluente.

Sin embargo, es importante destacar que en el período estival 2022/2023 se obtuvieron valores máximos de hasta 43% de materia orgánica, superando ampliamente lo obtenido por Echevarría (2009).

Análisis estadístico descriptivo

Se realizó el análisis de las medidas de resumen de la variable “carbono orgánico en suelo” (COS %) (Tabla 16).

Tabla 16: Estadística descriptiva de la variable COS (n=40)

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo	Mediana
COS (%)	3,54	5,13	0,04	25,24	1,55

4.4. Variabilidad espacial de COS

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos de volumen de sedimentación en mililitros % gramo (Vol Sed), la densidad aparente (DAp) estimada y el contenido de carbono orgánico en suelo convertido a t/ha (COS).

Tabla 17: Cálculo de COS (t/ha).

Muestra	Vol Sed (ml%g)	DAparente promedio (t/m3)	COS (tC ha-1)
33	180	1,031	339,56
38	172	1,080	246,33
3	168	1,104	836,27
25	164	1,129	614,99
39	160	1,153	250,45
37	156	1,178	96,53
36	152	1,202	187,45
13	148	1,227	362,89
1	144	1,251	111,48
24	144	1,251	175,70
41	144	1,251	63,58
45	136	1,300	91,18
11	132	1,325	51,63
15	132	1,325	90,36
21	132	1,325	125,86
23	132	1,325	41,26

6	128	1,349	131,47
26	128	1,349	7,98
40	128	1,349	67,61
8	124	1,374	72,43
16	124	1,374	42,07
27	124	1,374	34,42
28	120	1,398	44,52
34	120	1,398	104,62
31	116	1,423	102,73
9	112	1,447	30,72
22	140	1,276	380,04
30	112	1,447	33,74
14	108	1,472	15,88
43	108	1,472	58,64
10	104	1,496	64,56
12	104	1,496	31,76
19	104	1,496	52,59
44	104	1,496	32,54
2	100	1,521	48,16
29	100	1,521	17,73
35	96	1,545	3,50
17	84	1,619	1,97
32	80	1,643	38,31
42	112	1,447	49,10

A partir de los datos obtenidos de COS en t/ha, se realizó una interpolación mediante el método geoestadístico Kriging ordinario en QGIS (Figura 30). Para visualizar los parámetros de la interpolación ver [Anexo IV](#).



Figura 30: Interpolación COS (t/ha).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

Estadística descriptiva

Se realizó el análisis de las medidas de resumen de la variable “carbono orgánico en suelo” (t/ha) (Tabla 18).

Tabla 18: Estadística descriptiva del mapa de interpolación COS (t/ha).

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
COS (t/ha)	121,41	31,5	81,26	211,93

4.4.1. Comparación respecto al carbono regional

Con el objetivo de comparar los valores obtenidos en el apartado anterior con el carbono regional, el cual se considera como valor base se utilizó los datos aportados por el INTA de COS en t/ha con una profundidad de muestreo de 0 a 30 cm (Gaitán et al., 2023) (Figura 31) y luego se realizó la comparación de estos últimos en valor absoluto, medido como $COS_{DERVINS A} - COS_{INTA}$ (Figura 32) y relativo, calculado como $[(COS_{DERVINS A} - COS_{INTA}) / COS_{INTA}] * 100$ (Figura 33).



Figura 31: Interpolación COS (t/ha) elaborado a partir del mapa INTA 2023.
 Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

Estadística descriptiva

Se realizó el análisis de las medidas de resumen de la variable “carbono orgánico en suelo regional” (t/ha) (Tabla 19).

Tabla 19: Estadística descriptiva del mapa de interpolación COS (t/ha) elaborado a partir del mapa INTA 2023.

Variable	Media	D.E.	Mínimo	Máximo
COS (t/ha)	35,6	5,1	25,9	42,44



Figura 32: Variación absoluta COS (t/ha).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

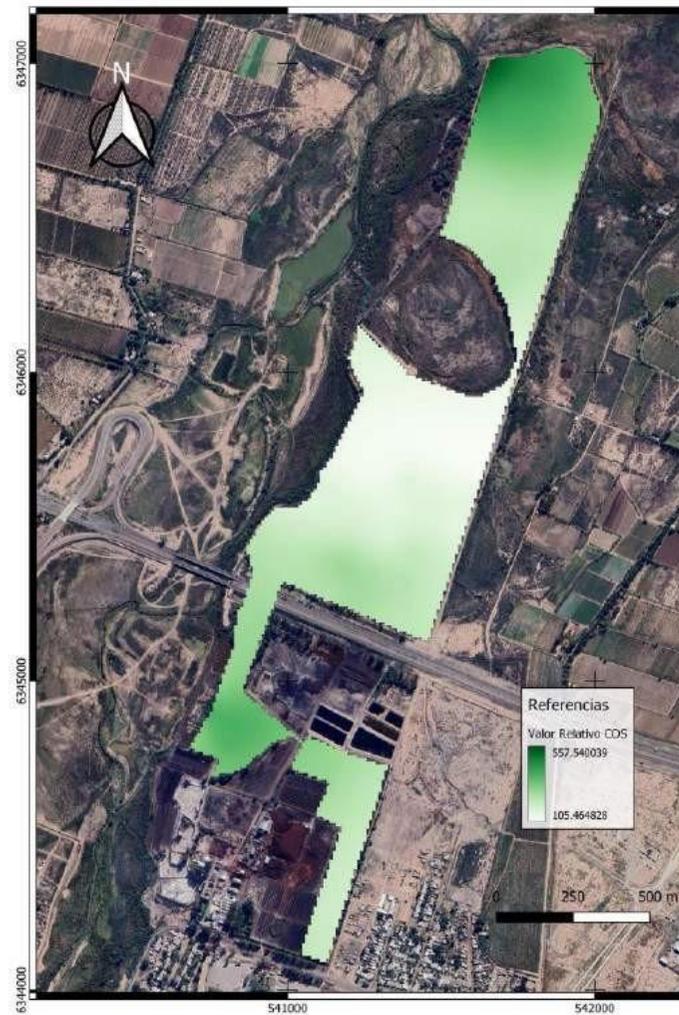


Figura 33: Variación relativa COS.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

Puede observarse una gran diferencia, ya que la media de COS regional es de 35,6 t/ha mientras que la media de COS estimado a partir del muestreo es de 121,41 t/ha. Por lo tanto, hay un aumento de COS luego del establecimiento de la plantación lo cual coincide con lo obtenido por Gyenge et al. (2022), quienes establecen que se observa una tendencia a que las reservas promedio de COS varíe en el sentido: forestaciones (plantación) > línea base > uso alternativo (Figura 34). Sin embargo, estos autores denotan pequeña diferencia de COS entre la línea de base y las forestaciones, en contraposición con lo obtenido en el área de estudio de este trabajo donde se ve un marcado aumento a partir del manejo.

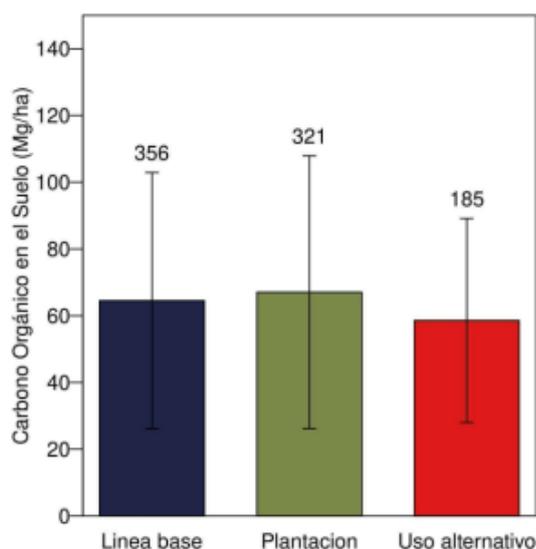


Figura 34: Valores promedio de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm de suelo en los tres uso de suelos considerados por Gyenge et al.

Fuente: Gyenge et al. 2022

Además, para la ecorregión del Monte, Gyenge et al. (2022) obtienen una media de línea de base (vegetación natural o de referencia) de 43,5 t/ha, cercana a la obtenida para el área de estudio en condiciones de referencia. Sin embargo, estiman una media de 47,07 t/ha para las plantaciones forestales, la cual es mucho menor a la media obtenida a partir del muestreo en el área de estudio. Cabe resaltar que las estimaciones de Gyenge et al. (2022) para la ecorregión del Monte en plantaciones estudiadas fueron específicamente para *Populus spp.*

Gyenge et al. (2022) en otras regiones de Argentina, estimaron que las plantaciones de *Eucalyptus spp.* no afectan la cantidad de COS hasta valores de alrededor de 70 t/ha de COS de la Línea Base, mostrando menores valores de COS al superar dicho valor, lo cual no coincide con lo obtenido ya que la línea de base presenta valores menores a las 70 t/ha y a pesar de ello se puede ver claramente un gran aumento de COS a partir de la plantación de *Eucalyptus camaldulensis*. Esta diferencia se debe a la permanente incorporación de residuos orgánicos en solución coloidal a partir del riego-efluente, cuyas características se mencionaron en el apartado del área de estudio.

Con el objetivo de visualizar el carbono medio presente en el ecosistema (carbono aéreo, carbono radicular y carbono orgánico en suelo) para el año 2023 ver el [Anexo V](#).

4.5. Determinación espacial de la provisión relativa de los servicios ecosistémicos

En la Tabla 20 se presenta la media aritmética de todas las ponderaciones obtenidas a partir de la consulta al panel de expertos.

Tabla 20: Matriz de valoración

		FUNCIONES ECOSISTÉMICAS	
		Almacenamiento de carbono en biomasa	Almacenamiento de carbono en suelo
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	Regulación del clima	0,825	0,775
	Producción potencial de cultivos	0,7	0,875
	Calidad del aire	0,8	0,625
	Producción forestal	0,775	0,725
	Potencial de recreación	0,425	0,25
	Actividad biológica del suelo/ciclo de los nutrientes/fertilidad	0,75	0,925

Puede observarse como, según los expertos, la FE de almacenamiento de carbono en biomasa aporta principalmente al SE de regulación del clima y en segundo lugar a la calidad del aire. Teruya (2015), aplicando la misma metodología de evaluación, obtuvo valores similares para la FE de almacenamiento de carbono en biomasa en Tunuyán, por ejemplo, el aporte del mismo para el SE de producción potencial de cultivos fue de 0,7 o el aporte a la regulación del clima con un valor de 0,65. Sin embargo obtuvo valores muy superiores para el SE de potencial de recreación (valoración media= 0,77). No obstante, es importante tener en cuenta que el ecosistema estudiado por Teruya (2015), cuenca de Arroyo Grande (Tunuyan, Mendoza), es muy diferente al del presente documento, ya que presenta geomorfología de piedemonte, de mayor altitud, suelos sueltos y pedregosos.

Por otra parte, la FE de almacenamiento de carbono en suelo aporta en primer lugar a la actividad biológica del suelo o fertilidad (valoración media= 0,925) y en segundo lugar a la producción potencial de cultivos (valoración media= 0,875). Esto coincide con lo obtenido por Teruya (2015), quien consiguió un aporte al SE de producción potencial de cultivos (valoración media= 0,8) y el menor valor fue el aportado a la regulación del clima (valoración media=0,16).

Es importante destacar que la mayoría de las ponderaciones estuvieron por encima del valor 0,5, a excepción del aporte al servicio ecosistémico de potencial de recreación.

En las Figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40, se muestran los resultados obtenidos respecto a la provisión relativa de los servicios ecosistémicos para el área de estudio. En las mismas puede observarse que los mayores valores de la provisión relativa de todos los servicios ecosistémicos se encuentran principalmente al noroeste del área de estudio. Sin embargo, también se observan elevados valores al suroeste. También se puede visualizar que el SE de potencial de recreación presenta valores bajos para toda el área de estudio, esto se debe al aporte relativo bajo que se obtuvo en la Tabla 19 para este servicio.

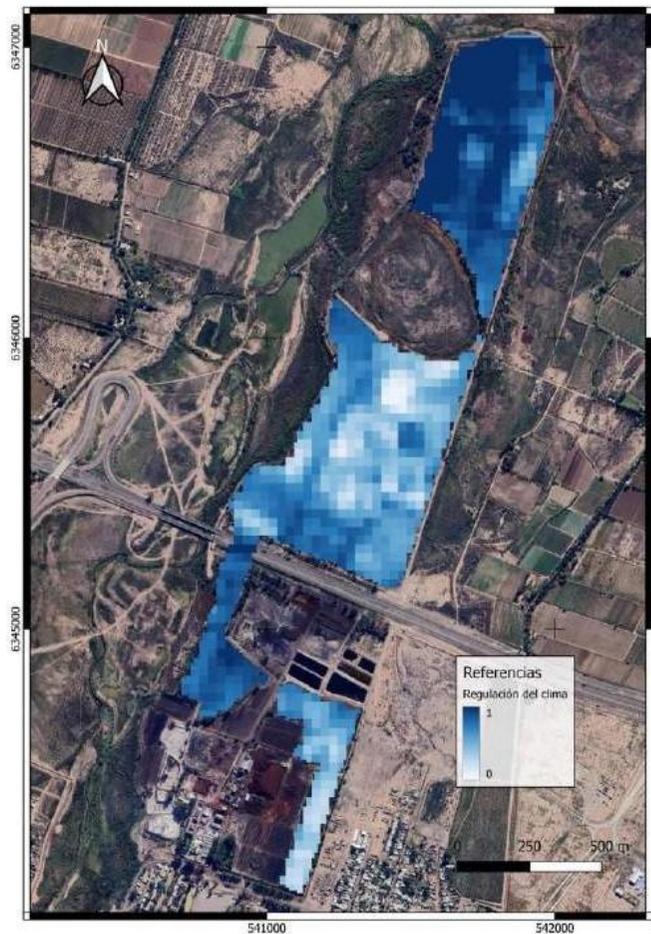


Figura 35: Provisión relativa del SE regulación del clima en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

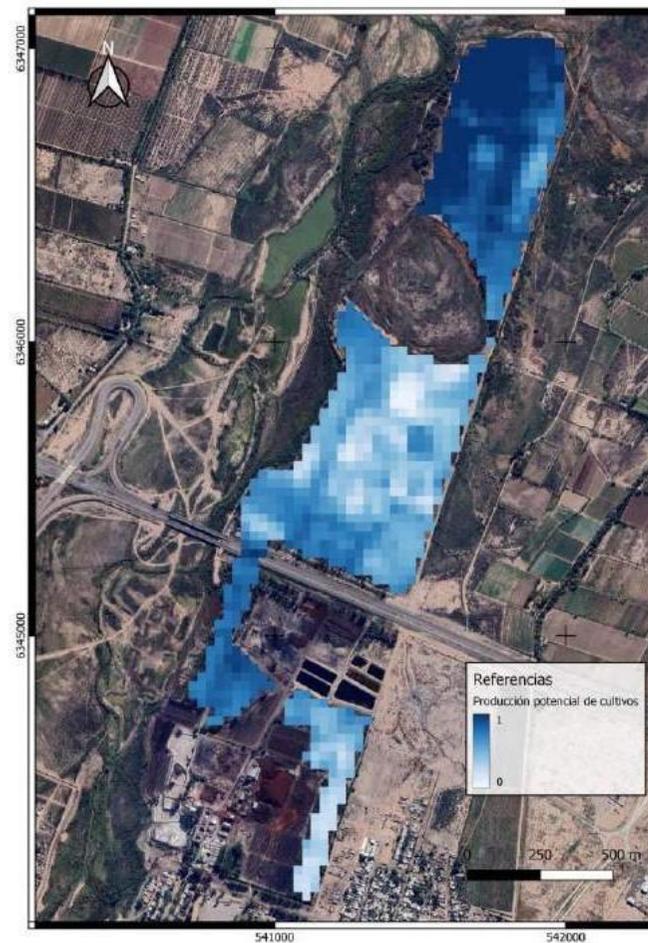


Figura 36: Provisión relativa del SE producción potencial de cultivos en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

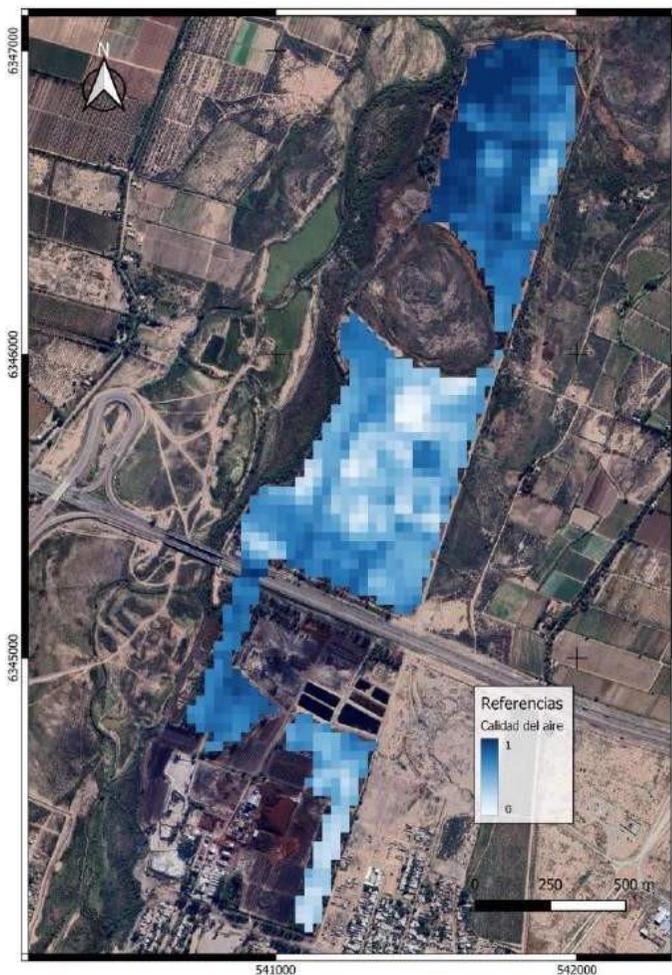


Figura 37: Provisión relativa del SE calidad del aire en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

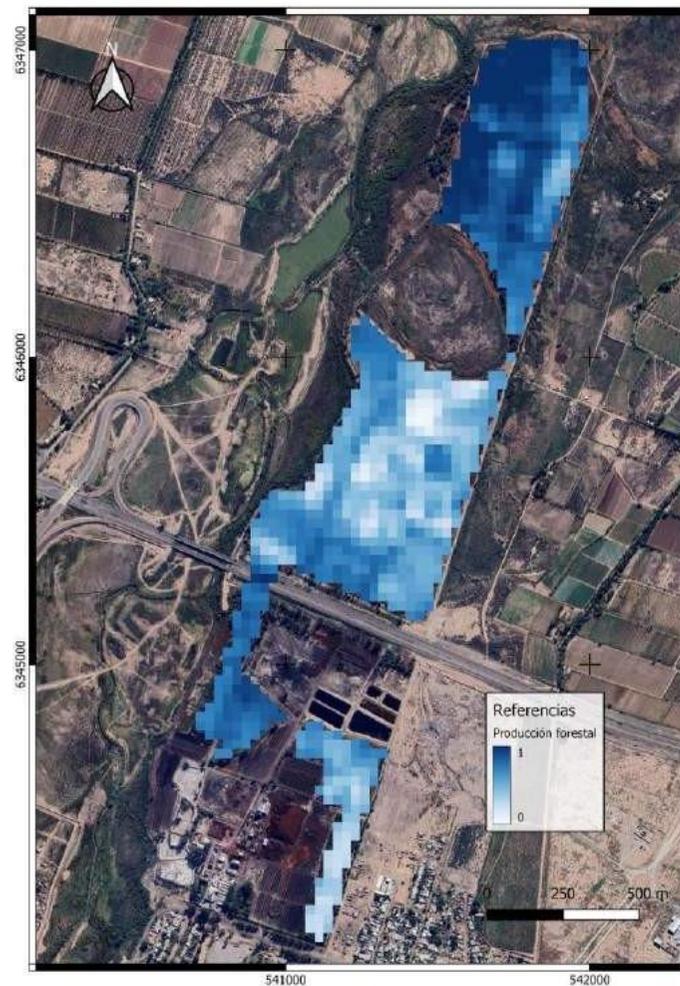


Figura 38: Provisión relativa del SE producción forestal en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

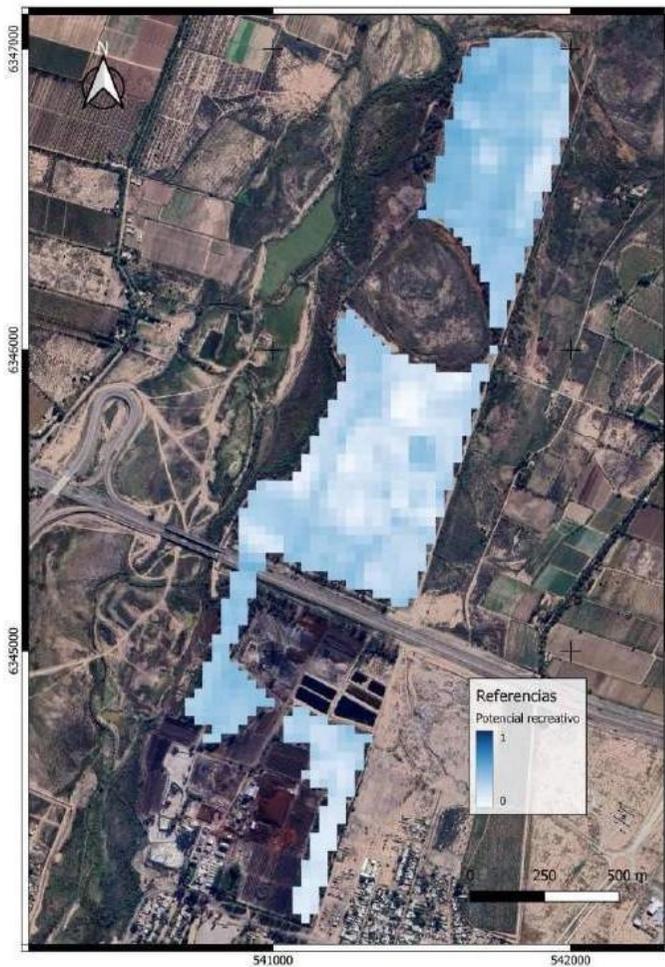


Figura 39: Provisión relativa del SE potencial de recreación en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

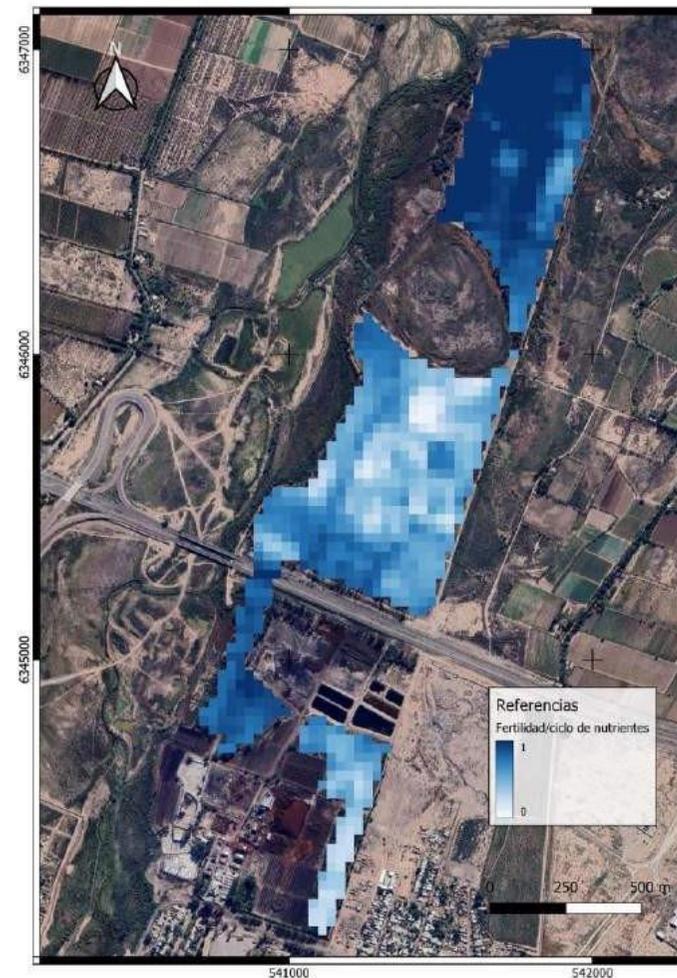


Figura 40: Provisión relativa del SE ciclo de nutrientes en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

5. Conclusiones

El presente trabajo resultó en la estimación del carbono almacenado en la plantación de *Eucalyptus camaldulensis* de la empresa Derivados Vínicos S.A., tanto en suelo como en biomasa aérea y radicular, y en la evaluación de la provisión relativa de la función ecosistémica de almacenamiento de carbono a distintos servicios ecosistémicos.

La relación establecida entre la biomasa y los índices espectrales calculados permitió estimar el carbono radicular, siendo la media 36,541 t/ha, y el carbono aéreo, cuya media es de 77,123 t/ha, y a partir de ellos el carbono total con una media de 113,66 t/ha para el año de estudio. Se obtuvo también, una comparación a lo largo del tiempo del contenido de carbono total a partir del primer año de plantación y hasta la actualidad. Esto permitió visualizar la tasa de almacenamiento de carbono y cómo ha ido variando el contenido en el tiempo, siendo esta variabilidad baja. Los menores valores se dan en los años 2006 y 2021 y esto puede deberse a la extracción de madera realizada en estos años, y los picos de 2011 y 2023 pueden relacionarse con replantaciones que realizó la empresa. En el año 1996 también se observa una media elevada (119,55 t/ha) y esto se debe a que el mismo fue el primer año de plantación y los forestales se encontraban en óptimas condiciones fitosanitarias.

Respecto al almacenamiento de carbono orgánico en suelo, los resultados obtenidos demuestran claramente cómo la plantación de *Eucalyptus camaldulensis* ha aumentado el contenido del mismo en área de estudio (121,41 t/ha), respecto a los valores del monte nativo (35,6 t/ha). Esto quiere decir que el ecosistema que inicialmente tuvo como función principal servir de receptor de efluentes, además cumple la función de almacenaje de carbono. Los resultados obtenidos no coinciden con las determinaciones de otros autores quienes establecen que las plantaciones de eucaliptos en particular no afectan la cantidad de COS hasta valores cercanos a 70 t/ha de COS de la línea base, mostrando menores valores de COS al superar dicho valor. Por último, cabe aclarar que el objetivo de este trabajo no fue evaluar el aporte de cada una de las fuentes de carbono.

Es importante resaltar que el área de estudio presenta gran variabilidad respecto a la densidad de plantación, a las edades y al estado fitosanitario de los árboles. En algunos cuarteles también se observó diferente vegetación o mayor predominancia de otras especies. Todos estos factores modifican el establecimiento y desarrollo de los forestales con lo cual se ven afectadas las funciones ecosistémicas de los mismos.

Se pudo observar el aporte relativo de las funciones ecosistémicas de almacenamiento de carbono en biomasa y en suelo a los distintos servicios ecosistémicos evaluados, presentándose mayor aporte en el noroeste del área de estudio y en segundo lugar en el suroeste. Esto puede deberse a que son áreas más cercanas al cauce del río Mendoza o a una freática más cercana a la superficie. Por otro lado, se obtuvo a partir de la consulta a expertos, que la función ecosistémica de almacenamiento de carbono en biomasa aporta en mayor medida al servicio ecosistémico de regulación del clima, y la función ecosistémica de almacenamiento de carbono en suelo aporta más a los servicios actividad biológica del suelo, ciclaje de nutrientes y fertilidad.

Resultaría interesante realizar en estudios posteriores una estimación del contenido de carbono en el mantillo, ya que se observó gran variabilidad y es una estructura más del ecosistema que aporta a la función ecosistémica de almacenamiento de carbono.

El presente estudio contribuye al conocimiento de la dinámica del carbono en ecosistemas modificados por los humanos, más específicamente en la modificación del uso de suelo

a partir de plantaciones forestales. Esto resulta clave a la hora de tomar decisiones relacionadas a acciones que puedan mitigar el efecto del cambio climático.

6. Bibliografía

Bannari A., Morin D., Bonn F. & Huete A. R. (1995) *A review of vegetation indices*, Remote Sensing Reviews, 13:1-2, 95-120, DOI: 10.1080/02757259509532298

Barral, M. P. (2016). *Tutorial para el mapeo de funciones ecosistémicas y servicios ecosistémicos*. Unidad integrada Balcarce (EEA INTA Balcarce - Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata)

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión (2020). Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Echevarría, S. (2009). *Evaluación de suelo y biomasa en bosque de Eucalyptus camaldulensis en Palmira, Mendoza*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cuyo] <https://bibliotecas.uncuyo.edu.ar/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos (GTIS). (2015). *Status of the World's Soil Resources*. Roma: s.n

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia

Gaitán, J.J., Wingeyer, A.B., Peri, P., Moavro, E., Peralta, G., Fritz, F., Berhongaray, G., ...Sasal, M.C. (2023). *Mapa de almacenamiento de C en los suelos de la República Argentina*. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (Aapresid), Consorcio Regional de Experimentación Agrícola (CREA), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina

Gamarra Ramos, J. (2001). *Estimación del contenido de carbono en plantaciones de Eucalyptus globulus labill, en Junin, Perú*. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.

Gyenge J., Gatica G., Sandoval M., Lupi A. M., y Gaute M. (2022). *REPORTE NACIONAL: Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Ministerio de economía, Argentina.

Gonda, C. (2022). *Mercados de carbono. Explicaciones y términos básicos para desterrar confusiones. Glosario*. Fundación Ambiente y Recursos Naturales. Argentina.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

- Lal, R. (2005). *Forest Soils and Carbon Sequestration*. Forest Ecology and Management, 220: 242- 258.
- Laterra, P., Jobbágy, E.G., & Paruelo, J. M. (2011). *Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Laterra, P., P. Barral, A. Carmona, & L. Nahuelhual. (2015). *ECOSER: protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial*. Ediciones INTA, La Pampa-San Luis, Argentina.
- Lavín, F. V., Cedra, A., & Suaza, S. O. (2018). *Valoración Económica del Medio Ambiente*. Universidad del Desarrollo, Concepción, Chile.
- Ledesma, S. G, Sione, S. M.J, Ozsust, 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.
- Marcelo-Bazán, F. E., Mantilla-Chávez, W., Baselly-Villanueva, J. R., Vargas-Aldave, J. C., Pajares-Gallardo, U. (2023). *Uso potencial de Eucalyptus viminalis Labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú*. Colombia Forestal, 26(1), 64-78.
- Mastrantonio, L.; Perez Valenzuela, R.; Pérez Rodríguez, M.; Dágata, S. (2013) *Evaluación de funciones de pedotransferencia en suelos del Valle de Uco, Mendoza*. Congreso Nacional del Agua CONAGUA. San Juan. Argentina.
- Millennium Ecosystem Assessment [MEA] (2003). *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Naciones Unidas (2011). *Global drylands: A UN system-wide response*. s.l.: United Nations Environment Management Group.
- Nijensohn, L. & Maffei, J. A. (1996). *Estimación de la salinidad y otras características edáficas a través de los volúmenes de sedimentación*. Ciencia del suelo, 14(2), 119-121.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Ordoñez, J. A. B., & Masera, O. (2001). *Captura de carbono ante el cambio climático*. Madera y Bosques, vol. 7, núm. 1, primavera, 2001, pp. 3-12 Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, México.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. y Wagner, F. (Eds.) (2003) *Good Practice Guidance for Land Use*. Land-Use Change and Forestry.

Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madrigal, M. A. (2021). *Estimación de biomasa aérea y carbono con Teledetección en bosques alto-Andinos de Boyacá, Colombia*. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista cartográfica*, (102), 99-123.

P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, & M. Pathak, J. (2019) Portugal Pereira (eds.) *Technical Summary, 2019* In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.

Ramírez López J. L., & Chagna Ávila E. J. (2019) *Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación de Eucalyptus grandis W. Hill*. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. Vol. 7(1):86-97

Regairaz M.C. (2000) *Suelos de Mendoza*. In: Abraham E, Rodríguez Martínez F (eds) *Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región Andina Argentina*. Junta de Gobierno de Andalucía y Universidades y Centros de Investigación de la Región Andina Argentina.

<http://www.cricyt.edu.ar/ladyot/catalogo/cdandes/start.htm>

Schlesinger WH. (1997). *Biogeochemistry, an analysis of global change*. Academic Press, San Diego, California, USA.

Teruya, J. T. (2015). *Evaluación biofísica de servicios ecosistémicos en la cuenca del Arroyo Grande, Tunuyán, Mendoza*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cuyo] <https://bibliotecas.uncuyo.edu.ar/>

Walkley, A, & I Black. (1934). *An examination of the Degtjareff method and a proposed modification of the chromic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method*. *Soil Sci*. 34: 29-38.

7. ANEXOS

ANEXO I: Imágenes área de estudio



Figura 41: Cuartel 1



Figura 42: Cuartel 2



Figura 43: Cuartel 3



Figura 44: Cuartel 4



Figura 45: Cuartel 5



Figura 46: Cuartel 8
Presencia de *Schinus sp.* y
Populus sp.



Figura 47: Cuartel 13/14



Figura 48: Cuartel 19
Exclusivo de *Casuarina* sp.



Figura 49: Cuartel 21

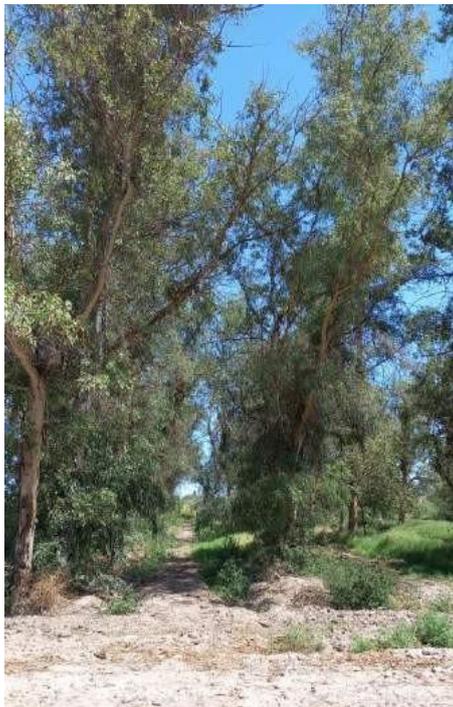


Figura 50: Cuartel 22



Figura 51: Cuarteles 28/29/30



Figura 52: Cuartel 33



Figura 53: Cuartel 34.
Predominancia de *Tamarindus* sp.



Figura 54: Cuartel 37



Figura 55: Cuartel 43



Figura 56: Cuartel 47



Figura 57: Cuartel 48



Figura 58: Cuartel 50



Figura 57: Cuartel 51



Figura 58: Cuartel 53

Figura 60: Cuartel 53



Figura 59: Cuartel 54



Figura 60: Cuartel 58



Figura 62: Cuartel 60



Figura 63: Cuartel 61



Figura 64: Cuartel 62

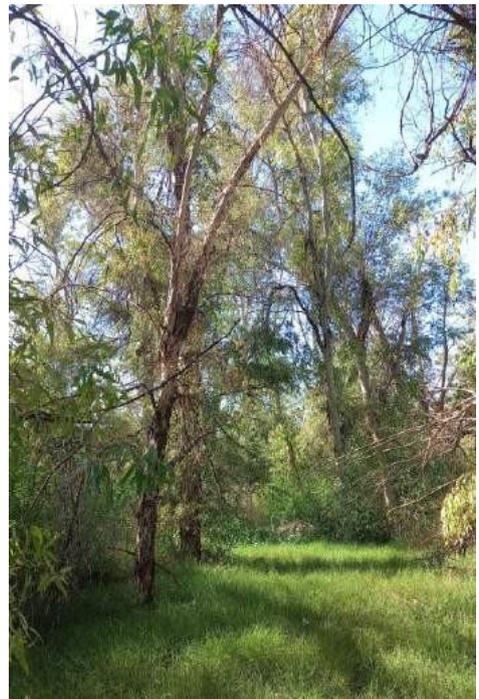


Figura 65: Cuartel 66

ANEXO II: Resultados Echevarría (2009)

Curva de regresión de estimación de biomasa forestal para el área de estudio

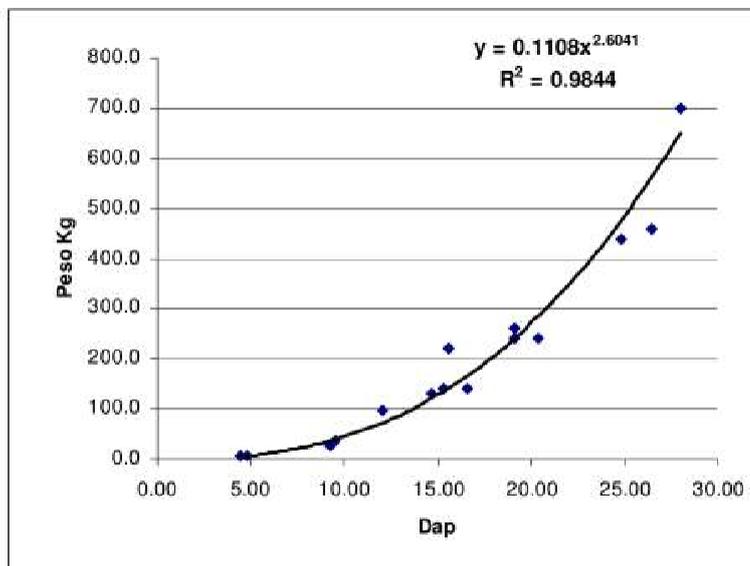


Figura 66: Peso de los árboles en función del DAP y curva de regresión potencial.
Fuente: Santiago Echevarría, 2009.

Estructura diamétrica por cuartel

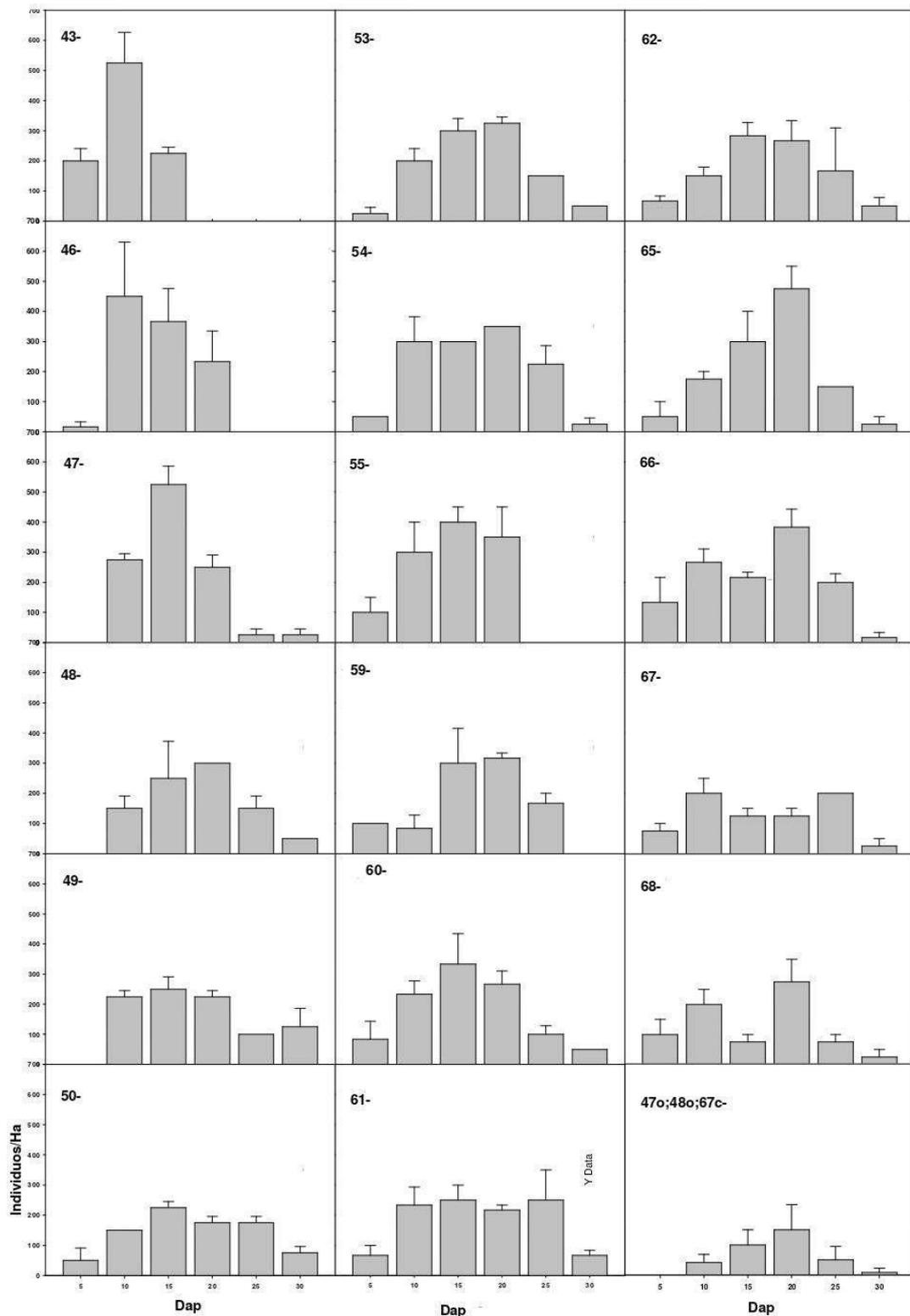


Figura 67: Número medio de individuos/hectárea de cada una de las clases diamétricas y errores estándar.

Fuente: Santiago Echevarría, 2009.

ANEXO III: Mapas Índices de Vegetación 2023

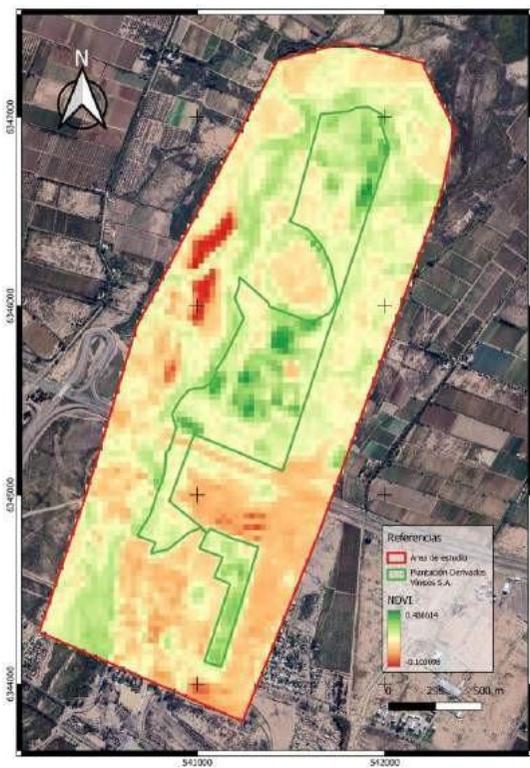


Figura 68: Índice NDVI (2023).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

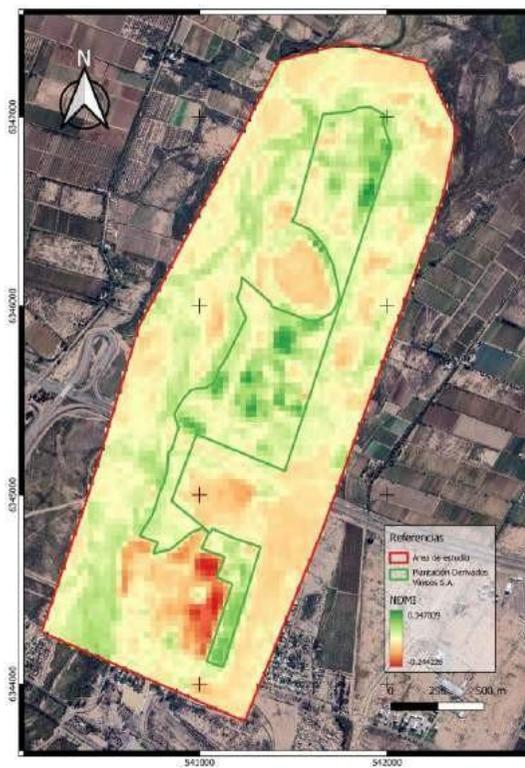


Figura 69: Índice NDMI (2023)

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

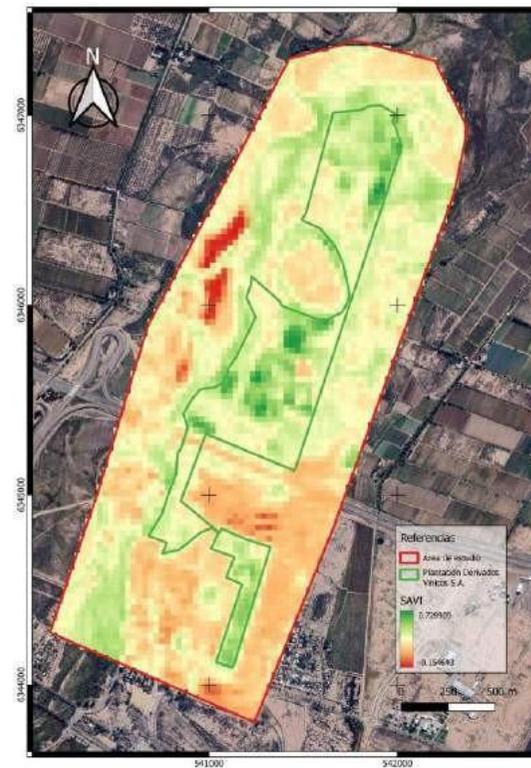


Figura 70: Índice SAVI (2023)

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

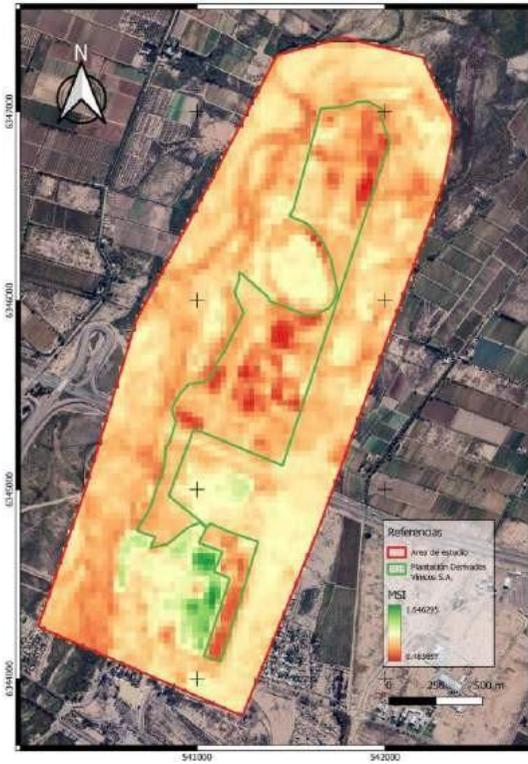


Figura 71: Índice MSI (2023).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

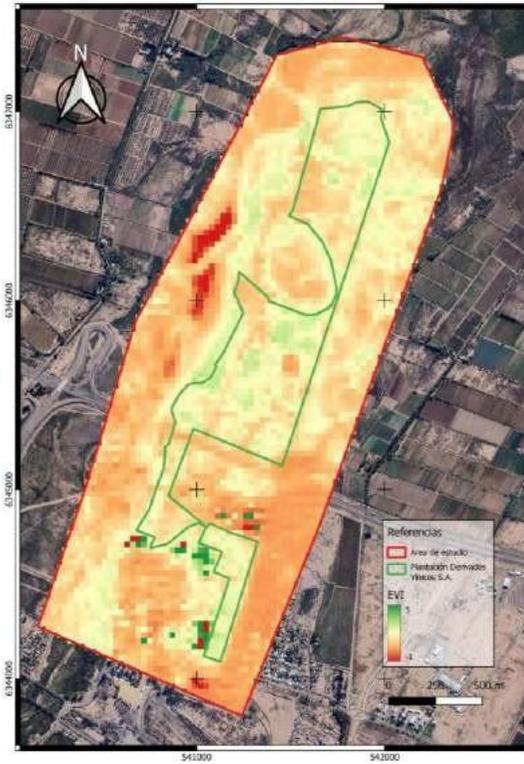


Figura 72: Índice EVI (2023)

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

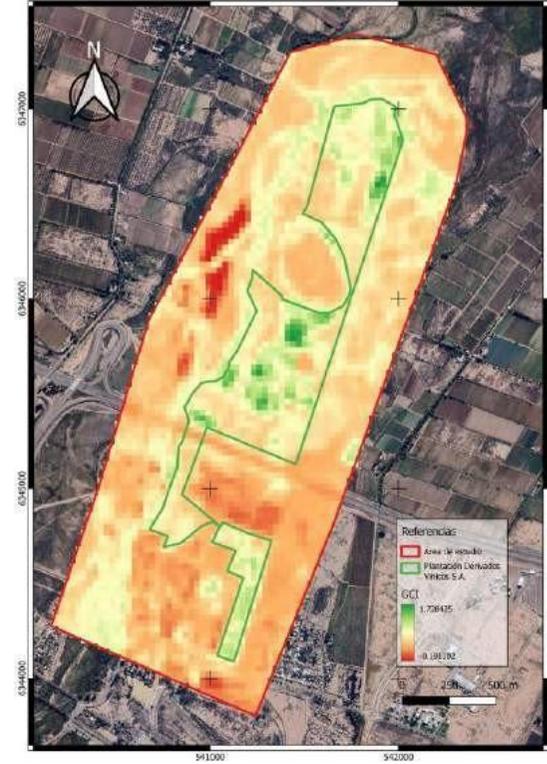


Figura 73: Índice GCI (2023)

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

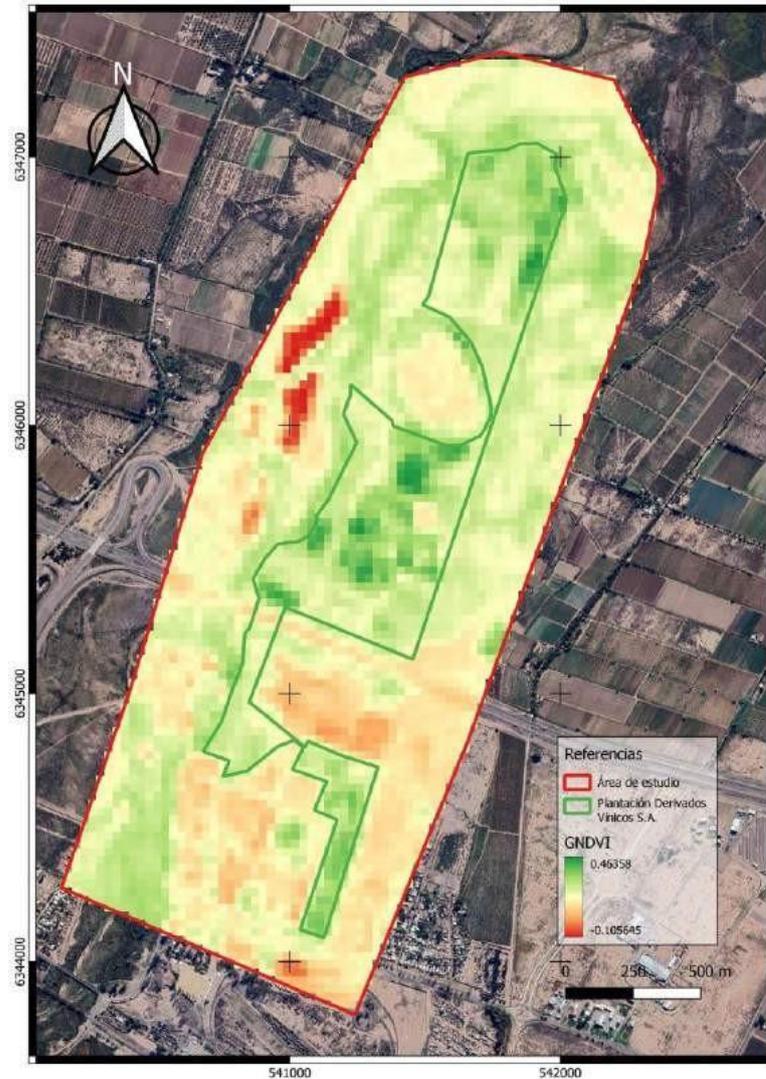


Figura 74: Índice GNDVI (2023).

Fuente: elaboración propia. Fondo cartográfico: Map Data © 2015 Google. SRC WGS 84 / Zona UTM 19S.

ANEXO IV: Interpolaciones

Interpolación COS (t/ha) del área de estudio

Tabla 21: Parámetros de la interpolación de COS (t/ha)

	COS (t/ha)
Modelo	Esférico
Pepita	22387,99
Meseta	37884,661
Alcance	2915,302
R2	0,328
N° de vecinos	30

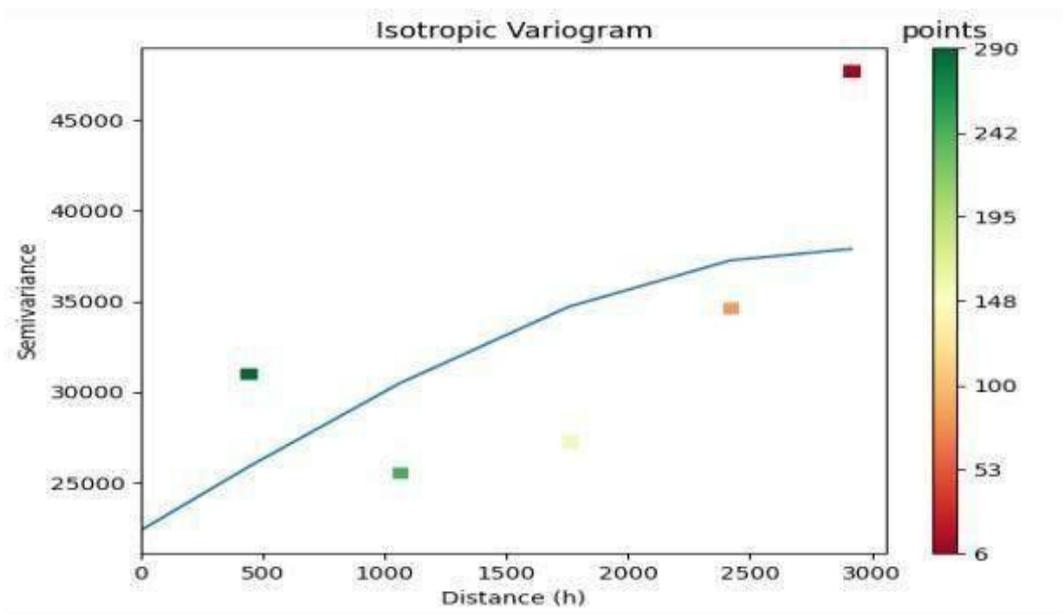


Figura 75: Variograma de interpolación kriging ordinario de COS (t/ha) para el área de estudio.

ANEXO V: Carbono almacenado en el ecosistema

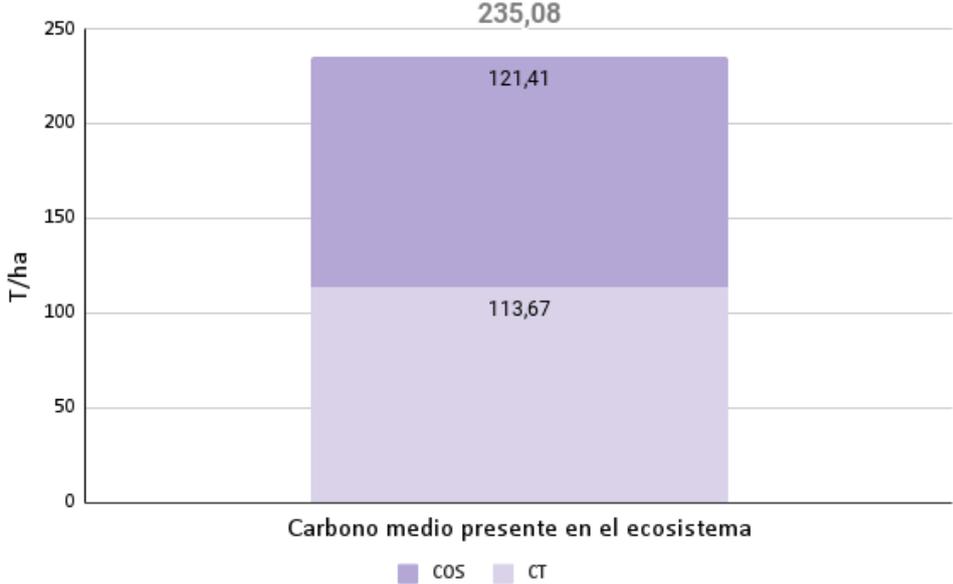


Figura 76: Carbono medio presente en el ecosistema como carbono orgánico en suelo (COS) y carbono total (CT).