

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**AJUSTE DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y
CARBONO EN PLANTACIONES DE *EUCALYPTUS DUNNII***

POR

Eliana FALLER SUÁREZ

Matías MAÑANA DIZ

Pilar OLASO ROURE

**Trabajo final de grado presentado
como uno de los requisitos
para obtener el título de
Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

PAGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directores:

Ing. For. (MSc.) Franco Schinato

Ing. Agr. (MSc.) Sergio Andrés Baietto Álvarez

Tribunal:

Ing. Agr. (PhD) Andrés Edu Hirigoyen

Ing. Mon. (PhD) Rafael María Navarro Cerrillo

Ing. Agr. (MSc.) Iván Gabriel Rizzo Martín

Fecha: 15/11/2023

Estudiantes:

Eliana Geradín Faller Suárez

Matías Mañana Diz

Pilar Olaso Roure

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, a quienes acompañaron el desarrollo de la presente investigación, Franco Schinato y Andrés Baietto por su disposición y colaboración en esta etapa final de nuestro aprendizaje.

A Agro Empresa Forestal por permitirnos llevar a cabo la investigación dentro de sus establecimientos bajo gestión y colaborar con el soporte operativo para realizar las operaciones pertinentes.

A la institución Facultad de Agronomía de la Universidad de la República por brindarnos las herramientas para nuestra formación profesional y al Departamento Forestal por facilitarnos el transporte y equipo necesario para llevar a cabo la investigación.

Por último, a nuestra familia y amigos, quienes fueron un pilar fundamental que nos han acompañado en cada etapa transitada en este camino de formación terciaria.

Tabla de Contenido

<u>PAGINA DE APROBACIÓN</u>	2
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	3
<u>LISTA DE TABLAS Y FIGURAS</u>	5
<u>RESUMEN</u>	7
<u>ABSTRACT</u>	8
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	9
1.1 OBJETIVOS	9
1.1.1. <u>Objetivo general</u>	9
1.1.2. <u>Objetivos específicos</u>	9
<u>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	10
2.1 PRODUCCIÓN FORESTAL EN URUGUAY	10
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL GÉNERO <i>EUCALYPTUS</i>	10
2.2.1 <u>Características del <i>Eucalyptus dunnii</i></u>	11
2.3 SITIOS DE PRODUCCIÓN FORESTAL EN URUGUAY	11
2.4 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y CRECIMIENTO FORESTAL	13
2.4.1. <u>Modelos de estimación de biomasa</u>	15
<u>3. METODOLOGÍA</u>	18
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
3.2 INVENTARIO FORESTAL Y DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA Y CARBONO FORESTAL	18
3.3 MUESTREO DESTRUCTIVO.	20
3.4 SELECCIÓN DE MODELOS INDIVIDUALES PARA CADA FRACCIÓN DE LOS INDIVIDUOS Y AJUSTE SIMULTANEO DE BIOMASA TOTAL.	22
3.5 DETERMINACIÓN DE CARBONO.....	23
<u>4. RESULTADOS</u>	25
4.1 FACTOR DE FORMA E INVENTARIO FORESTAL.....	25
4.2 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA.....	31
4.3 STOCK DE BIOMASA Y CARBONO FORESTAL.....	34
<u>5. DISCUSIÓN</u>	43
<u>6. CONCLUSIONES</u>	48
<u>7. BIBLIOGRAFÍA</u>	49
<u>8. ANEXO</u>	55

Lista de Tablas y Figuras

Tabla No.	
Tabla No.1 Intensidad de muestreo por estrato	20
Tabla No.2 Clases diamétricas y número de individuos para <i>E. dunnii</i> de 3 años	22
Tabla No.3 Clases diamétricas y número de individuos para <i>E. dunnii</i> de 7 años	22
Tabla No.4 Modelos alométricos ajustados en Rstudio	23
Tabla No.5 Curva de calibración	24
Tabla No.6 Factor de forma y volúmenes promedio para los árboles evaluados en los muestreos destructivos de las poblaciones de <i>E. dunnii</i> de 3 años	25
Tabla No.7 Factor de forma y volúmenes promedio para los árboles evaluados en los muestreos destructivos de las poblaciones de <i>E. dunnii</i> de 7 años	25
Tabla No.8 Resultados de inventario forestal para el estrato 2.11a <i>E. dunnii</i> de 3 años	27
Tabla No.9 Resultados de inventario forestal para el estrato 2.12 <i>E. dunnii</i> de 3 años	28
Tabla No.10 Resultados de inventario forestal para el estrato 2.12 <i>E. dunnii</i> de 7 años	29
Tabla No.11 Resultados de inventario forestal para el estrato 2.21 <i>E. dunnii</i> de 7 años	30
Tabla No.12 Resumen descriptivo de los árboles evaluados en la población <i>E. dunnii</i> de 3 años	32
Tabla No.13 Resumen descriptivo de los árboles evaluados en la población <i>E. dunnii</i> de 7 años	32
Tabla No.14 Modelos alométricos individuales ajustados por fracción para <i>E. dunnii</i> de 3 años	33
Tabla No.15 Modelos alométricos individuales ajustados por fracción para <i>E. dunnii</i> de 7 años	33
Tabla No.16 Modelos simultáneos por fracción ajustados a través del procedimiento NSUR para <i>E. dunnii</i> de 3 años	34
Tabla No.17 Modelos simultáneos por fracción ajustados a través del procedimiento NSUR para <i>E. dunnii</i> de 7 años	34
Tabla No.18 Concentraciones promedio de carbono para cada fracción de la biomasa para <i>E. dunnii</i> de 3 y 7 años	35
Tabla No.19 Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.11a <i>E. dunnii</i> de 3 años	36
Tabla No.20 Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.12 <i>E. dunnii</i> de 3 años	37
Tabla No.21 Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.12 <i>E. dunnii</i> de 7 años	39
Tabla No.22 Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.21 <i>E. dunnii</i> de 7 años	40

Figura No.

Figura No. 1 Curva sigmoide representativa de la evolución del volumen	14
Figura No. 2 Crecimiento corriente (ICA) y crecimiento medio (IMA) del rodal regular	15
Figura No. 3 Fotografías del muestreo destructivo a campo.....	21
Figura No. 4 Fotografías del proceso de digestión de las muestras para la determinación de carbono dentro de cada fracción.	24
Figura No. 5 Biomasa acumulada y contenido de carbono (%) promedio en las distintas fracciones para <i>E. dunnii</i> de 3 y 7 años.....	42

RESUMEN

Las plantaciones comerciales de *Eucalyptus dunnii* han ido incrementando su superficie a lo largo del territorio nacional, impulsado por el aumento en la demanda de materia prima para la producción de celulosa. Estas coberturas se caracterizan por presentar elevada productividad primaria, acumulando biomasa y promoviendo el secuestro del carbono. Sin embargo, la cuantificación directa de los stocks de biomasa y carbono presenta limitantes debido a los elevados esfuerzos y tiempo necesarios para su determinación. De esta manera, el ajuste de modelos predictivos es una forma eficiente de obtener información relevante para la gestión sustentable de las plantaciones forestales. Este estudio tiene como objetivo ajustar modelos para la estimación de biomasa y cuantificar el stock de carbono, en poblaciones de 3 y 7 años de *E. dunnii* en suelos del grupo CONEAT 2. A partir de estas características fueron definidos 4 estratos, en donde se realizaron 48 parcelas de inventario forestal, distribuidas en igual número entre los estratos. Estos datos fueron utilizados para seleccionar 58 árboles para evaluación destructiva, seccionando la biomasa aérea total (BMT) en las fracciones fuste (BF), ramas gruesas (BRG), ramas finas (BRF) y hojas (BH). Inicialmente fueron ajustados modelos de regresión no lineales independientes para cada fracción y para la biomasa total de ambas edades. Los modelos seleccionados fueron finalmente ajustados en forma simultánea para la obtención de modelos aditivos entre las fracciones, mediante el proceso de regresión no lineal aparentemente no relacionada (NSUR, por su sigla en inglés). La estimación de los stocks de carbono de las poblaciones fue realizada a partir de la biomasa aérea estimada y de las concentraciones de carbono de las fracciones. Entre los resultados obtenidos, se verificó el siguiente orden de calidad de ajuste de los modelos para las variables de la biomasa: $BMT > BF > BRG > BH > BRF$. Los modelos de BF y BMT presentaron una elevada capacidad predictiva, con valores de coeficiente de determinación (R^2 ajustado) superiores al 95%. A su vez, los modelos de las fracciones BRG, BRF y BH presentaron mayor variabilidad en las estimaciones respecto a los de BF y BMT, sin embargo, se obtuvieron modelos con valores de R^2 ajustado superiores al 70%. En cuanto a la productividad de las plantaciones, estas fueron similares entre los estratos de 3 años y con mayor diferencia en los de 7 años, lo que puede estar asociado a la calidad de los sitios y competencia entre los árboles. Los stocks de biomasa total para las poblaciones de 3 y 7 años fueron 65,93 y 119,51 Mg ha⁻¹, respectivamente. En las fracciones BRG, BRF y BH, la población de 3 años presentó valores absolutos y relativos superiores a los de 7 años, indicando un aumento en la asignación de la biomasa en el fuste y reducción de la copa a edades más avanzadas. Los resultados obtenidos muestran una estimación eficiente y precisa de la biomasa forestal, y los valores de productividad verificados en las plantaciones indican su elevado potencial para el secuestro de carbono.

Palabras Clave: forestación sustentable, modelos aditivos, ajuste simultáneo, stock de carbono forestal

ABSTRACT

The commercial plantations of *Eucalyptus dunnii* has increased in surface through all the national territory, which was promoted by the raise in the demand of the raw material for pulp production. These plantations are characterized by high primary productivity, accumulating biomass and promoting carbon sequester. Nonetheless, the direct quantification of biomass and carbon stocks presents limitations due to the high operational effort and time needed. The adjustment of predictive models is an efficient form for obtaining relevant information for the sustainable management of forest plantations. This study aims to obtain models for estimating biomass and to quantify the carbon stock, in populations of *E. dunnii* at ages of 3 and 7 years old on soils CONEAT 2. Based on these characteristics 4 stratum were defined, in which 48 forest inventory plots were measured, distributed in equal number among the stratum. The data obtained was used for selecting 58 trees for destructive evaluation, sectioning the aerial biomass in stem (SB), thick branches (TcB), thin branches (TnB), leaves (LB) and total (TB). Initially, independent nonlinear regression models were fitted for fractions and total biomass, considering both ages separately. The models selected were finally adjusted in simultaneous for obtaining additive models for the fractions through the process of nonlinear seemingly unrelated regression (NSUR). The quantification of carbon stocks from populations were realized using the aerial biomass estimated, and carbon concentrations obtained with individual fractions samples. The results presented the following order of models fit quality for the biomass variables: TB > SB > TcB > LB > TnB. The models of SB and TB presented high predictive capacity, with R² adjusted superior to 95%. The models of TcB, TnB and LB presented higher variability in the estimates compared to those of SB and TB, nonetheless, the obtained values of R² adjusted were over 70%. Regarding the forest productivity, the values verified were similar among the stratum of 3 years old plantations and presented greater difference at those of 7 years, what can be associated to the site quality and competition among trees. The total biomass stock for populations of 3 and 7 years old were 65.93 y 119.51 Mg ha⁻¹, respectively. Respect to the fractions of TcB, TnB and LB, the population of 3 years presented superior absolute and relative values respect to those of 7 years, indicating a raise in stem biomass assignation and crown reduction at older ages. The results obtained show an efficient and precise estimation of forest biomass, and the productivity levels verified indicate a high potential for carbon sequestration with *E. dunnii* forest plantations.

Keywords: sustainable forestation, additive models, simultaneous adjustment, forest carbon stock

1. INTRODUCCIÓN

La producción forestal en Uruguay ha tenido un desarrollo significativo en las últimas décadas. Actualmente, alcanza una superficie total de 1.087.109 hectáreas (ha) efectivas destinadas a la producción forestal (Dirección General Forestal [DGF], 2021a). Las mismas están mayormente ocupadas por plantaciones comerciales de distintas especies de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, abarcando 594.540 y 154.698 ha, respectivamente (DGF, 2021a). Entre las especies con mayor importancia productiva y cobertura territorial se encuentra el *Eucalyptus dunnii*, ocupando 216.581 ha efectivas (DGF, 2021a). Considerando que, en gran parte de las áreas destinadas a la producción forestal, la forma de uso y cobertura del suelo previa correspondía a los pastizales nativos manejados con pastoreo, se genera un cambio en el uso del suelo de pastoril a forestal (Sánchez, 2011), introduciendo un nuevo componente capaz de promover la productividad primaria bruta y la acumulación de biomasa y carbono (C) (Hirigoyen et al., 2021). En este sentido, la modelación de la producción de biomasa y fijación de C, abarcando los principales sitios de producción y edades dentro de la rotación forestal, permite obtener estimaciones eficientes a escala territorial (Hirigoyen, 2021).

Actualmente se dispone de modelos de estimación de biomasa ajustados específicamente a determinados sitios y especies forestales (Methol, 2006), sin embargo, en el caso del *Eucalyptus dunnii*, los mismos están restringidos a las zonas de producción de los grupos de suelos CONEAT 8 y 9. En este sentido, aunque el área de suelos de los grupos CONEAT 2 ocupa aproximadamente el 49 % de aquellos suelos de prioridad forestal, la mayoría de los estudios que abordan este tema no fueron desarrollados sobre dichas zonas. A su vez, Hirigoyen et al. (2021) realizaron un primer antecedente de la utilización del método NSUR en Uruguay para la estimación de la biomasa total en árboles. En base a esto, el presente estudio busca ajustar modelos de estimación de biomasa y estimar el stock de carbono en plantaciones comerciales de *Eucalyptus dunnii* distribuidas sobre suelos del grupo CONEAT 2.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

- a) Evaluar el stock de biomasa y carbono forestal en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* sobre suelos del grupo CONEAT 2.

1.1.2. Objetivos específicos

- a) Ajustar modelos para la estimación de biomasa en los compartimentos fuste, ramas gruesas, ramas finas, hojas y biomasa total de *Eucalyptus dunnii*.
- b) Determinar el contenido de carbono por fracción de la biomasa total.
- c) Estimar la partición de la biomasa aérea y el stock de carbono por compartimento en las plantaciones bajo estudio.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUCCIÓN FORESTAL EN URUGUAY

Actualmente el sector forestal aporta al producto interno bruto nacional un 3,8%, siendo el sector con mayor volumen de exportación, además de ocupar un 6% de la superficie total del país. Según la cartografía nacional se estima una cobertura con plantaciones forestales de 1.048.228 ha efectivas y otras 38.881 ha cosechadas (período enero/febrero 2021); totalizando en 1.087.109 ha destinadas a la producción forestal (DGF, 2021a).

En el año 1987 como método para impulsar el sector forestal como proyecto de economía a largo plazo, el gobierno decidió aprobar la Ley n° 15.939 (1987), la cual buscó incentivar la actividad para fomentar su desarrollo. Esta ley amplió y modificó los mecanismos de promoción al sector como: 1) exoneraciones tributarias a toda superficie cubierta por bosques artificiales de producción instalados en suelos de prioridad forestal, 2) subsidios directos del estado, 3) créditos blandos para plantaciones y 4) exoneraciones impositivas a la importación de bienes de capital e insumos (Panario & Gutiérrez, 2007). En consecuencia, a partir del 1990 la superficie nacional con plantaciones forestales creció del 4% al 10,98% al 2021 (DGF, 2021a).

Dentro de este marco, el sector forestal presentó un incremento en la demanda de materia prima por parte de los mercados internacionales, en consecuencia, el *Eucalyptus* fue impulsor de nuevas investigaciones para encontrar los materiales primarios que más se adecuen a las necesidades de los productos finales (Diez de Medina, 2011). Los principales géneros de uso forestal para el Uruguay son *Eucalyptus* y *Pinus*, siendo el *Eucalyptus* quien presenta la mayor cobertura a nivel nacional. En este género el uso de las especies varía según sus adaptabilidades y rendimientos en los diferentes ambientes, siendo el *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus smithii* las más utilizadas (DGF, 2021a). Actualmente, el *E. dunnii* es la especie con mayor producción de plantines a nivel de vivero, donde se reportó para el año 2021 una producción de 51.556.418 (45,8%), seguido por *Eucalyptus grandis* con una producción de 37.658.418 (33,4%), mientras que para *Eucalyptus smithii* la producción fue de 11.433.050 (10,2%) (DGF, 2021b).

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL GÉNERO *EUCALYPTUS*

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia Myrtaceae comprendiendo a un grupo de 950 especies, las cuales son endémicas y nativas de Australia en su mayoría (Barros, 2012). Las especies tienen una distribución edafoclimática característica que le otorga la capacidad de adaptarse a condiciones diferentes a las de su zona de origen, esto se debe a la sensibilidad que presentan al sitio forestal (Brussa, 1994). Por su parte, Barnes et al. (1998) definen al sitio forestal como una localización geográfica específica dada por la interacción entre clima y suelo, a su vez Schlatter y Gerding (2014) contemplan ambas características dentro de los factores macroclima, clima local, suelo y estado nutritivo del suelo manteniendo un orden jerárquico de importancia. Barros (2012) afirma que la amplia distribución que presenta el género en su área de distribución natural, así como sus características intrínsecas de adaptarse a un amplio rango de condiciones

edafoclimáticas, son propiedades por las cuales los eucaliptus están entre las especies más utilizadas en plantaciones forestales.

2.2.1 Características del *Eucalyptus dunnii*

Esta especie naturalmente presenta una distribución acotada dentro de Australia en la región sur este (28°-30°15'S) (Brussa, 1994). El clima existente en la zona de distribución natural es templado con un promedio de temperaturas máximas de 27-30°C y mínimas de 0-3°C, con hasta 60 heladas por año; húmedo con precipitaciones estivales del orden de 1000-1750 mm anuales (Boland et al., 1984).

El *Eucalyptus dunnii* es un árbol que puede alcanzar hasta 50 m de altura, con fuste recto, follaje denso y péndulo. Su corteza es normalmente rugosa y persistente en la base hasta 1-2m siendo en el resto del fuste caduca en fajas largas. Sus hojas juveniles son opuestas y las adultas alternas, pecioladas, lanceoladas de ápice agudo, acuminado, base cuneada, levemente discoloras a con-coloras y con nervaduras secundarias oblicuas (Yussim, 2013). Las flores están dispuestas en dicasios 7-floros, simples, axilares, con pedúnculos achatados y botones florales ovoides, opérculo levemente rostrado más largo que el hipantio. Florecen a fines de primavera y en verano. Los frutos son hemisféricos, con disco convexo, notorio, exserto, valvas salientes anchas y fuertes (Brussa, 1994). La producción de *Eucalyptus dunnii* se destina netamente para la elaboración de pasta de celulosa, esto se debe a que la especie en cuestión presenta muy buenas aptitudes papeleras, teniendo un rendimiento bruto del 51,1%, un porcentaje de álcali activo entre 15,6-18,35%. Dicho comportamiento se debe a sus valores promedio de densidad que son de 499 kg m⁻³ (Doldán et al., 2008).

2.3 SITIOS DE PRODUCCIÓN FORESTAL EN URUGUAY

Según el tipo de suelo, clima y distancia a los puntos de salida de la producción se puede dividir al país en 3 regiones según criterios de la DGF (2021a): i) La región sureste es la más cercana al puerto de Montevideo, se caracteriza por una fuerte influencia marítima que evita la existencia de temperaturas extremas, determinando una mejor adaptación de las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus dunnii* para la producción de madera con destino a pulpa de celulosa. ii) La región centro-norte cuenta con la mayor área forestada, concentrando el 42% de los bosques artificiales del Uruguay. La misma se caracteriza por presentar mayores heladas en invierno y temperaturas más elevadas durante el verano y por el predominio de suelos arenosos, siendo propicia para el desarrollo de especies de *Eucalyptus grandis* y *Pinus*, y el principal destino de la producción de madera es la transformación mecánica. iii) La región litoral-oeste se caracteriza por la presencia de heladas y suelos franco arenosos a arenosos. En esta zona hay un gran predominio del género *Eucalyptus*, siendo menor el *Pinus*, y el principal destino de la madera es la producción de pasta de celulosa. Esta zona presenta rendimientos levemente menores que la región norte del país. En consecuencia, de la segunda Ley Forestal se establecieron aquellos suelos de prioridad y aptitud forestal. Los suelos declarados de prioridad por el MGAP pertenecen a los grupos CONEAT de las zonas CIDE (Comisión de Inversiones y Desarrollo Económico) 7, 8, 9 y 2 (CIDE, 1967, como se cita en Prieto González, 2011).

El Uruguay se encuentra situado entre los 33° y 35° de latitud sur en una zona subtropical templada (Ualde, 2015). La regionalización agroclimática a nivel nacional permite la definición de los principales sitios destinados a la producción forestal. Vinculado a esto, se puede destacar la clasificación climática de Uruguay según Köppen, la cual presenta las siguientes características: templado, moderado, lluvioso (tipo C); temperie húmeda (tipo f); temperatura del mes más cálido superior a 22°C (tipo a), por consiguiente, la clasificación climática que se corresponde para Uruguay es del tipo “Cfa”.

Según Castaño et al. (2011), Uruguay registra una temperatura media de 17,7°C, variando desde unos 19,8°C en la zona noreste hasta unos 16,6°C en la costa sur del país. En cuanto a las precipitaciones, los valores medios de precipitación acumulada anual oscilan entre 1200 y 1600 mm con los menores valores situados al suroeste y los máximos en el noreste. Otro factor ambiental es la humedad relativa del aire, con una tendencia creciente en dirección noreste-sureste. Por último, otro componente ambiental de gran importancia son las heladas agroclimáticas, donde anualmente varían entre 20-25 días en el norte y en el sur del país, a más de 35 días en el centro.

La evaluación de los suelos destinados a la producción incluye la interpretación de propiedades morfológicas, físicas y químicas, así como las características asociadas a topografía, pedregosidad y rocosidad (Durán, 2005). Para un buen desempeño forestal se pueden destacar características fundamentales como profundidad, textura del suelo, naturaleza del horizonte C y propiedades determinantes de la disponibilidad de agua (Herbert, 2005, como se cita en Bentancor, 2017). Los suelos aptos para la producción forestal en el país quedan mayoritariamente incluidos en los Órdenes Luvisoles, Acrisoles, Argisoles y Planosoles (Califra et al., 2007). El componente suelo es considerado como factor preponderante para un buen desarrollo forestal, siendo las propiedades físicas del suelo las de mayor relevancia para un correcto y efectivo establecimiento de las plantaciones, no obstante, las propiedades químicas también tienen un rol fundamental ya que estas inciden sobre la productividad final debido a los materiales que le dan origen a cada suelo y los contenidos de materia orgánica que se presenta en cada uno (Gonçalves et al., 2007).

Según la Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra (CONEAT, 2020), se elaboró una breve recomendación en la cual se entiende que deben considerarse como tierras forestales ciertas áreas agrupadas en las denominadas Zonas de la CIDE. Dicha agrupación de suelos por zona fue retomada para la conformación de los Grupos de Suelos CONEAT elaborados por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. En base a estas descripciones, a continuación, se describirán las características generales de los grupos de suelo de la zona 2, sobre la cual está enmarcada esta investigación y se hará un enfoque más profundo, basando la descripción en relación con lo descrito por Hernández-Ramos et al. (2017).

Zona 2. Se presenta en forma de faja irregular que abarca una extensa superficie desde el sur del departamento de Maldonado cubriendo hasta el límite

con Brasil en el departamento de Cerro Largo, la dirección de esta faja se orienta en sentido SW-NE, y puede incluir zonas cristalinas del departamento de Rivera y las sierras de Aceguá y Mal Abrigo. Cuenta con un paisaje de sierras en el cual se denotan afloramientos rocosos cuya densidad es variable, y se presentan colinas. El relieve es quebrado y ondulado fuerte. En cuanto al material geológico que conforma la presente zona, se pueden encontrar rocas ígneas, metamórficas y en ocasiones algunas efusivas ácidas. Los suelos se caracterizan por ser superficiales o en ocasiones moderadamente profundos, y presentan una fertilidad media en las regiones de sierras, siendo en las áreas de colinas los suelos profundos a moderadamente profundos y de fertilidad media (Bentancor, 2017).

La utilización de los denominados índice de sitio permiten de forma práctica estimar la productividad forestal (Torres-Rojo, 2001). Este método consiste en determinar la altura que lograrían alcanzar los árboles dominantes y codominantes a una edad determinada, frecuentemente definida como edad base (Ortega & Montero, 1988). Dicha evaluación requiere la realización de un modelo que represente la relación entre la altura y la edad (Gracia Alonso et al., 2004). Actualmente ha surgido la necesidad de generar nuevos estudios que permitan cuantificar la productividad primaria de los bosques para generar un mejor entendimiento de sus balances de carbono (Dixon et al., 1994).

2.4 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y CRECIMIENTO FORESTAL

El concepto de productividad primaria neta refiere a la biomasa total producida en un intervalo específico de tiempo, se la define como la diferencia entre la fotosíntesis total (productividad primaria bruta) y la respiración autótrofa (Yu et al., 2017). En cuanto a la PPB, esta es un indicador importante de los cambios del ciclo de carbono terrestre, siendo la suma del carbono absorbido de la atmósfera a través de la fotosíntesis de las plantas a nivel de ecosistema (Borrego et al., 2015). Este componente es de gran importancia debido a que cuando supera el valor de la respiración autótrofa se genera un almacenamiento neto de carbono en el ecosistema (Casanova et al., 2011).

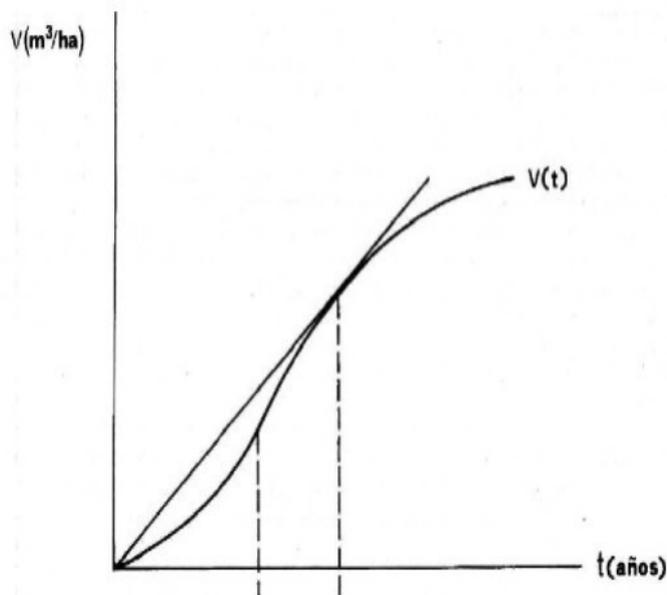
Con relación a los bosques nativos, estos se caracterizan por poseer una estructura disetánea y heterogénea, por lo que la PPN está sujeta a estas variaciones intrínsecas de estos bosques (Salas & Infante, 2006). Según Yu et al. (2017), estudios previos demuestran que la PPN forestal es altamente afectada por la edad que presentan los rodales, y así, estas variaciones etarias juegan un rol preponderante en la determinación de fuentes de carbono forestal a grandes escalas. Otro factor reportado por los autores como determinante sobre la PPN son las perturbaciones que puedan sufrir los montes, ya que los incendios, ataques de insectos y las cosechas modifican la liberación de carbono a la atmósfera debido a la remoción de la biomasa, liberación de carbono y aceleración de los procesos metabólicos, generando una fuerte alteración en el ciclo del carbono.

Las relaciones entre el volumen forestal y la edad de la plantación pueden ser descriptas mediante las curvas de crecimiento, las cuales pueden ser utilizadas para describir el crecimiento tanto individual como a nivel de la población. En general estas curvas de crecimiento presentan una forma sigmoide, la cual posee 3

etapas de crecimiento correspondientes a juventud, madurez y senectud (Iturre & Araujo, 2006).

Figura No. 1

Curva sigmoide representativa de la evolución del volumen

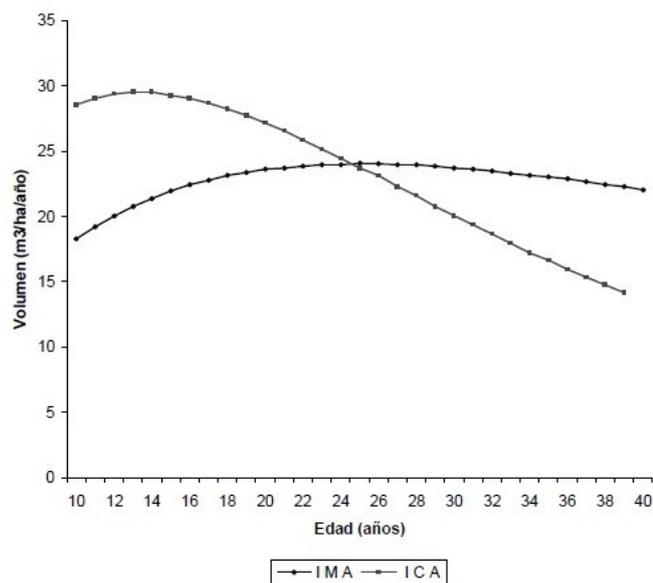


Nota. Adaptado de Iturre y Araujo (2006).

Analizando la curva puede visualizarse que el valor inicial es cero, donde el inicio de crecimiento se da de forma gradual hasta alcanzar un punto de inflexión. A partir de ese momento, el crecimiento continúa con una menor intensidad hasta alcanzar un punto de tangencia máxima y desde ese punto comienza un proceso asintótico (Iturre & Araujo, 2006). Según Schneider et al. (2009), el incremento o crecimiento de una población puede ser expresado por los siguientes indicadores: incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA). El incremento corriente anual corresponde al valor de aumento de la producción en el periodo de un año, en tanto, el incremento medio anual se corresponde a la tasa promedio de aumento de producción desde la instalación de la población hasta una edad determinada (Iturre & Araujo, 2006).

Figura No. 2

Crecimiento corriente (ICA) y crecimiento medio (IMA) del rodal regular



Nota. Adaptado de Iturre y Araujo (2006).

El turno forestal se define como el tiempo transcurrido entre la plantación y el corte raso desde su regeneración o implantación, definido conforme a criterios de madurez biológica o económica. La forma más popular para definir dicho turno contempla criterios técnicos de máxima productividad (Guera et al., 2019). En este sentido, Díaz (1997) define el “turno técnicamente óptimo” (TTO) como la edad en la cual la plantación alcanza la máxima producción, dicha edad se alcanza cuando el IMA iguala al ICA (figura No.2). Por consiguiente, las mencionadas curvas que definen el crecimiento tienen un rol preponderante para el manejo forestal, reflejando los momentos óptimos para tomar acciones que tengan un impacto directo sobre la productividad (Iturre & Araujo, 2006).

2.4.1. Modelos de estimación de biomasa

La generación de modelos predictivos que posibiliten el monitoreo de los stocks de biomasa y carbono son de alta relevancia para la cuantificación del carbono secuestrado por las masas forestales en amplias escalas territoriales (García, 2010). Las ecuaciones alométricas son utilizadas para obtener estimaciones indirectas de biomasa cuya fuente de información son datos dasométricos, tales como DAP, altura total, densidad arbórea, entre otros, siendo estos modelos representaciones de la realidad mediante ecuaciones matemáticas (Hirigoyen et al., 2021; Sanquetta et al., 2019).

La biomasa acumulada en un bosque o plantación es un indicador de crecimiento vegetal y carbono fijado, esta información es de gran utilidad para valorar el rol que tiene la cubierta vegetal de los bosques sobre la reducción de gases de efecto invernadero (Hernández-Ramos et al., 2017). A su vez, Lu et al. (2016) enfatizan la necesidad de generar una estimación detallada de la dinámica que

presentan los ecosistemas forestales frente a las preocupaciones actuales por el cambio climático y para un mejor entendimiento de estos.

Las particularidades que presenta la producción forestal hacen de los modelos una herramienta útil, por ello el desarrollo de modelos predictivos del crecimiento, producción y aprovechamiento son hoy en día un eje central en investigaciones e innovaciones propias del sector (Hirigoyen et al., 2021). Hernández-Ramos et al. (2017) señalan que la biomasa aérea tiene un rol fundamental a la hora de cuantificar el carbono acumulado por la cubierta vegetal, para ello utilizan datos de inventario forestal para poder estimar la biomasa aérea total y a través de modelos alométricos se estima en función de componentes estructurales del propio árbol.

Los modelos basados en la simulación pueden ser empleados tanto a nivel de árboles individuales como a nivel de rodal y utilizan variables predictoras como: edad, diámetro a la altura del pecho (DAP), altura, largo y diámetro de copa, área foliar, densidad arbórea (N), calidad o índice de sitio (IS), mortandad y cambio de estructura y el manejo silvícola como las prácticas de podas y raleos (Hirigoyen et al., 2021). Dentro de este marco, se han clasificado a los modelos de estimación de biomasa en métodos directos y métodos indirectos, siendo los directos aquellos que implican prácticas destructivas, mientras que los indirectos recurren a prácticas no destructivas para la obtención de datos (Salas & Infante, 2006).

El método directo consiste en la determinación del peso seco luego de apear, seccionar y pesar la biomasa de las muestras extraídas (Brown, 1997). La cuantificación de la biomasa aérea es realizada a partir del apeo de un número representativo de árboles de la población, a los cuales posteriormente se les secciona el fuste en trozas para la determinación de sus masas. Por otro lado, las ramas y el follaje son separadas y medidas de manera independiente registrándose su peso (Díaz-Franco et al., 2007).

La utilización de métodos indirectos es una alternativa eficaz que permite realizar estimaciones precisas a grandes escalas. Los datos utilizados surgen de variables mensurables como DAP, área basal, altura, índice de área foliar entre otros (Murali et al., 2005). Las ecuaciones son ajustadas a partir de árboles representativos de aquellas poblaciones sobre las que se realizan las predicciones. Este método trae aparejado como principal problemática su aplicación, ya que no son eficientes cuando se aplican en rodales de diferentes características a la población que provee los datos (García, 2010). Las técnicas de teledetección son otra herramienta de los métodos indirectos, las cuales brindan con una alta resolución espacio temporal estimaciones utilizadas para evaluar y monitorear la cobertura vegetal a partir de la respuesta espectral de las poblaciones forestales (Shi & Liu, 2017). A su vez, estos métodos pueden procesar información a partir de sensores ópticos satelitales, con imágenes de media y alta resolución espacial, sensores de radar o microondas satelitales (PALSAR) y de datos de sensores de láser (Lidar), entre otros (Picard et al., 2012).

En contraposición, existen una serie de sesgos que traen asociado cierta incertidumbre luego de ajustar el modelo asociado al conjunto de datos (Sanquetta

et al., 2019). Una vez seleccionado el modelo alométrico, Picard et al. (2012) informan la existencia de errores sucesivos que propagan sesgo al resultado, estos están comprendidos en el momento de construcción del inventario, como errores de mensura y muestreo, y asociados al modelo está la elección de este y su predicción, siendo el error asociado a la elección del modelo la mayor fuente de error. En este sentido, Shi y Liu (2017) reportan los errores de muestreo como principal incertidumbre en la utilización de IVN para estimar el volumen forestal. Los errores de muestreo contemplan fallas en la medición de los parámetros mensurables como en la identificación y ajuste de la ecuación alométrica a utilizar, a su vez, la no georreferenciación de la parcela es otra fuente de error en la aplicación de dichos métodos.

Con el fin de modelar la biomasa total de los árboles, así como también los stocks dentro de sus componentes, Parresol (2001) menciona la importancia de considerar la aditividad de los modelos ajustados por fracción para alcanzar un nivel de compatibilidad que asegure la estimación de biomasa en las fracciones con la biomasa total. En este sentido es que varios autores, entre ellos Parresol (2001), Sanquetta et al. (2019), Hirigoyen et al. (2021) y Trautenmüller et al. (2021) reportan la importancia de generar ajustes simultáneos sobre los modelos ajustados pro fracción de biomasa, ya que al estimar la biomasa total son utilizados a su vez los mismos modelos que se aplican a cada fracción del árbol.

A modo de conclusión, cabe destacar que las herramientas de geoestadística y detección remota son valiosas para mejorar la precisión en la estimación de la biomasa forestal y las existencias del stock de carbono a varias escalas. La aplicación de estas prácticas tiene como principal base de datos las variables dasométricas mensurables a campo, por lo tanto, es indispensable contar con datos de calidad para aumentar la capacidad predictiva de los modelos de estimación, obteniendo así resultados más exactos sobre la estimación de biomasa (Shi & Liu, 2017).

3. METODOLOGÍA

En el presente apartado se describe el área de estudio donde se lleva adelante la investigación y la correspondiente metodología para la obtención de los datos para el ajuste de los modelos a partir de los cuales estimaremos la biomasa aérea.

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio fue realizado sobre dos establecimientos forestales ubicados en el departamento de Florida, Uruguay, sobre la ruta nacional N.º 7. El predio “Mi Generala” se ubica en las coordenadas (33°47'52.46"S y 55°29'0.59"O), el mismo cuenta con 2320 ha donde la superficie efectivamente forestada es de 1225 ha. Por otra parte, el establecimiento “Reboledo” está ubicado en las coordenadas (33°57'51.1"S 55°29'53.4"W), contando con un total de 838 ha, de las cuales 536 ha son afectadas por forestación directamente. El estudio se enmarcará sobre una superficie de 42.78 ha, de las cuales 20 ha corresponden a plantaciones comerciales de *Eucalyptus dunnii* de 3 años sobre suelos CONEAT 2.11a y 2.12, mientras que las restantes 22,78 ha corresponden a plantaciones comerciales de *Eucalyptus dunnii* de 7 años sobre suelos CONEAT 2.12 y 2.21.

Este departamento cuenta con una temperatura media anual de 17 °C y un régimen de precipitaciones que va desde los 1200 y 1300 mm anuales, en cuanto a la ocurrencia de heladas se estima en 10 días promedio (Castaño et al., 2011). Los suelos dominantes en el grupo CONEAT 2.11a son Brunosoles Subéutricos Típicos, francos, moderadamente profundos, a veces profundos, y en algunos casos a contacto lítico; y Litosoles Subéutricos Melánicos, areno graviliosos, a veces pedregosos y muy superficiales, con afloramientos rocosos. Por otro lado, los suelos dominantes en el grupo CONEAT 2.12 son Brunosoles Subéutricos, Háplicos y Típicos, arenosos francos y francos, algunas veces arenosos franco graviliosos, superficiales y moderadamente profundos; asociado a estos se encuentran Litosoles Subéutricos Melánicos, arenosos franco graviliosos, a veces muy superficiales y pedregosos; y Brunosoles Subéutricos Lúvicos, francos u ocasionalmente arenosos-francos, a veces ródicos. Finalmente, los suelos dominantes en el grupo CONEAT 2.21 son Brunosoles Lúvicos, francos y Argisoles Subéutricos Melánicos Abrúpticos, francos a veces moderadamente profundos.

3.2 INVENTARIO FORESTAL Y DETERMINACIÓN DE LA BIOMASA Y CARBONO FORESTAL.

Para la realización del inventario forestal se procedió con la delimitación de los rodales que contienen la especie en estudio, plantadas en los años 2015 y 2019. Este procedimiento se desarrolló mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y fotointerpretación utilizando imágenes satelitales. Una vez delimitada la superficie se procedió con la ejecución de un inventario piloto, con intensidades de muestreo superiores al 1% de la superficie total, utilizando parcelas de 300 m² (20 x 15 m), las cuales contienen dentro 4 hileras de árboles, variando el número de individuos en cada parcela en función de la supervivencia. Dichas parcelas fueron instaladas de forma aleatoria en cada estrato de evaluación definido en función del índice CONEAT y del año de la plantación en evaluación. Los estratos evaluados fueron: (i) plantación de *E. dunnii* con 3 años establecida en

CONEAT 2.11a (E1); (ii) plantación de *E. dunnii* con 3 años establecida en CONEAT 2.12 (E2); (iii) plantación de *E. dunnii* con 7 años establecida en CONEAT 2.12 (E3); (iv) plantación de *E. dunnii* con 7 años establecida en CONEAT 2.21 (E4). En cada parcela se realizó una descripción de suelo de forma a corroborar que los suelos presentes fueran del índice CONEAT esperado. En el inventario fueron evaluadas las siguientes variables: diámetro a la base (DAB), diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro de copa (DC), altura de la primera rama viva (H1), y altura total (H_T). Las mediciones se realizaron utilizando un clinómetro digital Haglöf EC II D-R (Haglöf, Långsele, Sweden) y cinta métrica. Cabe destacar que las variables DAB y DAP fueron medidas en todos los individuos contenidos en la parcela, mientras que las alturas (H1 y H_T) se registraron para 1 de cada 4 árboles y aquellos individuos con mayor y menor DAP dentro de la parcela. Posteriormente, se implementó el uso del programa estadístico RStudio, el cual permitió estimar las restantes alturas a partir de un modelo lineal en función del DAP. El modelo ajustado fue el siguiente:

$$H = \beta_0 + \beta_1 \times \log(DAP) \quad \text{Ec. 1}$$

Seguidamente se comprobó el cumplimiento de los supuestos de distribución normal de los residuales y se comparó gráfica y estadísticamente el valor de los predichos versus los residuales. Las pruebas que se aplicaron fueron Kolmogorov para verificar la distribución normal de los residuales, para homogeneidad de la de la varianza se aplicó Breusch Pagan y la independencia de los residuales se evaluó con Durbin Watson, además de la verificación del gráfico de dispersión entre los residuos estandarizados y los valores predichos (Balzarini et al., 2008). Los estadísticos del modelo y su ajuste son presentados en anexos.

A partir de la información relevada en esta instancia, se calculó el factor de expansión con la ecuación (fe, Ec. 2), el área basal individual (g_i, Ec. 3) y por hectárea (G, Ec. 4), volumen individual (v_i, Ec. 5) y por hectárea (V, Ec. 6) y se determinó el tamaño mínimo de muestra según la siguiente ecuación (Ec. 7) (Campos & Leite, 2006).

$$fe = \frac{10.000}{a} \quad \text{Ec. 2}$$

$$g_i = \frac{\pi \times DAP^2}{4} \quad \text{Ec. 3}$$

$$G = \bar{g}_i \times fe \quad \text{Ec. 4}$$

$$v_i = g_i \times h_i \times FF_c \quad \text{Ec. 5}$$

$$V = \bar{v}_i \times fe \quad \text{Ec. 6}$$

$$N = \frac{t^2 \times CV^2}{E^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde fe = el factor de expansión, a = el área de la parcela (m²), g_i es el área basal individual (m² árbol⁻¹), DAP es el diámetro a la altura del pecho (m), G es el área basal por hectárea (m² ha⁻¹), \bar{g}_i es el promedio del área basal de los árboles de la parcela (m² árbol⁻¹), v_i es el volumen individual (m³ árbol⁻¹), FF_c es el valor del factor de forma promedio para la clase de diámetro correspondiente de cada

árbol, V es el volumen por hectárea ($m^3 ha^{-1}$), \bar{v}_l es el promedio del volumen de los árboles de la parcela ($m^3 árbol^{-1}$), N es el número de parcelas requeridas; CV el coeficiente de variación de la cobertura obtenido en base al muestreo piloto; t el valor de la distribución t de Student a dos colas con grados de libertad infinitos y un nivel de confianza de 95 % y; E el margen de error aceptable de la estimación.

Tabla No. 1
Intensidad de muestreo por estrato

Estrato	N° de parcelas	Superficie (ha)	Tamaño de parcela (m^2)	Área a relevar por estrato (m^2)	Intensidad de muestreo (%)
2.11a-E. <i>dunnii</i> -2019	12	7,71	300	3600	3,5
2.12-E. <i>dunnii</i> -2019	12	15,01	300	3600	2,2
2.12-E. <i>dunnii</i> -2015	12	13,60	300	3600	2,2
2.21-E. <i>dunnii</i> -2015	12	5,40	300	3600	4,7

3.3 MUESTREO DESTRUCTIVO.

Luego de la realización del inventario, se identificaron las clases de diámetro presentes en las poblaciones, determinando un número de individuos a apelar en base a la frecuencia de las clases. Posteriormente, se seleccionaron un total de 27 árboles para la población de 3 años y 31 árboles para la población de 7 años, utilizados para las evaluaciones de biomasa destructiva, mediante apeo y disección en las siguientes fracciones: fuste, ramas gruesas, ramas finas y hojas. Las ramas fueron separadas en diámetros mayores y menores a 2 cm, para rama gruesas y finas, respectivamente. En la selección de los árboles fueron considerados apenas aquellos individuos que se presentaron sin problemas sanitarios, con fuste recto y copa balanceada, además de estar en plena competencia, sin faltantes o suprimidos al lado.

En las evaluaciones destructivas inicialmente se realizó la cubicación de los individuos, obteniendo el volumen real (Ec. 8) a partir del método de Smalian, el volumen del cilindro (Ec. 9), y posteriormente el factor de forma (FF, Ec. 10). En la cubicación el fuste fue medido a cada 25 cm hasta llegar al metro desde la base, posteriormente se continuó realizando mediciones a cada 1 m de distancia hasta llegar al diámetro de punta fina, el cual fue considerado en 5 cm. Dichas mediciones se realizaron con una forcípula Haglöf Mantax (Haglöf, Långsele, Sweden) y cinta métrica.

$$V_S = \sum \frac{(S_F - S_I)}{2} \times L \quad \text{Ec. 8}$$

$$V_C = \left(\frac{\pi \times DAP^2}{4} \right) \times H_T \quad \text{Ec. 9}$$

$$FF = \frac{V_S}{V_C} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde V_S es el volumen real del fuste (m^3) obtenido a partir del método de Smalian, Σ es la suma de los volúmenes (m^3) de los segmentos del fuste, S_F es el área (m^2) al final del segmento, S_I es el área (m^2) al comienzo del segmento, L es el largo (m) del segmento, VC es el volumen (m^3) del cilindro, π es el número Pi, DAP es el diámetro a la altura del pecho (m), H_T es la altura total (m), FF es el factor de forma.

Luego se procedió a seccionar el fuste con motosierra para poder determinar su peso mediante la utilización de una balanza del tipo báscula de campo. Asimismo, se registró el peso en las restantes fracciones (hojas, ramas finas y ramas gruesas). Posteriormente, de cada individuo apeado fue recolectada una muestra de cada fracción para su posterior análisis en laboratorio.

Figura No. 3

Fotografías del muestreo destructivo a campo.



Nota. 1: apeo del árbol seleccionado. 2: medición de diámetro con forcípula. 3: pesaje de trozas correspondientes a fuste.

Las muestras extraídas a campo de cada fracción e individuo se colocaron en una estufa de circulación de aire forzada a temperatura constante ($60^{\circ}C$) durante 48 horas. Una vez secada las muestras, las mismas fueron utilizadas para la determinación de peso seco y contenido de humedad, con el fin de determinar la materia seca de cada fracción.

A continuación, se presentan las clases diamétricas establecidas para el muestreo destructivo, para ambas edades de plantaciones se tomaron en cuenta el mismo número de clases diamétricas ya que se asemeja a una distribución normal en base a los datos de DAP recabados en el inventario:

Tabla No. 2*Clases diamétricas y número de individuos para E. dunnii de 3 años*

Clase	Clase diamétrica (cm)	N° de individuos
1	5 - 7,99	2
2	8 - 10,99	3
3	11 - 13,99	5
4	14 - 16,99	3
5	≥ 17	2

Tabla No. 3*Clases diamétricas y número de individuos para E. dunnii de 7 años*

Clase	Clase diamétrica (cm)	N° de individuos
1	5 - 9,99	2
2	10 - 14,99	3
3	15 - 19,99	5
4	20 - 24,99	3
5	≥ 25	2

Durante el transcurso de la etapa de campo y evaluación de los muestreos realizados, se buscó representar las clases de diámetros con individuos diferentes entre sí considerando como variable principal el DAP con el fin de contemplar la variabilidad esperada dentro de cada clase.

3.4 SELECCIÓN DE MODELOS INDIVIDUALES PARA CADA FRACCIÓN DE LOS INDIVIDUOS Y AJUSTE SIMULTANEO DE BIOMASA TOTAL.

En esta instancia fueron evaluados 6 modelos de regresión, entre ellos lineales y no lineales, en base a bibliografía consultada, los mismos fueron aplicados para cada fracción de la biomasa y a su vez a la biomasa total. Los predictores que fueron utilizados para ajustar dichos modelos fueron DAP y H_T . El análisis estadístico fue realizado a través del software estadístico R (versión 4.3.1) (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria).

Tabla No. 4
Modelos alométricos ajustados en Rstudio

Modelo	Ecuación
1	$Y = b_0 \times (DAP^{b_1})$
2	$Y = b_0 \times [(DAP^2) \times H_T]^{b_1}$
3	$Y = b_0 \times (DAP^{b_1}) \times (H_T^{b_2})$
4	$Y = \exp [b_0 + b_1 \times \text{Ln} (DAP)]$
5	$Y = b_0 + b_1 \times (DAP^2)$
6	$Y = \exp (b_0 + (b_1 \times DAP) + (b_2 \times (DAP^2)))$

Nota. DAP: diámetro a la altura de pecho; H_T : altura total. Tomado de Hirigoyen et al. (2021).

Para la elección del modelo a utilizar en cada fracción, se consideraron aquellos modelos en los cuales sus parámetros fueran significativos frente a un $P < 0,05$. Luego se prosiguió por ordenarlos en base a los siguientes estadísticos: los valores más altos de varianza explicada por el modelo, utilizando el coeficiente de determinación ajustado (R^2 -aj) y el valor más bajo del error cuadrático medio (RMSE), el cual representa el error relativo medio del modelo. Para garantizar que los modelos cumplieran con los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianza, se aplicaron las pruebas Shapiro Wilks y White, respectivamente, además de la verificación de los gráficos de los valores predichos vs observados, y de los residuos estandarizados vs los valores predichos (Balzarini et al., 2008). Finalmente, para los modelos ajustados por fracción que fueron seleccionados, y de forma de asegurar la aditividad existente entre cada fracción de la biomasa para obtener una estimación eficiente de la biomasa total, se realizó el ajuste simultáneo de la BMT a través del método NSUR en SAS OnDemand for Academics (SAS Institute, NC, EE. UU.).

3.5 DETERMINACIÓN DE CARBONO

De las muestras que fueron utilizadas para la determinación de los contenidos de humedad se extrajo una proporción que fue procesada en un molino para obtener granulometrías adecuadas para la determinación química. Las muestras procesadas de cada fracción fueron unidas considerando un peso para cada una con valores variando en un rango de 0,120 g a 0,130 g, con el fin de generar una muestra compuesta de cada fracción. Con base en la muestra compuesta generada se procedió con la determinación química de la concentración de carbono, asumiendo 5 repeticiones por fracción. Los materiales utilizados en este procedimiento fueron: tubos pyrex con tapa rosca de 40 ml, pipeta automática de 5 ml, dispensador automático ajustable de 15 ml, matraces aforados de 250 ml, bloque digestor, balanza analítica, dicromato de K (K_2CrO_7) ppa, ácido sulfúrico (H_2SO_4) ppa y ftalato de K ($C_8H_5KO_4$) ppa. A continuación, se preparó la curva de calibración a partir de soluciones de ftalato de K con concentraciones de 1500 ppm y 3000 ppm, generando soluciones con cantidades de carbono conocidas que van desde 0 mg a 15 mg.

Tabla No. 5
Curva de calibración

ppm sol de C	ml sol.	ml H ₂ O	mg C
-	0	5	0
1500	2	3	3
1500	4	1	6
3000	3	2	9
3000	5	0	15

El procedimiento por seguir consta de extraer un rango entre 0,0296 g a 0,0306 g de material seco proveniente de la muestra compuesta, el cual fue tratado con 5ml de agua desionizada, 5 ml de una solución de dicromato de K (K_2CrO_7) 1N y 15 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esta combinación de soluciones también fue aplicada a los tubos que se utilizan en la curva de calibración. Enseguida las muestras fueron colocadas en el bloque digestor durante 30 minutos a 150°C, posteriormente las mismas fueron leídas en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 600 nm. Para obtener la concentración de carbono de las muestras, se realizó una regresión lineal con los datos de la curva de calibración, a partir de la cual se estimaron las concentraciones de carbono de las muestras vegetales.

Figura No. 4
Fotografías del proceso de digestión de las muestras para la determinación de carbono dentro de cada fracción.



Nota. 1: Peso de la muestra compuesta. 2: Muestras colocadas dentro de tubos de ensayos rotulados para cada fracción. 3: Tubos colocados en digestor.

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la investigación realizada y los mismos serán agrupados en: (4.1) Factor de forma e inventario forestal, (4.2) modelos de estimación de biomasa y (4.3) stocks de biomasa y carbono forestal.

4.1 FACTOR DE FORMA E INVENTARIO FORESTAL

Luego de los muestreos destructivos a campo se obtuvieron los siguientes valores de factor de forma para las distintas clases de diámetro y edad.

Tabla No. 6

Factor de forma y volúmenes promedio para los árboles evaluados en los muestreos destructivos de las poblaciones de E. dunnii de 3 años

Clases diamétricas	Rango (cm)	FF	FFc	Hc H _T ⁻¹	Vi promedio (m ³ árbol ⁻¹)	Vc promedio (m ³ árbol ⁻¹)
1	5-7,99	0.64	0.38	0.41	0.01	0.01
2	8-10,99	0.53	0.48	0.70	0.04	0.03
3	11-13,99	0.50	0.47	0.75	0.07	0.05
4	14-16,99	0.48	0.46	0.76	0.11	0.08
5	≥ 17	0.44	0.43	0.82	0.14	0.11
Media		0.52	0.44	0.69	0.07	0.06
D.E		0.08	0.04	0.16	0.05	0.04
C.V. (%)		14.60	9.09	23.40	68.94	77.40

Nota. FF: factor de forma. FFc: factor de forma comercial. Hc H_T⁻¹: relación entre altura comercial y altura total. Vi: volumen individual. Vc: volumen comercial. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 7

Factor de forma y volúmenes promedio para los árboles evaluados en los muestreos destructivos de las poblaciones de E. dunnii de 7 años

Clases diamétricas	Rango (cm)	FF	FFc	Hc H _T ⁻¹	Vi promedio (m ³ árbol ⁻¹)	Vc promedio (m ³ árbol ⁻¹)
1	5-9,99	0.55	0.41	0.51	0.03	0.02
2	10-14,99	0.49	0.46	0.77	0.11	0.08
3	15-19,99	0.45	0.44	0.84	0.19	0.16
4	20-24,99	0.46	0.46	0.86	0.31	0.27
5	≥ 25	0.41	0.40	0.84	0.41	0.34
Media		0.47	0.43	0.76	0.21	0.17
D.E		0.05	0.03	0.15	0.15	0.13
C.V. (%)		11.05	6.44	19.12	72.53	76.50

Nota. FF: factor de forma. FFc: factor de forma comercial. Hc H_T⁻¹: relación entre altura comercial y altura total. Vi: volumen individual. Vc: volumen comercial. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Considerando los valores de factor de forma promedio para las clases de diámetro, se observa que en ambas poblaciones el valor más bajo corresponde a la clase 5, mientras que el valor más alto se presentó en la clase 1. Por otra parte, los

valores promedio presentan diferencias, siendo de $0,52 \pm 0,08$ para los individuos con 3 años y de $0,47 \pm 0,05$ para los de 7 años. El coeficiente de variación (C.V.%) para la variable fue similar y relativamente bajo (<15%) en ambas poblaciones. En cuanto al FFc, el mismo presenta un valor similar al FF, lo que está indicando que la porción de fuste cuyo diámetro es menor a 5 cm representa una proporción muy pequeña del volumen total, salvo para la clase de diámetro 1, en la que este segmento corresponde a una mayor proporción.

Seguidamente se presentan de forma resumida los resultados obtenidos de los 2.093 árboles que formaron parte de los inventarios forestales en ambas poblaciones, organizados por parcela para cada estrato.

Tabla No. 8*Resultados de inventario forestal para el estrato 2.11a E. dunnii de 3 años*

Parcela	N parcela ⁻¹	N ha ⁻¹	DAP (cm) promedio	H _T (m) promedio	Hc (m) promedio	gi (m ² árbol ⁻¹)	Gi (m ² ha ⁻¹)	Vi (m ³ árbol ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	Vc (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
1	41	1367	11.93	11.26	8.08	0.0117	15.96	0.0630	86.06	63.97	28.69
2	42	1400	11.78	11.46	8.19	0.0114	15.99	0.0626	87.63	65.05	29.21
3	42	1400	12.28	11.63	8.46	0.0122	17.11	0.0676	94.65	70.41	31.55
4	39	1300	11.78	11.33	8.21	0.0112	14.56	0.0605	78.67	58.18	26.22
5	39	1300	12.16	11.49	8.36	0.0119	15.52	0.0649	84.43	62.75	28.14
6	40	1333	11.92	11.30	8.21	0.0114	15.26	0.0618	82.42	61.09	27.47
7	39	1300	12.29	11.76	8.54	0.0122	15.90	0.0682	88.69	65.94	29.56
8	42	1400	12.12	11.75	8.42	0.0121	16.98	0.0680	95.25	71.08	31.75
9	33	1100	12.87	11.88	8.70	0.0135	14.86	0.0758	83.38	62.53	27.79
10	35	1167	12.15	11.54	8.34	0.0121	14.07	0.0664	77.41	57.85	25.80
11	39	1300	11.60	11.70	8.52	0.0108	14.08	0.0603	78.37	58.06	26.12
12	40	1333	11.60	12.42	9.00	0.0109	14.52	0.0647	86.21	63.85	28.74
Media	39	1308	12.04	11.62	8.42	0.0118	15.40	0.0653	85.26	63.40	28.42
D.E.	3	92	0.36	0.32	0.25	0.0007	1.03	0.0043	5.81	4.38	1.94
C.V. (%)	7.05	7.05	2.97	2.72	3.01	6.2033	6.70	6.6292	6.82	6.91	6.82

Nota. N parcela: número de individuos por parcela. N ha⁻¹: número de individuos por hectárea. DAP: diámetro a la altura del pecho. H_T: altura total. Hc: altura comercial. gi: área basal. Gi: área basal por hectárea. Vi: volumen individual. V: volumen por hectárea. Vc: volumen comercial. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 9*Resultados de inventario forestal para el estrato 2.12 E. dunnii de 3 años*

Parcela	N parcela ⁻¹	N ha ⁻¹	DAP (cm) promedio	H _T (m) promedio	Hc (m) promedio	gi (m ² árbol ⁻¹)	Gi (m ² ha ⁻¹)	Vi (m ³ árbol ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	Vc (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
1	38	1267	12.76	11.83	8.68	0.0131	16.63	0.0731	92.57	69.08	30.86
2	40	1333	12.57	11.55	8.20	0.0134	17.82	0.0736	98.11	73.59	32.70
3	41	1367	11.93	11.30	8.20	0.0115	15.78	0.0619	84.55	62.78	28.18
4	38	1267	12.34	11.52	8.39	0.0123	15.64	0.0673	85.26	63.55	28.42
5	37	1233	11.98	11.41	8.05	0.0117	14.49	0.0638	78.71	58.07	26.24
6	42	1400	12.42	11.73	8.44	0.0126	17.70	0.0697	97.52	72.72	32.51
7	40	1333	12.39	11.58	8.54	0.0123	16.46	0.0678	90.42	67.54	30.14
8	39	1300	12.16	11.43	8.25	0.0121	15.70	0.0655	85.10	63.27	28.37
9	49	1633	11.57	11.37	8.18	0.0109	17.77	0.0591	96.55	71.23	32.18
10	36	1200	12.64	11.61	8.46	0.0130	15.57	0.0710	85.26	63.68	28.42
11	46	1533	11.67	11.02	7.85	0.0111	16.97	0.0578	88.65	65.20	29.55
12	37	1233	12.24	12.51	9.18	0.0121	14.89	0.0712	87.86	65.49	29.29
Media	40	1342	12.22	11.57	8.37	0.0122	16.28	0.0668	89.21	66.35	29.74
D.E.	4	129	0.37	0.36	0.34	0.0008	1.12	0.0053	6.01	4.61	2.00
C.V. (%)	9.60	9.60	3.06	3.13	4.08	6.4208	6.89	7.9138	6.74	6.94	6.74

Nota. N parcela: número de individuos por parcela. N ha⁻¹: número de individuos por hectárea. DAP: diámetro a la altura del pecho. H_T: altura total. Hc: altura comercial. gi: área basal. Gi: área basal por hectárea. Vi: volumen individual. V: volumen por hectárea. Vc: volumen comercial. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 10*Resultados de inventario forestal para el estrato 2.12 E. dunnii de 7 años*

Parcela	N parcela ⁻¹	N ha ⁻¹	DAP (cm) promedio	H _T (m) promedio	Hc (m) promedio	gi (m ² árbol ⁻¹)	Gi (m ² ha ⁻¹)	Vi (m ³ árbol ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	Vc (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
1	49	1633	14.18	16.42	12.54	0.0174	28.49	0.1354	221.18	179.89	31.60
2	51	1700	14.42	16.52	12.79	0.0181	30.82	0.1415	240.49	195.86	34.36
3	50	1667	13.84	16.32	12.53	0.0164	27.27	0.1256	209.41	169.31	29.92
4	53	1767	12.70	15.73	11.42	0.0140	24.80	0.1053	185.99	146.99	26.57
5	36	1200	14.11	16.09	12.30	0.0170	20.39	0.1272	152.65	124.07	21.81
6	41	1367	15.08	16.70	13.47	0.0188	25.65	0.1442	197.05	161.81	28.15
7	52	1733	13.24	15.68	11.71	0.0158	27.33	0.1208	209.44	169.57	29.92
8	36	1200	15.71	16.72	13.53	0.0205	24.60	0.1595	191.42	158.49	27.35
9	45	1500	13.56	16.15	12.29	0.0154	23.14	0.1165	174.73	139.32	24.96
10	48	1600	14.15	16.53	12.76	0.0171	27.32	0.1325	211.96	172.20	30.28
11	47	1567	14.03	16.35	12.45	0.0166	25.96	0.1270	198.98	160.17	28.43
12	47	1567	14.23	16.42	12.54	0.0176	27.52	0.1372	215.01	175.41	30.72
Media	46	1542	14.10	16.30	12.53	0.0171	26.11	0.1311	200.69	162.76	28.67
D.E.	6	192	0.78	0.34	0.60	0.0017	2.69	0.0141	22.94	19.18	3.28
C.V. (%)	12.48	12.48	5.56	2.07	4.82	9.7659	10.32	10.7699	11.43	11.79	11.43

Nota. N parcela: número de individuos por parcela. N ha⁻¹: número de individuos por hectárea. DAP: diámetro a la altura del pecho. H_T: altura total. Hc: altura comercial. gi: área basal. Gi: área basal por hectárea. Vi: volumen individual. V: volumen por hectárea. Vc: volumen comercial. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 11*Resultados de inventario forestal para el estrato 2.21 E. dunnii de 7 años*

Parcela	N parcela ⁻¹	N ha ⁻¹	DAP (cm) promedio	H _T (m) promedio	Hc (m) promedio	gi (m ² árbol ⁻¹)	Gi (m ² ha ⁻¹)	Vi (m ³ árbol ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	Vc (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
1	61	2033	13.72	16.70	12.85	0.0157	32.01	0.1238	251.72	202.11	35.96
2	53	1767	13.69	17.24	13.20	0.0156	27.61	0.1254	221.57	178.41	31.65
3	51	1700	13.38	16.15	12.19	0.0155	26.35	0.1208	205.28	165.38	29.33
4	58	1933	13.60	16.22	12.15	0.0157	30.26	0.1185	229.02	183.10	32.72
5	44	1467	14.39	16.34	12.52	0.0177	25.90	0.1361	199.68	162.33	28.53
6	53	1767	13.78	16.40	12.55	0.0160	28.34	0.1236	218.30	176.03	31.19
7	51	1700	14.91	16.72	13.21	0.0186	31.63	0.1452	246.86	202.38	35.27
8	57	1900	14.45	16.68	12.92	0.0181	34.30	0.1444	274.29	225.49	39.18
9	51	1700	13.15	15.92	12.13	0.0148	25.10	0.1118	190.10	152.37	27.16
10	54	1800	13.30	16.37	12.46	0.0148	26.72	0.1144	205.93	164.46	29.42
11	43	1433	14.59	16.68	13.10	0.0176	25.29	0.1368	196.10	159.15	28.01
12	51	1700	13.41	16.18	12.21	0.0156	26.60	0.1222	207.80	168.24	29.69
Media	52	1742	13.86	16.47	12.62	0.0163	28.34	0.1269	220.55	178.29	31.51
D.E.	5	173	0.58	0.36	0.42	0.0013	3.00	0.0111	25.58	21.65	3.65
C.V. (%)	9.93	9.93	4.15	2.16	3.30	8.0162	10.60	8.7643	11.60	12.14	11.60

Nota. N parcela: número de individuos por parcela. N ha⁻¹: número de individuos por hectárea. DAP: diámetro a la altura del pecho. H_T: altura total. Hc: altura comercial. gi: área basal. Gi: área basal por hectárea. Vi: volumen individual. V: volumen por hectárea. Vc: volumen comercial. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Con respecto a los resultados obtenidos para el inventario de las poblaciones de 3 años, el estrato 2.11a *E. dunnii*-2019 (E1) presentó para las variables DAP, H_T y V_i valores máximos para los promedios de las parcelas de 12,29 cm, 12,42 m y 0,0758 m³ árbol⁻¹, y mínimos de 11,60 cm, 11,26 m y 0,0603 m³ árbol⁻¹, respectivamente. En cuanto al estrato 2.12 *E. dunnii*-2019 (E2), los máximos verificados para DAP, H_T y V_i fueron de 12,76 cm, 12,51 m y 0,0736 m³ árbol⁻¹, y mínimos de 11,57 cm, 11,02 m y 0,0578 m³ árbol⁻¹, respectivamente. Las diferencias en el promedio de las poblaciones, siguiendo las mismas variables, DAP, H_T y V_i fueron de 0,18 cm, 0,05 m y 0,0015 m³ árbol⁻¹. Respecto a las estimaciones a nivel de hectárea, las diferencias en el V y V_c entre los E1 y E2 fueron de 3,95 m³ ha⁻¹ y 2,95 m³ ha⁻¹. Los resultados obtenidos indican pequeñas diferencias de productividad entre los estratos definidos, aunque el E2 fue el estrato que presentó un mayor crecimiento forestal. Finalmente, el IMA representa lo anteriormente mencionado, siendo para E2 29,74 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y E1 28,42 m³ ha⁻¹ año⁻¹.

Los resultados arrojados por la población de 7 años muestran que el estrato 2.12 *E. dunnii*-2015 (E3) presentó para las variables DAP, H_T y V_i valores máximos de los promedios por parcela de 15,71 cm, 16,72 m y 0,1595 m³ árbol⁻¹, y mínimos de 12,70 cm, 15,68 m y 0,1053 m³ árbol⁻¹, respectivamente. En cuanto al estrato 2.21 *E. dunnii*-2015 (E4), los máximos verificados para DAP, H_T y V_i fueron de 14,91 cm, 17,24 m y 0,1452 m³ árbol⁻¹, y mínimos de 13,15 cm, 15,92 m y 0,1118 m³ árbol⁻¹, respectivamente. Las diferencias en el promedio de las poblaciones, siguiendo las mismas variables, DAP, H_T y V_i fueron de 0,24 cm, 0,17 m y 0,0042 m³ árbol⁻¹. Respecto a las estimaciones a nivel de hectárea, las diferencias en el V y V_c fueron de 19,86 m³ ha⁻¹ y 15,53 m³ ha⁻¹. Los resultados obtenidos muestran diferencias de productividad entre los estratos definidos, siendo el E4 el estrato que presentó un mayor crecimiento forestal. El IMA reportado es de 28,67 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y 31,51 m³ ha⁻¹ año⁻¹ para E3 y E4 respectivamente.

4.2 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA

A continuación, se presenta un resumen descriptivo (Tabla No.12) de los árboles seleccionados para las evaluaciones destructivas y para el ajuste de los modelos alométricos de cada población:

Tabla No. 12

Resumen descriptivo de los árboles evaluados en la población E. dunnii de 3 años

Clases diamétricas	Rango de DAP (cm)	N	DAP (cm)	H _T (m)	Hc (m)	BF (kg)	BRG (kg)	BRF (kg)	BH (kg)	BMT (kg)
1	5-7,99	4	6,36	10,63	4,41	7,05	3,47	2,03	0,50	13,04
2	8-10,99	5	9,82	10,97	7,68	20,63	4,31	3,36	2,20	30,51
3	11-13,99	10	12,19	12,07	9,14	34,19	6,32	5,28	3,64	49,43
4	14-16,99	5	14,77	13,42	10,22	51,17	8,84	7,20	4,84	72,05
5	≥ 17	3	17,75	13,35	10,70	70,75	16,14	8,30	8,09	103,28
Media			12,18	12,09	8,43	36,76	7,82	5,24	3,85	53,66
D.E.			4,39	1,30	2,53	25,06	5,09	2,60	2,87	35,37
C.V. (%)			36,06	10,76	30,01	68,18	65,16	49,69	74,53	65,92

Nota. N: número de individuos evaluados. DAP: diámetro a la altura del pecho. H_T: altura total. Hc: altura comercial. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 13

Resumen descriptivo de los árboles evaluados en la población E. dunnii de 7 años

Clases diamétricas	Rango de DAP (cm)	N	DAP (cm)	H _T (m)	Hc (m)	BF (kg)	BRG (kg)	BRF (kg)	BH (kg)	BMT (kg)
1	5-9,99	6	7,95	14,90	7,39	15,65	3,36	0,72	0,97	20,70
2	10-14,99	7	12,95	16,71	13,01	50,98	4,44	1,59	1,91	58,92
3	15-19,99	10	17,39	17,91	15,16	95,06	7,90	3,33	3,34	109,64
4	20-24,99	5	21,96	18,69	16,08	144,44	17,83	4,79	6,46	173,52
5	≥ 25	3	26,39	18,35	14,98	225,69	37,64	6,28	5,69	275,30
Media			17,33	17,31	13,32	106,36	14,23	3,34	3,67	127,61
D.E.			7,26	1,54	3,50	82,33	14,28	2,27	2,36	100,49
C.V. (%)			41,88	8,90	26,25	77,40	100,30	68,03	64,32	78,74

Nota. N: número de individuos evaluados. DAP: diámetro a la altura del pecho. H_T: altura total. Hc: altura comercial. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Para la población de 3 años, las variables DAP y H_T presentan un valor mínimo de 5,16 cm y 7,05 m y máximo de 18,14 cm y 14,40 m respectivamente. Considerando la biomasa en las fracciones BF, BRG, BRF, BH y la BMT los valores mínimos fueron 1,80 kg, 2,82 kg, 0,83 kg, 0,31 kg y 5,84 kg respectivamente. Para la misma secuencia de variables, los máximos verificados fueron de 73,84 kg, 18,79 kg, 10,11 kg, 8,64 kg y 110,28 kg respectivamente.

Por su parte, para las variables DAP y H_T , la población de 7 años presenta un valor mínimo de 5,98 cm y 12,50 m y máximo de 26,67 cm y 19,35 m respectivamente. En cuanto a la biomasa en las fracciones BF, BRG, BRF, BH y la BMT los valores mínimos verificados fueron 2,72 kg, 1,27 kg, 0,35 kg, 0,23 kg y 6,93 kg respectivamente. Con respecto a los máximos verificados siguiendo las mismas variables fueron 235,97 kg, 44,73 kg, 7,83 kg, 7,90 kg y 293,84 kg respectivamente.

Seguidamente, los modelos individuales seleccionados para cada fracción entre el total de modelos evaluados (ver tabla No.4) cumplieron con los supuestos presentados en el capítulo 3.4 de la metodología y los gráficos del análisis de dispersión de los residuos que se presentan en anexos. A continuación, la Tabla No.14 presenta los modelos seleccionados para cada población, en conjunto con indicadores de calidad de ajuste:

Tabla No. 14

Modelos alométricos individuales ajustados por fracción para E. dunnii de 3 años

Fracción	Ecuación	R ² -aj	RMSE
BH	$\exp [-4,4542 + 2,2689 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	79,82	1,03
BRG	$\exp [-2,7946 + 1,8820 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	82,21	1.56
BRF	$\exp [-2,1290 + 1,5064 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	70,99	1,31
BF	$-2,975516 + 0, 244859 \times \text{DAP}^2$	97,69	2,89
BMT	$\exp [0,624583 + 0,356799 \times \text{DAP} + (-0,007362) \times \text{DAP}^2]$	98,19	3,57

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. R²-aj: coeficiente de determinación ajustado. RMSE: error cuadrático medio.

Tabla No. 15

Modelos alométricos individuales ajustados por fracción para E. dunnii de 7 años

Fracción	Ecuación	R ² -aj	RMSE
BH	$\exp [-2,688588 + 0,346718 \times \text{DAP} + (-0,006677) \times \text{DAP}^2]$	77,05	0,98
BRG	$\exp [-7,0647 + 3,2383 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	90,61	2,98
BRF	$\exp [-2,774792 + 0,326664 \times \text{DAP} + (-0,005752) \times \text{DAP}^2]$	71,62	1,13
BF	$0,019033 \times [(\text{DAP}^2) \times H_T]^{0,987463}$	96,91	10,66
BMT	$\exp [1,3869910 + 0,2469331 \times \text{DAP} + (-0,0033369) \times \text{DAP}^2]$	96,38	13,92

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. R²-aj: coeficiente de determinación ajustado. RMSE: error cuadrático medio.

En todos los modelos de ambas poblaciones la variable predictora que tuvo mayor influencia en el ajuste de los modelos fue el DAP, aunque en la fracción BF para la población de 7 años, el modelo con mejor ajuste contenía también la H_T . En cuanto a los valores de R²-aj, se puede destacar que las fracciones más variables fueron las de BRG, BRF y BH, resultando en modelos con un menor grado de ajuste, mientras que la BF y BMT presentaron el mayor grado de ajuste en ambas

poblaciones, con menor variación en función de los cambios de DAP y, por tanto, estimaciones más precisas.

Luego de ajustar individualmente cada componente de la BMT se generó el ajuste de modelos simultáneos conforme descrito en el apartado 3.4 del capítulo de la metodología. Seguidamente, se presentan los modelos para cada población:

Tabla No. 16

Modelos simultáneos por fracción ajustados a través del procedimiento NSUR para E. dunnii de 3 años

Fracción	Ecuación	R ² -aj	RMSE
BH	$\exp [-4,54119 + 2,302083 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	80,64	1,01
BRG	$\exp [-2,64692 + 1,824625 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	82,43	1,55
BRF	$\exp [-2,25876 + 1,554458 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	72,09	1,29
BF	$-2,90528 + 0,243861 \times \text{DAP}^2$	97,80	2,82
BMT	BH + BRG + BRF + BF	98,23	3,52

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. R²-aj: coeficiente de determinación ajustado. RMSE: error cuadrático medio.

Tabla No. 17

Modelos simultáneos por fracción ajustados a través del procedimiento NSUR para E. dunnii de 7 años

Fracción	Ecuación	R ² -aj	RMSE
BH	$\exp [-4,25477 + 0,504235 \times \text{DAP} + (-0,01046) \times \text{DAP}^2]$	78,87	0,95
BRG	$\exp [-7,27102 + 3,306593 \times \text{Ln} (\text{DAP})]$	91,15	2,89
BRF	$\exp [-2,90614 + 0,340286 \times \text{DAP} + (-0,00608) \times \text{DAP}^2]$	73,77	1,09
BF	$0,018681 \times [(\text{DAP}^2) \times \text{H}_T]^{0,989702}$	97,02	10,47
BMT	BH + BRG + BRF + BF	96,89	13,96

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. R²-aj: coeficiente de determinación ajustado. RMSE: error cuadrático medio.

Como resultado del ajuste simultáneo, se pudo lograr un leve incremento en el nivel de ajuste para los distintos modelos de cada fracción en comparación al método de ajuste individual. Para BMT, el método NSUR logró un R²-aj de 98,23% para *E. dunnii* de 3 años y 96,89% para *E. dunnii* de 7 años, en contraposición, el ajuste individual alcanzó 98,19% y 96,38% respectivamente. Este método asegura una estimación más eficiente para el cálculo de BMT garantizando la aditividad entre sus componentes (Hirigoyen et al., 2021).

4.3 STOCK DE BIOMASA Y CARBONO FORESTAL

En este último apartado se presentan los valores estimados para cada fracción de biomasa y carbono forestal, estos valores resultan de aplicar los modelos presentados previamente al total de los árboles mensurados en los inventarios de ambas poblaciones y el contenido de carbono por fracción en ambas poblaciones.

A continuación, la tabla 18 muestra las concentraciones de carbono presente en cada fracción en ambas poblaciones, mientras que las Tablas No. 18, 19, 20 y 21 presentan los stocks de biomasa y C de las diferentes fracciones, para los E1, E2, E3 y E4, respectivamente.

Tabla No. 18

Concentraciones promedio de carbono para cada fracción de la biomasa para E. dunnii de 3 y 7 años

Fracción	% C por fracción para E. dunnii de 3 años		% C por fracción para E. dunnii de 7 años	
	g kg	%	g kg	%
F	438.256	43.826%	432.728	43.273%
RG	430.919	43.092%	421.476	42.148%
RF	426.672	42.667%	450.768	45.077%
H	426.283	42.628%	459.862	45.986%
Media	430.533	43.053%	441.209	44.121%
D.E.	4.816	0.005	15.005	0.015
C.V. (%)	1.119	1.119	3.401	3.401

Nota. F: fuste. RG: ramas gruesas. RF: ramas finas. H: hojas.

Los valores obtenidos de concentración de carbono en ambas poblaciones resultaron semejantes entre las diferentes fracciones de la biomasa. En cuanto al contenido promedio de carbono, la población de 7 años fue 1,068% superior a la población de 3 años, asumiendo que la diferencia promedio entre poblaciones no fue significativa.

Tabla No. 19*Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.11a E. dunnii de 3 años*

Parcela	Valores de biomasa por fracción					Valores de C por fracción				
	BF	BRG	BRF	BH	BT	BF	BRG	BRF	BH	BT
	Mg ha ⁻¹					Mg C ha ⁻¹				
1	45.58	9.23	6.87	4.67	66.35	19.98	3.98	2.93	1.99	28.88
2	45.59	9.26	6.91	4.67	66.43	19.98	3.99	2.95	1.99	28.91
3	49.07	9.87	7.32	5.03	71.29	21.51	4.25	3.12	2.14	31.03
4	41.42	8.47	6.36	4.22	60.46	18.15	3.65	2.71	1.80	26.31
5	44.40	8.98	6.68	4.54	64.59	19.46	3.87	2.85	1.93	28.11
6	43.51	8.86	6.64	4.43	63.44	19.07	3.82	2.83	1.89	27.61
7	45.60	9.17	6.80	4.67	66.25	19.99	3.95	2.90	1.99	28.84
8	48.67	9.78	7.23	5.01	70.69	21.33	4.21	3.09	2.14	30.77
9	42.94	8.49	6.20	4.44	62.07	18.82	3.66	2.65	1.89	27.02
10	40.29	8.11	6.02	4.14	58.55	17.66	3.50	2.57	1.76	25.48
11	39.95	8.22	6.20	4.06	58.42	17.51	3.54	2.65	1.73	25.42
12	41.20	8.46	6.37	4.19	60.22	18.06	3.65	2.72	1.79	26.21
Media	44.02	8.91	6.63	4.51	64.06	19.29	3.84	2.83	1.92	27.88
D.E.	2.91	0.55	0.40	0.31	4.15	1.27	0.24	0.17	0.13	1.81
C.V.(%)	6.60	6.20	5.97	6.87	6.47	6.60	6.20	5.97	6.87	6.47

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 20*Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.12 E. dunnii de 3 años*

Parcela	Valores de biomasa por fracción					Valores de C por fracción				
	BF	BRG	BRF	BH	BT	BF	BRG	BRF	BH	BT
	Mg ha ⁻¹					Mg C ha ⁻¹				
1	47.94	9.54	7.01	4.93	69.42	21.01	4.11	2.99	2.10	30.21
2	51.44	10.14	7.37	5.37	74.32	22.55	4.37	3.14	2.29	32.35
3	45.03	9.15	6.83	4.60	65.61	19.74	3.94	2.92	1.96	28.55
4	44.89	9.01	6.67	4.60	65.18	19.67	3.88	2.85	1.96	28.37
5	41.40	8.38	6.23	4.24	60.25	18.15	3.61	2.66	1.81	26.22
6	50.88	10.16	7.49	5.24	73.77	22.30	4.38	3.19	2.23	32.11
7	47.24	9.50	7.04	4.83	68.62	20.71	4.09	3.00	2.06	29.86
8	44.96	9.06	6.71	4.61	65.35	19.71	3.90	2.87	1.97	28.44
9	50.42	10.35	7.79	5.13	73.70	22.10	4.46	3.33	2.19	32.07
10	44.85	8.93	6.57	4.62	64.97	19.66	3.85	2.80	1.97	28.28
11	48.24	9.87	7.41	4.92	70.44	21.14	4.25	3.16	2.10	30.65
12	42.64	8.60	6.40	4.36	62.00	18.69	3.71	2.73	1.86	26.99
Media	46.66	9.39	6.96	4.79	67.80	20.45	4.05	2.97	2.04	29.51
D.E.	3.10	0.61	0.46	0.33	4.47	1.36	0.26	0.20	0.14	1.94
C.V.(%)	6.63	6.53	6.57	6.91	6.59	6.63	6.53	6.57	6.91	6.59

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Para la población de 3 años, el E1 muestra para las fracciones BF, BRG, BRF, BH y BMT valores máximos de biomasa de 49,07 Mg ha⁻¹, 9,87 Mg ha⁻¹, 7,32 Mg ha⁻¹, 5,03 Mg ha⁻¹ y 71,29 Mg ha⁻¹ respectivamente, y mínimos de 39,95 Mg ha⁻¹, 8,11 Mg ha⁻¹, 6,02 Mg ha⁻¹, 4,06 Mg ha⁻¹ y 58,42 Mg ha⁻¹ respectivamente. Por su parte, la biomasa acumulada en las fracciones BF, BRG, BRF, BH y BMT del estrato E2 presenta valores máximos de 51,44 Mg ha⁻¹, 10,35 Mg ha⁻¹, 7,79 Mg ha⁻¹, 5,37 Mg ha⁻¹ y 74,32 Mg ha⁻¹ respectivamente, a su vez, los valores mínimos para las fracciones en cuestión fueron 41,40 Mg ha⁻¹, 8,38 Mg ha⁻¹, 6,23 Mg ha⁻¹, 4,24 Mg ha⁻¹ y 60,25 Mg ha⁻¹ respectivamente. En cuanto al valor promedio de la BMT entre las poblaciones de 3 años reporta para E1 64,06 Mg ha⁻¹ ± 4,15 Mg ha⁻¹, mientras que el valor de BMT para E2 es de 67,80 Mg ha⁻¹ ± 4,47 Mg ha⁻¹.

A partir de los datos de biomasa y los valores de carbono en cada fracción (tabla No.18), fue cuantificado el stock de carbono. Para las fracciones BF, BRG, BRF, BH y BMT del E1 los valores máximos verificados fueron de 21,51 Mg C ha⁻¹, 4,25 Mg C ha⁻¹, 3,12 Mg C ha⁻¹, 2,14 Mg C ha⁻¹ y 31,03 Mg C ha⁻¹ respectivamente, por otra parte, los valores mínimos reportados para las mismas variables fueron 17,51 Mg C ha⁻¹, 3,50 Mg C ha⁻¹, 2,57 Mg C ha⁻¹, 1,73 Mg C ha⁻¹ y 25,42 Mg C ha⁻¹. Los valores máximos de stock de carbono para E2 en las fracciones BF, BRG, BRF, BH y BMT son 22,55 Mg C ha⁻¹, 4,46 Mg C ha⁻¹, 3,33 Mg C ha⁻¹, 2,29 Mg C ha⁻¹ y 32,35 Mg C ha⁻¹, siguiendo esta línea, los mínimos reportados para las distintas fracciones fueron 18,15 Mg C ha⁻¹, 3,61 Mg C ha⁻¹, 2,66 Mg C ha⁻¹, 1,81 Mg C ha⁻¹ y 26,22 Mg C ha⁻¹. Para la fracción BMT el valor promedio de stock de carbono en el E1 es de 27,88 Mg C ha⁻¹ ± 1,81 Mg C ha⁻¹, mientras que para el E2 es de 29,51 Mg C ha⁻¹ ± 1,94 Mg C ha⁻¹.

Finalmente, analizando los datos obtenidos, el E2 es quien logró una mayor acumulación de biomasa forestal y en consecuencia un mayor stock de carbono, esto puede corresponderse a su vez con el mayor valor de IMA promedio alcanzado en dicha población (ver tablas No.8 y No.9)

Tabla No. 21

Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.12 E. dunnii de 7 años

Parcela	Valores de biomasa por fracción					Valores de C por fracción				
	BF	BRG	BRF	BH	BT	BF	BRG	BRF	BH	BT
	Mg ha ⁻¹					Mg C ha ⁻¹				
1	108.69	10.20	3.73	4.19	126.80	47.03	4.30	1.68	1.92	54.93
2	118.13	11.82	3.90	4.25	138.09	51.11	4.98	1.76	1.95	59.81
3	102.20	9.16	3.55	3.96	118.87	44.22	3.86	1.60	1.82	51.51
4	91.26	7.73	3.21	3.52	105.72	39.49	3.26	1.45	1.62	45.81
5	75.40	6.88	2.69	3.07	88.04	32.63	2.90	1.21	1.41	38.15
6	96.31	8.87	3.39	3.89	112.46	41.67	3.74	1.53	1.79	48.73
7	102.44	9.47	3.58	4.00	119.49	44.33	3.99	1.61	1.84	51.77
8	92.41	9.19	3.25	3.69	108.54	39.98	3.87	1.46	1.70	47.02
9	85.00	7.25	2.99	3.32	98.56	36.78	3.05	1.35	1.53	42.71
10	103.28	9.44	3.58	4.02	120.32	44.69	3.98	1.61	1.85	52.13
11	97.01	8.59	3.39	3.80	112.79	41.98	3.62	1.53	1.75	48.87
12	104.10	10.13	3.55	3.89	121.67	45.04	4.27	1.60	1.79	52.70
Media	98.02	9.06	3.40	3.80	114.28	42.41	3.82	1.53	1.75	49.51
D.E.	10.73	1.31	0.32	0.33	12.62	4.64	0.55	0.14	0.15	5.46
C.V.(%)	10.95	14.41	9.28	8.77	11.04	10.95	14.41	9.28	8.77	11.03

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Tabla No. 22*Estimación de stock de biomasa y carbono forestal a nivel de parcela por hectárea para 2.21 E. dunnii de 7 años*

Parcela	Valores de biomasa por fracción					Valores de C por fracción				
	BF	BRG	BRF	BH	BT	BF	BRG	BRF	BH	BT
	Mg ha ⁻¹					Mg C ha ⁻¹				
1	122.44	10.15	4.14	4.59	141.31	52.98	4.28	1.86	2.11	61.23
2	108.55	8.69	3.57	3.96	124.76	46.97	3.66	1.61	1.82	54.06
3	99.72	8.81	3.41	3.75	115.69	43.15	3.71	1.54	1.73	50.12
4	112.40	9.74	3.93	4.36	130.43	48.64	4.11	1.77	2.01	56.52
5	97.35	9.06	3.41	3.86	113.68	42.12	3.82	1.54	1.77	49.25
6	106.96	9.15	3.70	4.15	123.96	46.28	3.86	1.67	1.91	53.71
7	119.95	11.20	4.15	4.70	140.00	51.90	4.72	1.87	2.16	60.66
8	133.63	12.44	4.53	5.13	155.72	57.82	5.24	2.04	2.36	67.46
9	92.62	7.80	3.24	3.58	107.25	40.08	3.29	1.46	1.65	46.48
10	100.32	8.20	3.44	3.78	115.73	43.41	3.46	1.55	1.74	50.15
11	95.40	8.49	3.31	3.74	110.94	41.28	3.58	1.49	1.72	48.07
12	100.99	9.04	3.45	3.79	117.27	43.70	3.81	1.55	1.74	50.81
Media	107.53	9.40	3.69	4.12	124.73	46.53	3.96	1.66	1.89	54.04
D.E.	11.94	1.26	0.39	0.46	13.96	5.17	0.53	0.18	0.21	6.05
C.V.(%)	11.11	13.43	10.54	11.13	11.19	11.11	13.43	10.54	11.13	11.19

Nota. BF: biomasa de fuste. BRG: biomasa de ramas gruesas. BRF: biomasa de ramas finas. BH: biomasa de hojas. BMT: biomasa total. D.E.: desvío estándar. C.V.(%): coeficiente de variación.

Por su parte, la población de 7 años muestra una diferencia entre el valor máximo y mínimo para las fracciones BF, BRG, BRF, BH y BMT del estrato E3 de 42,73 Mg ha⁻¹, 4,94 Mg ha⁻¹, 1,21 Mg ha⁻¹, 1,18 Mg ha⁻¹ y 50,05 Mg ha⁻¹ respectivamente, así mismo, el estrato E4 presenta diferencias para la misma secuencia de variables de 41,01 Mg ha⁻¹, 4,64 Mg ha⁻¹, 1,29 Mg ha⁻¹, 1,55 Mg ha⁻¹ y 48,47 Mg ha⁻¹ respectivamente. En cuanto a los valores promedio de la BMT entre las poblaciones de 7 años, para E3 114,28 Mg ha⁻¹ ± 12,62 Mg ha⁻¹, mientras que el valor de BMT para E4 es de 124,73 Mg ha⁻¹ ± 13,96 Mg ha⁻¹.

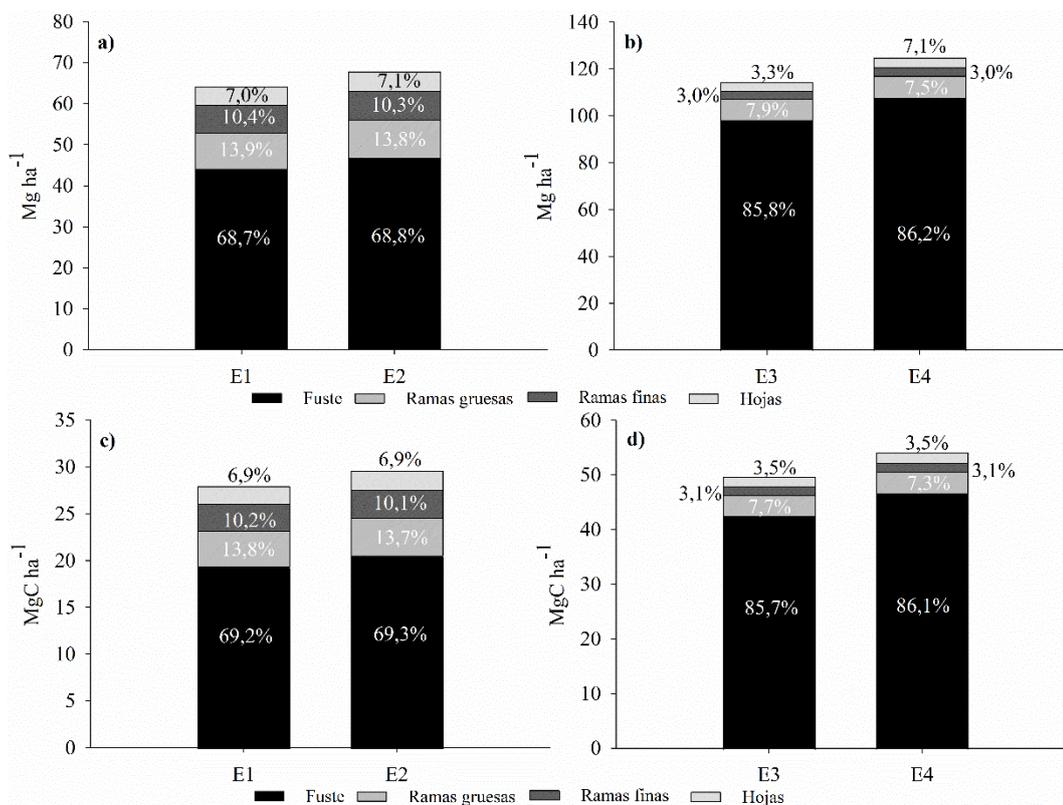
Una vez obtenidos los valores de biomasa y carbono en cada fracción (tabla No.18), fue cuantificado el stock de carbono. Para las fracciones BF, BRG, BRF, BH y BMT del E3 las diferencias verificadas entre los valores máximos y mínimos de 18,48 Mg C ha⁻¹, 2,08 Mg C ha⁻¹, 0,55 Mg C ha⁻¹, 0,54 Mg C ha⁻¹ y 21,66 Mg C ha⁻¹ respectivamente, siguiendo esta línea, el estrato E4 muestra diferencias para la misma secuencia de variables de 17,74 Mg C ha⁻¹, 1,95 Mg C ha⁻¹, 0,58 Mg C ha⁻¹, 0,71 Mg C ha⁻¹ y 21,16 Mg C ha⁻¹ respectivamente. Para la fracción BMT el valor promedio de stock de carbono en el E3 es de 49,51 Mg C ha⁻¹ ± 5,46 Mg C ha⁻¹, mientras que para el E4 es de 54,04 Mg C ha⁻¹ ± 6,05 Mg C ha⁻¹.

Por último, tal como fue analizado en la población de 3 años, se puede verificar que el E4 es quien presenta el mayor valor promedio de biomasa acumulada y, por ende, un mayor stock de carbono. Así mismo, se corresponde al estrato cuyo valor de IMA fue más elevado en comparación al E3 (ver tabla No.10 y No.11).

Para concluir el presente apartado, luego de estimar el contenido de biomasa y stock carbono para cada fracción de los 2.093 árboles mensurados en los inventarios, se puede exponer que, en los 4 estratos analizados, la variable que representó una mayor proporción tanto de la BMT como del total de carbono acumulado fue la fracción de BF, seguida por BRG, siendo el resto de las fracciones (BRF y BH) las que presentan una menor proporción. Por otra parte, cabe destacar, que el porcentaje de la fracción BF, es mayor para la población de 7 años, en comparación con la población de 3 años debido a la etapa de crecimiento en las que se encuentran ambas poblaciones al momento de realizar el estudio (ver figura No.5).

Figura No. 5

Biomasa acumulada y contenido de carbono (%) promedio en las distintas fracciones para E. dunnii de 3 y 7 años



Nota. a) Biomasa para *E. dunnii* con 3 años, b) Biomasa para *E. dunnii* con 7 años, c) Stock de carbono para *E. dunnii* con 3 años, d) Stock de carbono para *E. dunnii* con 7 años.

5. DISCUSIÓN

En el siguiente apartado serán discutidos los resultados obtenidos durante la investigación con el fin de alcanzar un mayor entendimiento de los valores que se obtuvieron para cada variable analizada y expresar la calidad de estos. Para esto, dichas variables serán expuestas siguiendo la estructura y ordenamiento presente en el apartado de resultados (capítulo 4).

El análisis realizado sobre la variable factor de forma comercial en ambas poblaciones muestra un resultado similar al comparar los valores promedios, siendo 0,44 para *E. dunnii* de 3 años y 0,43 para *E. dunnii* de 7 años. En este sentido, la desviación estándar que presentan ambos resultados se muestra similares, sin embargo, el C.V. es mayor para la población de 3 años presentando un valor de 9,09 % mientras que el de la población de 7 años es de 6,44 % aunque ambos pueden ser considerados bajos. El rango de valores obtenido cuenta con un mínimo de 0,21 para ambas poblaciones, y máximos de 0,53 y 0,74 para las edades de 3 y 7 años respectivamente. Según un estudio realizado por González y Lago (2006), el factor de forma para *E. dunnii* es de 0,42 y 0,41, para poblaciones de 12 y 10 años respectivamente, cabe destacar que dicho estudio fue realizado sobre suelos de grupo CONEAT 9.1 y 9.3 en el departamento de Rio Negro. Dado que el factor de forma es una variable que resulta de la relación entre el volumen real y el volumen del cilindro, y así contempla la altura del árbol y su área basal, este se encuentra directamente influenciado por la calidad del sitio forestal. En este sentido, el índice de sitio es determinado por la altura media dominante de una población coetánea y homogénea (Prodan et al., 1997). A su vez, se puede constatar que el factor de forma también presenta diferencias a nivel de especie, siendo 0,46 y 0,40 para *Eucalyptus grandis* de 12 y 10 años respectivamente y 0,42 y 0,41, para poblaciones de 12 y 10 años de *Eucalyptus dunnii* (González & Lago, 2006).

En cuanto a los resultados obtenidos en el inventario forestal, se verifican diferencias en los promedios entre las poblaciones bajo análisis, determinadas principalmente por su estructura etaria. En esta línea, para la población de 3 años al comparar entre estratos se muestra que el DAP presenta una diferencia promedio de 0,18 cm, siendo el estrato E2 superior. Para el D.E. y el C.V. (%) no se obtuvieron diferencias marcadas (ver tabla No.8 y No.9). Por su parte, la variable H_T para ambos estratos mostró una tendencia similar donde no se constató a nivel promedio diferencias de gran magnitud, siendo esta de 0,5 m. Además, no solo los estratos presentaron pequeñas diferencias en sus promedios para esta variable, sino que también muestran bajos niveles de variación, constatadas a partir de D.E. y C.V. (%) (ver tabla No.8 y No.9). En cuanto al V_i promedio entre estratos, para el estrato E1 fue de $0,0653 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \pm 0,0043 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y el estrato E2 $0,0668 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \pm 0,0053 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, la diferencia existente entre ambos estratos fue de $0,0025 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ registrando un mayor valor de productividad en E2. En este sentido, a nivel de hectárea las variables V y V_c se observaron diferencias entre ambos estratos, en E1 los valores verificados fueron de $85,26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $63,40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ respectivamente, mientras que para el E2 los valores registrados para ambas variables fueron de $89,21 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $66,35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Por otra parte, la población *E. dunnii* de 7 años mostró un comportamiento distinto. Empezando por el DAP, la diferencia encontrada entre ambos estratos es de 0,24 cm, siendo superior en el estrato E3. Al mismo tiempo, la H_T muestra un comportamiento menos fluctuante, registrando un valor de 16,30 m en E3 y 16,47 m para E4, las medidas de D.E. y C.V. (%) mantuvieron la tendencia del valor promedio (ver tabla No.10 y tabla No.11). En cuanto al V_i promedio entre estratos, para el estrato E3 fue de $0,1311 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \pm 0,0141 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y el estrato E4 $0,1269 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \pm 0,0111 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, la diferencia existente entre ambos estratos fue de $0,0042 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ evidenciándose una mayor productividad a nivel de árbol en E3. Para las variables V y Vc se observaron diferencias, los valores verificados para E3 fueron $200,69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $162,76 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ respectivamente, mientras que, para E4 los valores reportados para ambas variables fueron $220,55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $178,29 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ respectivamente.

En el caso de la variable IMA, los valores promedios para cada estrato de las poblaciones muestran diferentes comportamientos. Para la población de 3 años, el IMA reportado no muestra diferencias significativas entre estratos, esto se debe principalmente a que la población aún no se encuentra en estricta competencia, el estrato E1 reporta un IMA promedio de $28,42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \pm 1,94 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y E2 $29,74 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \pm 2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Para la población de 7 años se observó una diferencia mayor entre valores promedios para la misma variable, consecuencia de la competencia existente, por su parte el estrato E3 tiene un IMA de $28,67 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \pm 3,28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y E4 fue el estrato más productivo, obteniendo un IMA promedio de $31,51 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \pm 3,65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Analizando ambas poblaciones, se observa que el E3 obtiene un valor promedio inferior al E2 pese a estar en el mismo CONEAT, esto está explicado por la competencia existente entre individuos de mayor edad, donde el IMA se comienza a estabilizar, en cuanto, el E4 se mantiene en la etapa exponencial del crecimiento. Un trabajo realizado por Cárdenas (2016) reporta un IMA de $25,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para una plantación de *Eucalyptus dunnii* de 11 años sobre suelos pertenecientes a los grupos 0.93, 9.1 y 9.3. Siguiendo esta línea, un ensayo realizado por Balmelli et al. (2012) sobre una población de la misma especie a los 11 años muestra un comportamiento productivo mayor, alcanzando un IMA de $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ sobre suelos pertenecientes al grupo CONEAT 7.32. Dentro de este marco, Resquin (2019), analizó el valor de IMA para *E. dunnii* a los 57 meses de edad, donde para una densidad de 2220 árboles por hectárea sobre suelos del grupo CONEAT 7.32 el valor registrado fue de $43,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, por otra parte, en suelos del grupo CONEAT 9.3 para la misma plantación el valor de IMA fue de $53,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Los valores de IMA obtenidos en este estudio son compatibles con los verificados en la literatura, aunque las variaciones de crecimiento pueden estar asociadas a las diferentes calidades de sitio de cada estudio, en conjunto con factores como densidad de las plantaciones, prácticas silviculturales adoptadas y calidades de los materiales genéticos utilizados.

En cuanto a los modelos alométricos individuales ajustados en la presente investigación, las variables independientes utilizadas fueron DAP y H_T , donde en la población de 3 años el predictor más eficiente para estimar la biomasa en cada fracción fue el DAP, en este sentido, la población de 7 años tuvo a su vez, la inclusión de la variable H_T para la estimación de la BF. Esta condición puede estar

asociada a que, en la población de 7 años, la variación de la biomasa fustal es mayor respecto a la obtenida a los 3 años, y en ese caso, la inclusión de la H_T como predictora permitió una mayor precisión en las estimaciones. Comparando ambas poblaciones se observa que las fracciones más variables respecto al aumento de la variable DAP fueron BRG y BH. Para la población de 3 años dichas fracciones reportaron un valor de R^2 -aj de 82,21% y 79,82% respectivamente, en cambio, la población de 7 años reporta valores de R^2 -aj de 90,61% y 77,05% para BRG y BH respectivamente. Esta condición entre edades se presenta a su vez en la BMT, siendo el valor de R^2 -aj para la población de 3 años 98,19% y para 7 años 96,38%.

Al aplicar el método NSUR se obtuvo aditividad entre las fracciones de la biomasa (BF, BRG, BRF y BH) en modelos alométricos individuales, posibilitando una precisa estimación de la BMT. En un estudio realizado por Parresol (2001) se evidencia la importancia de considerar la aditividad de estos modelos independientes a la hora de modelar la BMT. Hirigoyen et al. (2021) en una investigación sobre *E. dunnii* donde realizaron el ajuste de ecuaciones para la estimación de biomasa utilizando el método NSUR reporta valores de R^2 -aj de 97% para la BMT. A su vez, Trautenmüller et al. (2021) realizaron el ajuste de modelos aplicando el método NSUR para estimar la biomasa aérea y sus fracciones en bosques nativos del sur de Brasil, donde el valor de R^2 -aj alcanzado para la BMT fue de 97,95%. Dichos valores en comparación con los obtenidos en la presente investigación muestran semejanzas, por lo cual puede asumirse una correcta modelación de la BMT con la aplicación del método NSUR.

En cuanto a los contenidos de biomasa, para las fracciones analizadas se encontró que, en la fracción correspondiente al fuste dentro de la población de 3 años, el valor osciló entre 44,02 Mg ha⁻¹ y 46,66 Mg ha⁻¹, siendo mayor en el estrato E2. Por su parte, la BMT para esta población alcanzó una mayor producción dentro del estrato E2 en comparación al estrato E1 (ver tablas No.19 y No.20). En este contexto, la población de 7 años mostró un comportamiento diferente, donde tanto para BF como BMT se verifica que las variaciones entre estratos son mayores a las encontradas en la población de 3 años. Para el valor promediado de BF y BMT, el estrato E4 alcanzó un mayor nivel productivo, obteniendo una diferencia de productividad de 9,51 Mg ha⁻¹ respecto al E3 para BF, mientras que, para la BMT, la diferencia obtenida fue 10,45 de Mg ha⁻¹. Se destaca que, para ambas poblaciones, en las restantes fracciones (BRG, BRF y BH) no hay diferencias marcadas en los valores promedios al comparar entre estratos dentro de cada población (ver tablas No.21 y No.22). Hernández-Ramos et al. (2017) estimaron la biomasa aérea en *Eucalyptus urophylla*, donde se verificó que el valor de la BMT estimado para la edad de 7 años fue de 156,08 Mg ha⁻¹. Cabe destacar que la estructura etaria que constituyó la población bajo estudio fue desde 1 año hasta los 7 años y se la estudió de forma conjunta. Por otra parte, Gerding et al. (2006) realizaron la estimación de la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus nitens* con edad de 4 a 7 años, la BMT a los 4 años habría alcanzado valores de 73,1 Mg ha⁻¹ y a los 6 años 159,5 Mg ha⁻¹.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el stock de carbono total promedio (Mg C ha⁻¹) muestra una leve diferencia entre estratos para la población

de 3 años, siendo esta de 1,63 Mg C ha⁻¹ y en la población de 7 años la diferencia entre los estratos asumió un valor de 4,12 Mg C ha⁻¹, con mayor stock de carbono en el E4. En este sentido, la BF fue la fracción de mayor aporte al stock de carbono total de las poblaciones de ambas edades. Para las fracciones RG, RF y H, si bien se observa una participación menor en el aporte al stock total de carbono en ambas poblaciones, en la edad de 3 años, las fracciones mencionadas presentan un mayor aporte al C de la BMT respecto a la edad de 7 años. Los valores promedios alcanzados para las variables BRG, BRF y BH entre estratos para la población de 3 años fueron de 3,95 Mg C ha⁻¹, 2,90 Mg C ha⁻¹ y 1,98 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Siguiendo esta línea, el stock de carbono promedio entre estratos para la población de 7 años para la misma secuencia de variables fue de 3,89 Mg C ha⁻¹, 1,60 Mg C ha⁻¹ y 1,82 Mg C ha⁻¹, respectivamente. En un estudio destinado a cuantificar el stock de carbono en los componentes de la biomasa, Viera y Rodríguez (2019) cuantificaron la biomasa sobre híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* de 10 años constatando que la fracción del fuste presentaba 103,40 Mg C ha⁻¹, en tanto, las ramas el valor cuantificado fue de 4,46 Mg C ha⁻¹ y las hojas apenas 2,02 Mg C ha⁻¹. Los valores obtenidos en la investigación realizada por Viera y Rodríguez (2019) muestra una tendencia similar a la obtenida en la presente investigación, donde el fuste es quien tiene el mayor contenido de carbono, seguido de las fracciones correspondientes a ramas gruesas y finas y la de menor peso es la fracción correspondientes a las hojas. Por otra parte, Silva et al. (2015) cuantificaron el stock de carbono en plantaciones comerciales de *Eucalyptus spp.* de edades de entre 2 y 8 años, evidenciando que en la medida que aumenta la edad de la plantación aumenta la acumulación de biomasa forestal y en consecuencia el stock de carbono. En comparación entre estos resultados y los valores obtenidos en la presente investigación, las edades de 3 y 7 años siguen el mismo comportamiento de acumulación de biomasa y C forestal.

De igual forma, Paroshy et al. (2021) realizaron un estudio en el cual se analizó la concentración de C en diferentes biomas del mundo sobre distintos gradientes climáticos, evidenciando que, se presentó una oscilación de concentración de C en la madera entre 30.5% y 65%, siendo 47.7% el valor medio. En dicho estudio se menciona que, la mayoría de los biomas evaluados, presentaron valores promedios de concentración de C menores al valor medio. En este sentido, observando los resultados obtenidos en la presente investigación, se ha verificado que las concentraciones calculadas en ambas poblaciones también presentan un valor promedio menor a 47.7%, explicando así, el motivo por el cual fue realizada la determinación de C, sin utilizar un valor estandarizado que podría llegar a sobrestimar el stock de C.

A modo de síntesis, los modelos obtenidos para ambas edades presentaron altos niveles de ajuste para la mayoría de las variables, lo cual muestra semejanzas a la literatura citada. Las poblaciones muestran cambios en su morfología y acumulación de la biomasa en función de las edades, donde a los 3 años las ramas y hojas presentan valores absolutos y proporcionales superiores a la población de 7 años, que a su vez pasa a tener menor biomasa de ramas y hojas, pero con mayor acumulación de biomasa en el fuste. Los valores obtenidos para la estimación de biomasa a partir de los modelos aplicados en los datos de inventario y la

cuantificación del stock de carbono presentan resultados similares a los comparados en la literatura. A su vez, los valores estimados de biomasa presentan una alta productividad primaria de las plantaciones forestales de *E. dunnii* sobre suelos del grupo CONEAT 2, presentando esta zona una gran potencialidad de expansión del rubro forestal.

6. CONCLUSIONES

Los modelos ajustados se presentan como una herramienta útil para la estimación de la biomasa y carbono forestal para los sitios de estudio. Así mismo, la utilización del método NSUR posibilita la obtención de ecuaciones alométricas aditivas, asegurando una estimación de la biomasa total equivalente a la suma de las fracciones individuales.

Para las edades evaluadas se verificó que la calidad de ajuste de los modelos siguió un orden para las fracciones de $RF < H < RG < F$. Únicamente la BF y la BMT fueron variables modeladas en donde se obtuvieron altos valores de precisión en las estimaciones, superando el 95% de la variabilidad explicada. Aun así, para todas las variables modeladas se logró una bondad de ajuste mayor al 70%.

En cuanto a la productividad de las poblaciones, los valores de IMA para el volumen del fuste de ambas edades fueron similares, con un promedio de $29,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. A su vez, la biomasa acumulada respondió en forma diferenciada a los grupos de suelos considerados, especialmente en las poblaciones de 7 años cuando ocurre mayor competencia entre los individuos. En relación con las fracciones de la biomasa, las RF, RG y H presentaron mayores valores absolutos para la población de 3 años, respecto a lo verificado a los 7 años, indicando que el aumento de la competencia forestal modifica la morfología de los árboles, y la magnitud del peso de las fracciones. La distribución del stock de carbono por fracción sigue un comportamiento similar al evidenciado para la biomasa. Esta condición se debe a la escasa variación en la concentración de carbono entre las fracciones analizadas.

Respecto a la concentración de C, los valores promedios de ambas poblaciones no presentaron una variación marcada entre poblaciones, siendo superior la concentración en la población de 7 años. Así mismo, se verificó que los valores promedios estimados fueron menores al valor estandarizado de 50%.

Los resultados de este estudio indican que los modelos desarrollados para las plantaciones comerciales de *E. dunnii* en suelos del grupo CONEAT 2 generaron una eficiente y precisa estimación de la biomasa forestal. Además, los valores de productividad verificados en las plantaciones indican su elevado potencial para el secuestro de carbono.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Balmelli, G., Resquin, F., Rachid, C., Nuñez, P., Rodríguez, F., & González, W. (2012). Eucaliptos colorados, avances en mejoramiento genético y manejo silvicultural. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Integración e intensificación productiva para el norte* (pp. 13-21). <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/112935270312153609.pdf>
- Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A., Robledo, C. W. (2008). *Manual del usuario*. Brujas. https://www.researchgate.net/publication/233842986_InfoStat_Version_2_011
- Barnes, B. V., Zak, R. D., Denton, R. S., & Spurr, H. S. (1998). *Forest ecology* (4th ed.). Wiley.
- Barros, S. (2012). El género Eucalyptus. *Ciencia e Investigación Forestal*, 18(3), 75-100. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2012.395>
- Bentancor, B. L. F. (2017). *Extracción de nutrientes por Eucalyptus dunnii maiden de 4 años con destino a la producción de biomasa para energía y celulosa* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/22801/1/BentancorBossioLuisFrancisco.pdf>
- Boland, J. D., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnson, R. D., Kleinig, A. D., McDonald, W. M., & Tumer, D. J. (1984). *Forest trees of Australia*. CSIRO.
- Borrego, A., Salinas-Melgoza, M. A., & Skutsch, M. (2015). El valor de las emisiones de carbono asociadas al sistema agrícola de roza, tumba y quema. En F. P. Paz, J. G. Wong, & R. A. Torres (Eds.), *Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2015* (pp. 578-586). Centro Internacional de Vinculación y Enseñanza de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/5524400/Binder4.pdf>
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests*. FAO.
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Califra, A., Ruiz, A., Alliaume, F., & Durán, A. (2007). Contribución al estudio de los suelos “Algorta”. *Agrociencia (Uruguay)*, 11(1), 35-46.
- Campos, J. C. C., & Leite, H. G. (2006). *Mensuração florestal: Perguntas e respostas*. Universidade Federal de Viçosa.

- Cárdenas, D. F. B. (2016). *Tablas de volumen individual para Eucalyptus dunnii Maiden en el litoral del Uruguay* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/27733>
- Casanova, F. L., Petit, J. A., & Solorio, J. S. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 133-143. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182011000100013
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429021211104157.pdf>
- Comisión Nacional de Estudio Agronómico de la Tierra. (2020). *Descripción de Grupos de Suelos CO.N.E.A.T.* MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-03/Descripci%C3%B3n%20de%20Grupos%20de%20suelos%20CONEA_T_0.pdf
- Díaz, L. D. B. (1997). Turno forestal económicamente óptimo. *Economía Agraria*, (180), 181-224. https://www.researchgate.net/publication/28141012_Turno_forestal_economicamente_optimo_una_revisi%C3%B3n
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34.
- Diez de Medina, A. (2011). *El sector forestal en Uruguay: Historia, actualidad y perspectivas* [Trabajo final de grado, Instituto Tecnológico de Buenos Aires]. ITBA. <http://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/654>
- Dirección General Forestal. (2021a). *Cartografía nacional forestal 2021*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/Publicacion_dgf.pdf
- Dirección General Forestal. (2021b). *Vigésima primera encuesta de viveros forestales*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe%20final.pdf>
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R., Solomon, A., Trexler, M., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185-190. <https://www.jstor.org/stable/2882371>

- Doldán, J., Fariña, I., & Tarigo, F. (2008). Utilización de *Eucalyptus* spp: Alternativas de plantaciones uruguayas para pulpa Kraft. *INNOTEC*, 1(3), 30-34. <https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC/article/view/32/27>
- Durán, L. P. G. (2005). *Evaluación de la producción y productividad en biomasa aérea de boldo (Peumus boldus Mol.) en un bosque esclerofilo de la comuna de maria pinto, provincia de melipilla, región metropolitana* [Trabajo final de grado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105086>
- García, M. (2010). *Fijación de carbono en la biomasa arbórea, la necromasa y el suelo de plantaciones de Eucalyptus grandis con diferentes manejos en vertisoles de la provincia de entre Ríos* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Córdoba]. INTA Digital. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/7113>
- Gerding, V., Geldres, E., & Schlatter, J. E. (2006). Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región. *Bosque*, 27(3), 223-230. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002006000300001>
- Gonçalves, J. L. M., Wichert, M. C. P., Gava, J. L., & Serrano, M. I. P. (2007). Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue management practices. *Southern Hemisphere Forestry Journal*, 69(2), 51-62.
- González, A., & Lago, A. (2006). *Estudio de la variación axial de la densidad de la madera de Eucalyptus grandis hill (ex maiden) y Eucalyptus dunnii maiden* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/32991/1/GonzalezAlejandro.pdf>
- Gracia Alonso, C. A., Pla Ferrer, E. P., Sánchez Plaza, A. P., & Sabaté, S. (2004). Gotilwa+: Un modelo de crecimiento forestal basado en procesos ecofisiológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (18), 21-28. http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernos_secf/article/view/9432/9350
- Guera, O. G. M., Da Silva, J. A. A., Ferreira, R. L. C., Álvarez, L. D., & Barrero, H. M. (2019). Mathematical models for determining the optimal rotation in forest plantations. *Madera y Bosques*, 25(1), 1-17.
- Hernández-Ramos, J., De los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921-938. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000800921

- Hirigoyen, A. (2021). *Aplicación de imágenes de satélites y datos LIDAR en la modelización e inventario de Eucalyptus spp en Uruguay* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/31677/1/HirigoyenAndres.pdf>
- Hirigoyen, A., Resquin, F., Navarro, R. C., Franco, J., & Rachid, C. C. (2021). Stand biomass estimation methods for eucalyptus grandis and eucalyptus dunnii in Uruguay. *Bosque*, 42(1), 53-66. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002021000100053>
- Iturre, M. C., & Araujo, P. A. (2006). *Crecimiento y producción del rodal regular*. Universidad Nacional Santiago del Estero.
- Ley n° 15.939: *Segunda Ley Forestal*. (1987). IMPO.
<https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1), 63-105.
<http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>
- Methol, R. (2006). Alternativas de manejo para Eucalyptus grandis en la zona de areniscas de Tacuarembó y Rivera. En M. Bemhaja & O. Pittaluga (Eds.), *30 años de investigación en suelos de areniscas* (pp. 369-373). INIA
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7782/1/ST-159-369-373.pdf>
- Murali, K. S., Bhat, D. M., & Ravindranath, N. H. (2005). Biomass estimation equations for tropical deciduous and evergreen forests. *International Journal Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 4(1), 81-92.
- Ortega, A., & Montero, G. (1988). Evaluación de la calidad de las estaciones. *Ecología*, (2), 155-184.
- Panario, D., & Gutiérrez, O. (2007, 16 de noviembre). *La política forestal industrial del estado uruguayo* [Contribución]. Seminario: Política y Pasteras en el Rio Uruguay: Medio Ambiente, Modelos Productivos y Movimiento Social, Montevideo.
https://www.researchgate.net/publication/264840541_La_politica_forestal_industrial_del_Estado_uruguayo
- Paroshy, N. J., Doraisami, M., Kish, R., & Martín, A. R. (2021). Carbon concentration in the world's trees across climatic gradients. *New Phytologist*, 232(1), 123-133 <https://doi.org/10.1111/nph.17587>
- Parresol, B. R. (2001). Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(5), 865-878.

- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción*. FAO.
http://www.globallometree.org/media/cms_page_media/6/tarifs_sp_web_19jun.pdf
- Prieto González, P. (2011). *Base cartográfica para el desarrollo de una metodología de monitoreo de propiedades físicas y químicas de suelos forestales* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/9744/1/3754pri.pdf>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura; Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit.
- Resquin, F. P. (2019). *Biomass production in intensive plantations of Eucalyptus species in Uruguay* [Disertación doctoral, Universidad de Córdoba]. UCO digital. <http://hdl.handle.net/10396/18685>
- Salas, J. R., & Infante, A. C. (2006). Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 21(40), 47-70.
- Sánchez, C. G. (2011). *Descomposición de restos de cosecha de Eucalyptus sp. y Pinus taeda en condiciones controladas de humedad y temperatura* [Tesis de maestría, Universidad de la Republica]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/1839>
- Sanquetta, C. R., Minatti, M., Junior, S. C., Trautenmüller, J. W., & Dalla, A. P. C. (2019). Independent and simultaneous modeling of biomass and carbon of Guinean Elaeis. *Floresta*, 49(3), 421-430.
- Schlatter, J. E., & Gerding, V. (2014). Sitio forestal. En C. Donoso, M. E. González, & A. Lara (Eds.), *Ecología forestal: Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile* (pp. 309-319). Ediciones UACH.
https://www.researchgate.net/publication/277141706_Sitio_forestal
- Schneider, P. R., Schneider, P. S. P., & Martinelli, C. A. S. (2009). *Análise de regressão: Aplicada a engenharia florestal* (2ª ed.). UFSM.
- Shi, L., & Liu, S. (2017). Methods of estimating forest biomass. En J. Shankar Tumuluru (Ed.), *Biomass volume estimation and valorization for energy* (pp. 23-46). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/65733>
- Silva, C. A., Klauberg, C., Carvalho, S. D. P. C., Piccolo, M. D. C., & Rodriguez, L. C. E. (2015). Estoque de carbono na biomassa aérea florestal em plantações comerciais de Eucalyptus spp. *Scientia Forestalis*, 43(105), 135-146. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr105/cap13.pdf>

- Torres-Rojo, J. M. (2001). Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. *Agrociencia*, 35(1), 87-98.
<https://www.redalyc.org/pdf/302/30235108.pdf>
- Trautenmüller, J. W., Péllico, S. N., Balbinot, R., Watzlawick, L. F., Dalla, A. P. C., Sanquetta, C. R., & Behling, A. (2021). Regression estimators for aboveground biomass and its constituent parts of trees in native southern Brazilian forests. *Ecological Indicators*, 130, Artículo e108025.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108025>
- Ualde, J. P. A. (2015). *Extracción de nutrientes por plantaciones comerciales de diferentes edades de Eucalyptus globulus Labill en suelos de la zona este de Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/8679>
- Viera, M., & Rodríguez, R. S. (2019). A complete assessment of carbon stocks in above and belowground biomass components of a hybrid eucalyptus plantation in southern Brazil. *Forests*, 10(7), Artículo e536.
<https://doi.org/10.3390/f10070536>
- Yu, Y., Chen, J. M., Yang, X., Fan, W., Li, M., & He, L. (2017). Influence of site index on the relationship between forest net primary productivity and stand age. *PLOS ONE*, 12(5), Artículo e0177084.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177084>
- Yussim, A. E. B. (2013). *Cuantificación de la extracción de nutrientes por Eucalyptus dunnii en edad de cosecha en suelos del litoral oeste uruguayo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/1674>

8. ANEXO**Tabla A1***Coefficientes y nivel de ajuste para modelo de estimación de alturas por estrato*

Estrato	β_0	β_1	R^2
E1	2,1769	5,4712	0,89
E2	1,0308	5,9852	0,77
E3	-0,9192	4,7367	0,68
E4	1,9041	3,8327	0,63

Nota. β_0 : intercepto; β_1 : logaritmo de DAP; R^2 : error cuadrático medio.

Figura A1

Gráficos de dispersión (predichos vs observados y predichos vs residuales) para modelos ajustados por fracción sobre la población de 3 años (tabla No.14)

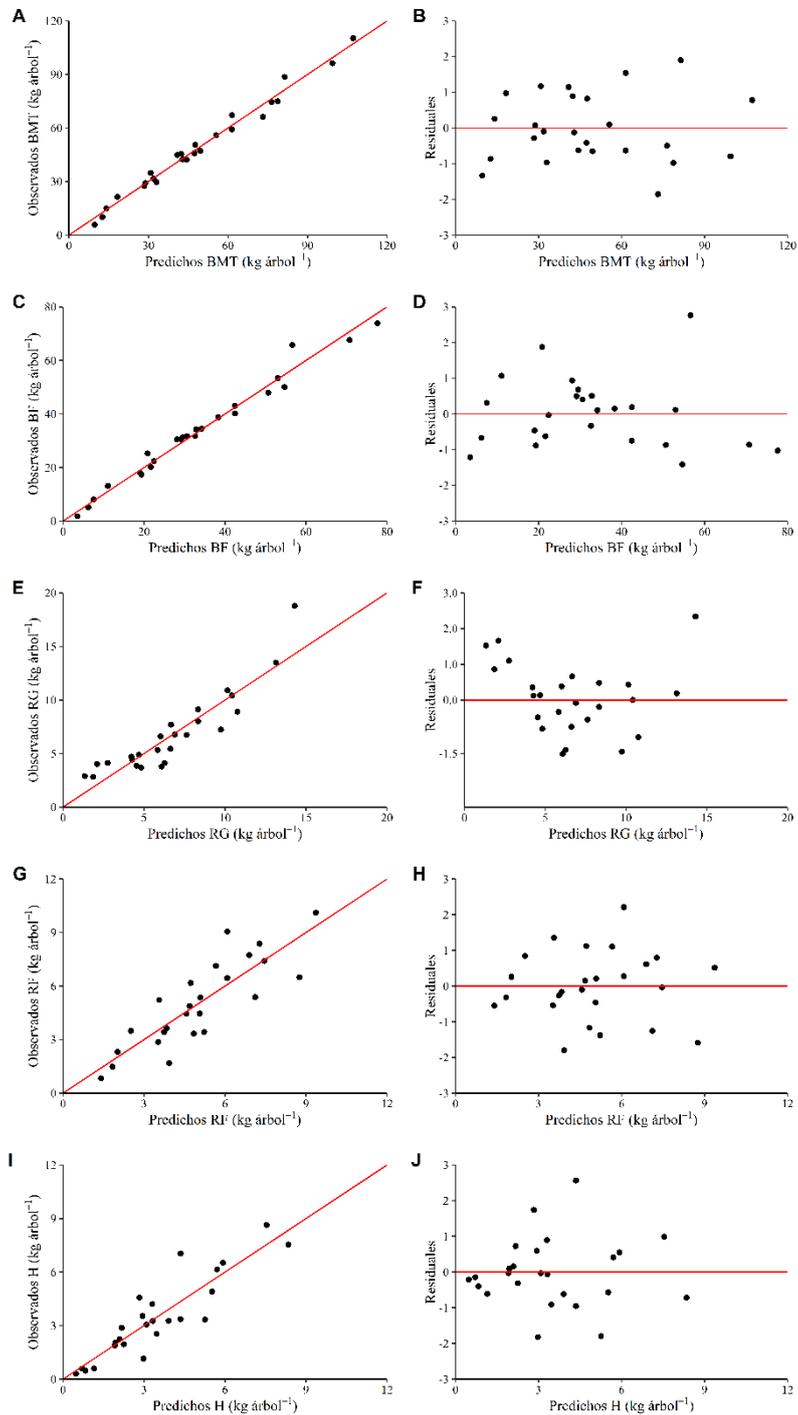


Figura A2

Gráficos de dispersión (predichos vs observados y predichos vs residuales) para modelos ajustados por fracción sobre la población de 7 años (tabla No.15)

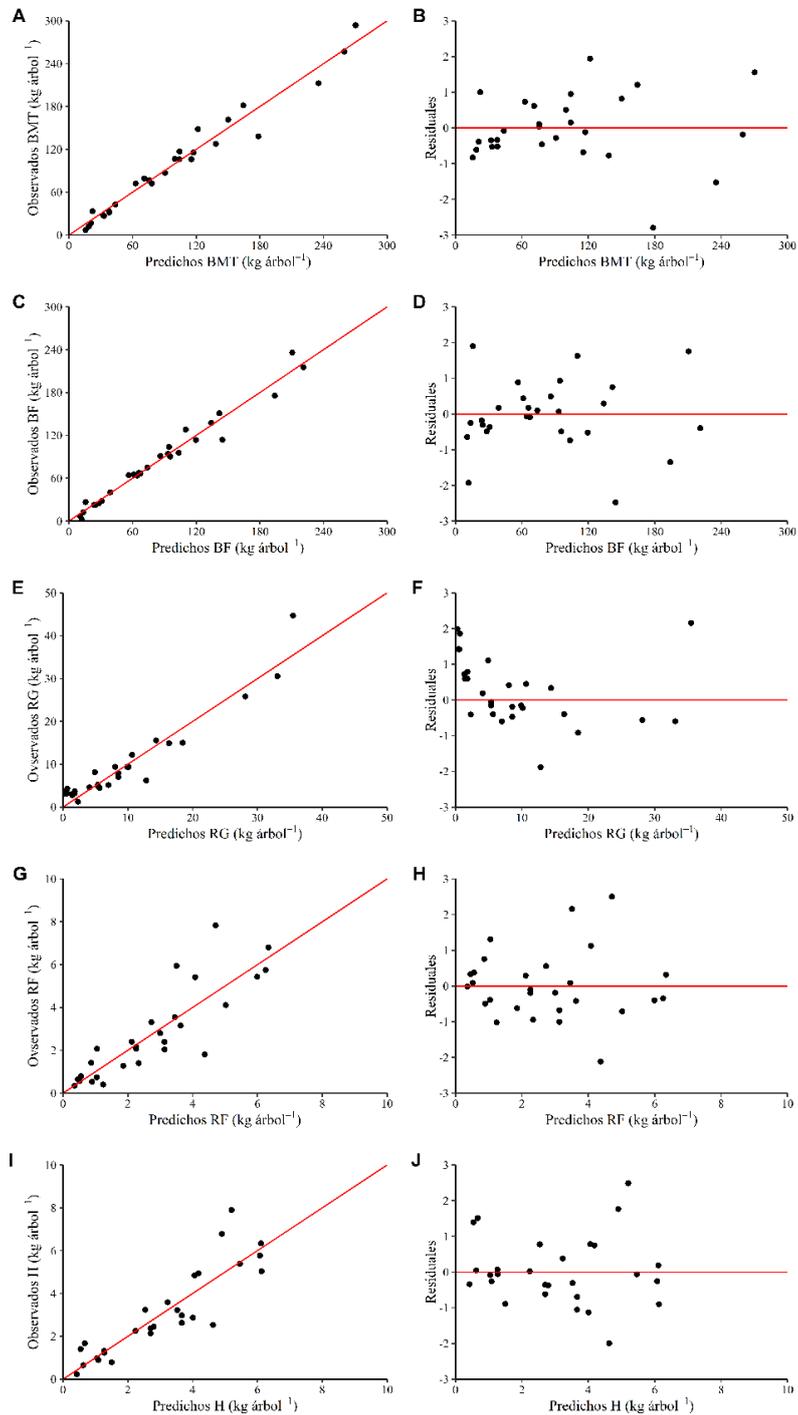


Figura A3

Gráficos de dispersión (predichos vs observados y predichos vs residuales) para modelos simultáneos ajustados para la población de 3 años (tabla No.16)

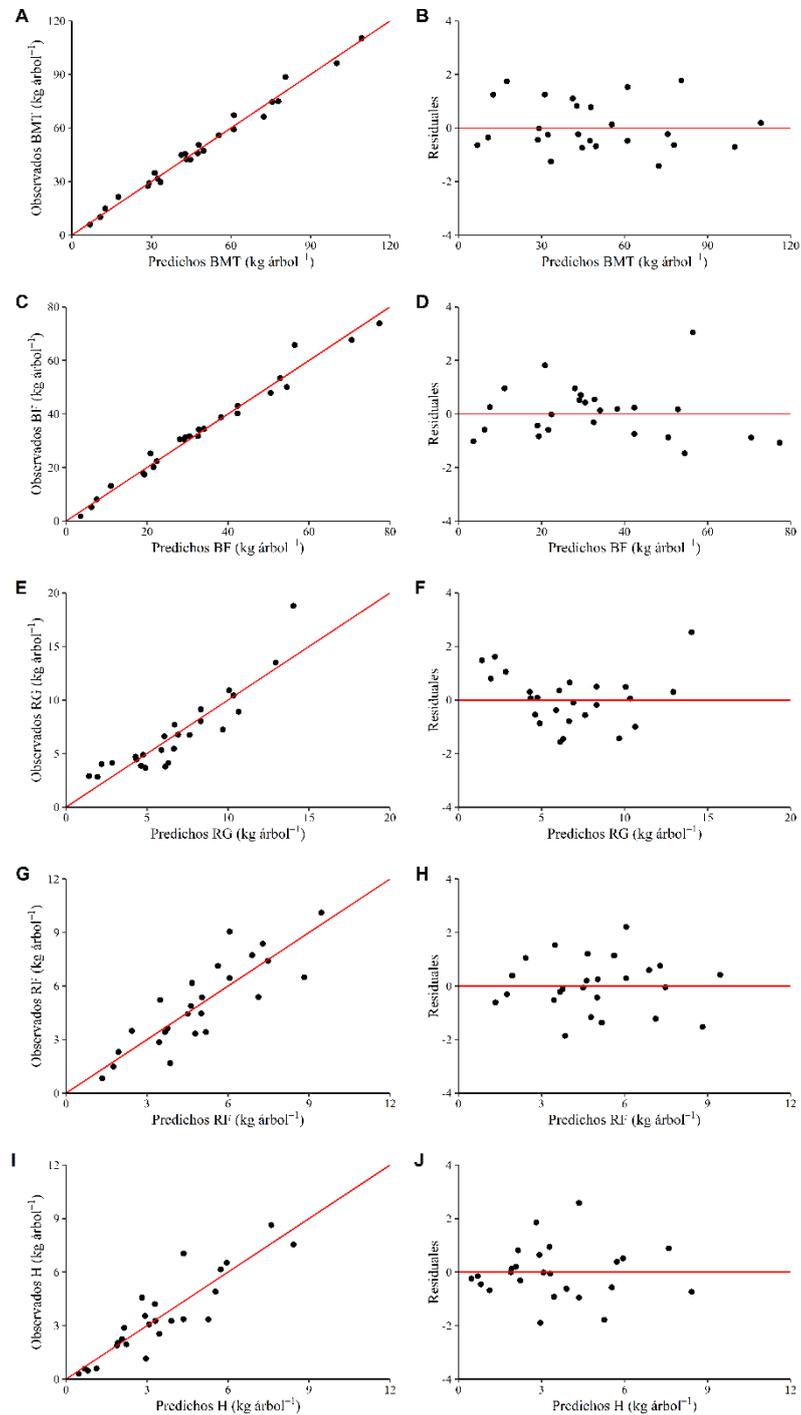


Figura A4

Gráficos de dispersión (predichos vs observados y predichos vs residuales) para modelos simultáneos ajustados para la población de 7 años (tabla No.17)

