



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados



**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**

María de los Ángeles García

Tesis

Para optar al Grado Académico de
Magister en Ciencias Agropecuarias
Mención: Producción Vegetal

Córdoba, 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**

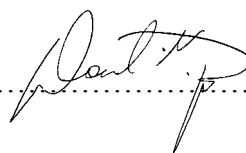
María de los Ángeles GARCÍA

Comisión Asesora de Tesis

Director: Dr. Omar BACHMEIER

Asesora: MSc. Graciela VERZINO

Asesor: PhD. Daniel MARTINO



Tribunal Examinador de Tesis

Dra. Adriana ABRIL

Dr. Edgar Ariel RAMPOLDI

MSc. Graciela VERZINO

Presentación formal académica

Fecha 18 de mayo de 2010

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas y empresas, sin cuya colaboración y buena disposición no hubiese podido llevar adelante los estudios involucrados en este trabajo.

A mi director de Tesis, Dr. Omar Bachmeier, por su constante acompañamiento, crítica, aliento, guía durante todo este tiempo. Reconozco especialmente sus cualidades humanas, ya que en todo momento me ha demostrado su apoyo, comprensión y motivación, ayudándome no solo técnicamente sino también con los trámites y formalidades académicas.

A mis asesores, Ing. (MSc.) Graciela Verzino y Dr. Daniel Martino, por tanto tiempo dedicado a la meticulosa revisión de este documento, por sus valiosos aportes, sugerencias, críticas.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), por haberme brindado el apoyo institucional y financiar mis estudios, conjuntamente con los Proyectos relacionados al tema de tesis.

A mis compañeros del Área Forestal de la EEA INTA Concordia: Eduardo Almada (Q.E.P.D.), Ramón Eyman, Darío Kaemena, Diego Moledo, Willy Moledo y Ciro Mastrandrea, por la colaboración en las tareas de campo y de laboratorio; y a Diana Díaz y Leonel Harrand por las discusiones, opiniones y críticas que me ayudaron desde el inicio, y por su ayuda en cuestiones prácticas de la escritura y edición de este documento.

Agradezco también a Carlos Raúl López y Oscar Quaino por todo el tiempo dedicados a leer, corregir y sugerir cómo mejorar distintos aspectos de esta tesis, por su apoyo técnico y su desinteresada ayuda.

A Adriana Abril, Guido Lorenz, Marta Pece y Celia Gaillard por su valiosa opinión técnica, por sus sugerencias y por permitirme aprender y practicar algunas de las técnicas aplicadas en este trabajo.

A Laura Noé, por su colaboración en el Laboratorio de Microbiología Agrícola, y a Lino Roda por su ayuda durante mi licencia por maternidad.

Agradezco también a las siguientes personas y empresas: Forestal Argentina S.A., Alto Verde S.A., R. Burna, L. Clement, J. Cutro, F. Dalla Tea, C. Romero, N. Grigolatto, J. Merro, M. Masut y S. Petelín, por permitirme la realización de los muestreos y determinaciones, en muchos casos destructivas, en sus respectivas propiedades.

DEDICATORIA

Con todo mi amor, a mi esposo Mario, mi compañero y complemento, la alegría de mi alma, con quien hemos concretado el sueño de formar una familia. Por construir cada día juntos un poquito más del futuro.

A nuestras hijas, Micaela y Luján, la mayor felicidad de mi vida, por sorprenderme cada día, por llenarme de ilusiones, por emocionarme hasta reír o llorar, por ser mis ángeles.

A mis padres, Graciela y Carlos, por haberme enseñado a luchar, por demostrarme con su ejemplo el valor de la familia y por inculcarme las ansias de superarme cada día y buscar ser mejor persona.

A mis suegros, Juan Carlos y Elsa, por todo el apoyo, por cuidar de mi familia mientras me tocó viajar tantas veces, por ser tan comprensivos, por ser "mis segundos papás".

A mis hermanos, cuñados, sobrinos, porque desde el lugar y la situación de vida de cada uno, sé que siempre puedo contar con ellos.

A mi abuela, por su ejemplo de vida y tanto amor brindados.

A todos mis amigos, por ser los hermanos "del corazón", gracias por su apoyo y su amistad incondicional.

A DIOS, por regalarme la vida, por guiarme y sostenerme siempre, por todos los dones que a diario recibo de su generosidad.

RESUMEN

El aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y el evidente aumento de las temperaturas globales y sus consecuencias, constituye una preocupación mundial. Sin embargo, ciertas prácticas de uso de la tierra y manejo del suelo, como las plantaciones forestales, podrían contribuir a reducir la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera. En la Provincia de Entre Ríos hay aproximadamente un millón de hectáreas de suelos Vertisoles, poco aptos para la plantación de *Eucalyptus grandis* debido a los bajos rendimientos, pero potencialmente aptos para secuestrar carbono. La falta de información acerca de cuánto carbono almacenan las plantaciones de esa especie en la biomasa, la necromasa y los suelos sobre los que crecen, constituye una importante limitación para la comercialización del carbono fijado. Con el objetivo de evaluar el carbono almacenado en las plantaciones de eucalipto cultivadas en Vertisoles, se seleccionaron plantaciones de 1 a 9 años, con y sin raleo, y pastizales con uso ganadero como líneas de base, por constituir una de las actividades principales de esos suelos. En todos los sitios se muestrearon suelos hasta los 50 cm de profundidad y necromasa, según un diseño anidado. Se determinaron carbono orgánico total y sustancias húmicas del suelo y se midieron variables dasométricas. Adicionalmente, se determinaron por método destructivo la biomasa aérea de 45 árboles de plantaciones raleadas y la biomasa total de 69 árboles de plantaciones sin raleo. Con esos datos se ajustaron y validaron ecuaciones alométricas de biomasa aérea para plantaciones raleadas y de biomasa total para plantaciones sin raleo, las cuales se aplicaron para estimar el carbono en la biomasa de los rodales de eucalipto estudiados. El carbono orgánico del suelo (COT) presentó valores entre 57,9 Mg ha⁻¹ y 163,5 Mg ha⁻¹ en las plantaciones sin raleo, entre 112,8 y 160,6 Mg ha⁻¹ en las plantaciones raleadas, y de 76,9 a 154,5 Mg ha⁻¹ en los pastizales. El COT de las plantaciones sin raleo disminuyó significativamente luego de los 6 años, respecto de la línea base; por el contrario, en plantaciones raleadas el COT no varía significativamente durante los primeros 9 años en comparación con los pastizales. Por otro lado, en las plantaciones sin raleo se observa un aumento de las sustancias húmicas, con respecto a los pastizales; no obstante, en las plantaciones raleadas no se verifican esos cambios. Con respecto a la biomasa y la necromasa, las plantaciones incrementan significativamente el carbono acumulado en esas componentes cuando reemplazan pastizales; así mismo, las plantaciones raleadas acumulan más carbono en la biomasa total y en la necromasa que las plantaciones sin manejo, aunque esas diferencias son significativas sólo entre plantaciones de 4 años y desaparecen en las plantaciones adultas.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, pastizales naturales, carbono orgánico del suelo, ecuaciones alométricas, carbono en la necromasa.

ABSTRACT

Due to the raise in global temperature as a result of the increase of atmospheric carbon dioxide concentration, there is a worldwide concern. Nevertheless, it is possible to reduce greenhouse effect through some land uses and soil management strategies, such as plantation forests as carbon sinks. In Entre Ríos Province (Argentina) there are approximately 1 million hectares of soils with vertic properties, which could be planted with fast growing species such as *Eucalyptus grandis* to sequester carbon. Unfortunately, there is a lack of knowledge with respect to carbon pools in eucalypt forests grown in Vertisols in this region. This research focused on carbon fixed by *E. grandis* plantations in a chronosequence, including stands from 1 to 9 years old, thinned and un-thinned, and grasslands taken as baselines. Soils up to 50 cm depth, litter and woody debris were sampled in square plots, according to a nested sampling method. Total soil organic carbon (SOC) and humic substances were determined; dasometric variables were measured; and 114 trees were processed to determine biomass. Biomass data were used to develop and validate complete and above-ground biomass allometric equations. SOC ranged from 57,9 Mg ha⁻¹ to 163,5 Mg ha⁻¹ in plantations without thinning, 112,8 Mg ha⁻¹ to 160,6 Mg ha⁻¹ in thinned stands, and 76,9 Mg ha⁻¹ to 154,5 Mg ha⁻¹ in grasslands. Results showed that land use change from grasslands to eucalypt plantations decreased SOC after 6 years, but significantly increased humic substances when no thinning was applied. On the contrary, thinning appeared to promote SOC and humic substances conservation. After 2 years planted, eucalypt forests significantly enhanced carbon stored in biomass, litter and woody debris, accounting significantly more carbon in thinned plantations than in un-thinned ones at age 4, while differences remain unnoticed in older forests.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, grasslands, soil organic carbon, allometric equations, litter and woody debris carbon.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
Los suelos.....	7
El clima	7
Los pastizales naturales y su uso.....	8
La actividad forestal en los vertisoles	9
HIPÓTESIS	10
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
BIBLIOGRAFÍA CITADA	12
CAPÍTULO 2 CARBONO EDÁFICO	17
INTRODUCCIÓN	17
MATERIALES Y MÉTODOS	18
Diseño del muestreo	19
Métodos.....	19
Análisis estadístico.....	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
Carbono orgánico total del suelo.....	21
Relación de humificación, grado de humificación y grado de polimerización.....	27
CONCLUSIONES	31
BIBLIOGRAFÍA CITADA	31
CAPÍTULO 3 ECUACIONES DE BIOMASA DE <i>EUCALYPTUS</i> <i>GRANDIS</i> EN VERTISOLES DEL NORTE DE ENTRE RÍOS	36
INTRODUCCIÓN	36
MATERIALES Y MÉTODOS	38
Selección y procesamiento de las muestras	38

Ajuste de ecuaciones	40
Comprobación de adecuación de los modelos	42
Validación de los modelos	42
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
Ecuaciones de biomasa total para plantaciones sin raleos	45
Ecuaciones de biomasa aérea para plantaciones sin raleos y raleadas.....	49
CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA CITADA	53
CAPÍTULO 4 CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA Y NECROMASA DE PLANTACIONES DE <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i> Y PASTIZALES CON USO GANADERO	56
INTRODUCCIÓN	56
MATERIALES Y MÉTODOS	59
Componentes de la biomasa forestal.....	59
Determinación de carbono en la biomasa de los pastizales	59
Carbono en la biomasa de las plantaciones de eucalipto	60
Carbono en la necromasa de las plantaciones de eucalipto.....	61
Análisis estadístico.....	61
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
Componentes de la biomasa.....	62
Carbono en la biomasa de las plantaciones de eucalipto y de los pastizales	63
Carbono en mantillo y detritos de las plantaciones de eucalipto y de los pastizales.....	65
BIBLIOGRAFÍA CITADA	67
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES GENERALES	70
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	73

Lista de Figuras

Figura 1.1 Área de la Provincia de Entre Ríos donde se ubican los sitios estudiados. Las marcas de posición en la imagen indican las plantaciones y pastizales evaluados.	6
Figura 2.1 COT de 0 a 50 cm de profundidad en todas las parcelas medidas, para cada edad, uso y manejo evaluados.	22
Figura 2.2 COT promedio de los pastizales y de las plantaciones sin raleo agrupadas por clases de edad (joven: 1 a 3 años; intermedia: 4 a 6 años; adultas: 8 y 9 años), en la profundidad de 0 a 50 cm.	23
Figura 2.3 COT promedio de los pastizales y de las plantaciones raleadas de distintas edades, en la profundidad de 0 a 50 cm.	24
Figura 2.4 COT promedio de las plantaciones agrupadas según la edad y el manejo, en la profundidad de 0 a 50 cm.	25
Figura 2.5 Relación de humificación de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones sin raleo, agrupadas según los grupos de edad: joven: 1 a 3 años; intermedias: 4 a 6 años; adultas: 8 y 9 años; pastizales (líneas base).	27
Figura 2.6 Grados de humificación de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones sin raleo en grupos según la edad: joven: 1 a 3 años; intermedias: 4 a 6 años; adultas: 8 y 9 años; pastizales (puntos de referencia o líneas base).	28
Figura 2.7 Grado de polimerización de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones sin raleo agrupadas según edad: 1(jóvenes: 1 a 3 años), 2 (intermedias: 4 a 6 años), 3 (adultas: 8 y 9 años), 0 (pastizales, puntos de referencia o líneas base).	29
Figura 2.8 Rh, Gh y Gp de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones raleadas y de los pastizales.	30
Figura 2.9 Comparación de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones con raleo y sin raleo. a) Relación de humificación (Rh); b) grado de humificación (Gh).	31
Figura 3.1 Trabajo a campo para extracción de árbol completo. De izquierda a derecha: extracción de raíces; ramas y frutos, y hojas para determinación de peso fresco total.	39
Figura 3.2 Alícuotas de ramas y frutos, hojas, raíces gruesas y fuste para determinación de contenido de humedad.	39

Figura 3.3 Alícuotas de ramas y frutos, hojas, raíces gruesas y fuste para determinación de contenido de humedad.....	46
Figura 3.4 Diagramas de dispersión de la biomasa total en función de las variables independientes DAP al cuadrado (d^2) y d^2H , identificados según el sitio de donde provienen las muestras.....	47
Figura 3.5 Diagramas de dispersión de la biomasa aérea en función del diámetro al cuadrado (d^2) y de la variable combinada (d^2H), identificados según el sitio de donde provienen las muestras.....	50
Figura 3.6 Diagramas de dispersión de la variable dependiente transformada: raíz cuadrada de la biomasa aérea en función del DAP (d), DAP^2 (d^2), DAP por altura total (dH) y DAP^2 por altura total (d^2H).	51
Figura 4.1 Contenido de carbono en la biomasa total de las plantaciones con distinto manejo y de los pastizales de referencia.	64
Figura 4.2 Contenido de carbono en la necromasa de las plantaciones con distinto manejo y de los pastizales de referencia.	65
Figura 5.1 Contenido de carbono en los componentes evaluados en la cronosecuencia (pastizales tomados como edad cero y plantaciones de 1 a 9 años).	71

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Coeficientes de correlación de Pearson, entre la biomasa total (BT) en Kg y las variables independientes DAP (d) en cm, altura total en metros (H), y los sitios de donde provienen los árboles (sit).....	45
Tabla 3.2 Modelos de biomasa total ajustados con todos los datos y con los grupos de validación, estadísticos de bondad de ajuste y de valor predictivo de los mismos.	48
Tabla 3.3 Coeficientes de correlación de Pearson, entre la biomasa aérea (BA) en Kg, y las variables independientes DAP (d) en cm; altura total (H), en m; DAP por altura total (dH); DAP al cuadrado (d ²); DAP al cuadrado por altura total (d ² H); sitios (sit).....	50
Tabla 3.4 Modelos de estimación de la variable dependiente transformada y estadísticos de bondad de ajuste de los modelos.	52
Tabla 4.1 Principales características de las plantaciones forestales estudiadas. IMA: incremento medio anual en volumen.....	64

Lista de Abreviaturas

BA	Biomasa aérea
$BA^{1/2}$	Raíz cuadrada de la biomasa aérea
BA_{rt}	Biomasa aérea re-transformada y corregida
BT	Biomasa total
C BT	Carbono de la biomasa total
C necromasa	Carbono de la necromasa
C suelo	Carbono del suelo
Caf	Contenido de carbono de los ácidos fúlvicos (%)
Cah	Contenido de carbono de los ácidos húmicos (%)
CERs	Certificados de reducción de emisiones
CME	Error cuadrático medio
COT	Carbono orgánico total del suelo
Csh	Contenido de carbono de las sustancias húmicas del suelo
d	Diámetro a la altura del pecho (1,30 m)
d^2	Diámetro a la altura del pecho elevado al cuadrado
d^2H	Diámetro a la altura del pecho elevado al cuadrado por altura total de los árboles
DA	Densidad aparente del suelo
DAP	Diámetro a la altura del pecho (1,30 m)
DAP^2	Diámetro a la altura del pecho elevado al cuadrado
Desv.est.	Desviación estándar
DG	Desviación global
dH	Diámetro a la altura del pecho por altura total de los árboles
EE_{const}	Error de estimación de la constante
$EE_{pendiente}$	Error de estimación de la pendiente
EV	Equivalente vaca
GEI	Gases de efecto invernadero
Gh	Grado de humificación de la materia orgánica del suelo

Gp	Grado de polimerización y condensación de la materia orgánica humificada del suelo
H	Altura total de los árboles
IIE	Instituto de Investigaciones Económicas de la Bolsa de Cereales de Córdoba
IMA	Incremento medio anual
interm	Intermedia
IPCC	Panel intergubernamental de cambio climático (sigla en inglés)
IR	Índice de reducción
MDL	Mecanismo de desarrollo limpio
Mg	Megagramos
MO	Materia orgánica del suelo
n	Tamaño de la muestra
NGGIP	Programa de Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (sigla en inglés)
PRESS	Suma de cuadrados del error de predicción
R^2_{ajust}	Coefficiente de determinación ajustado
Rh	Relación de humificación de la materia orgánica del suelo
sit	sitios de muestreo
SST	Suma total de cuadrados
VERs	Reducciones de emisiones verificadas (sigla en inglés)
1 s/r	Plantaciones de 1 año, sin raleo
2 s/r	Plantaciones de 2 años, sin raleo
3 s/r	Plantaciones de 3 años, sin raleo
4 s/r	Plantaciones de 4 años, sin raleo
4 c/r	Plantaciones de 4 años, raleadas
6 s/r	Plantaciones de 6 años, sin raleo
6 c/r	Plantaciones de 6 años, raleadas
8 s/r	Plantaciones de 8 años, sin raleo
8 c/r	Plantaciones de 8 años, raleadas
9 s/r	Plantaciones de 9 años, sin raleo

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los cambios que han ocurrido en la atmósfera y en la superficie terrestre, principalmente el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), que incrementan la absorción atmosférica de la radiación emitida, y el aumento en los aerosoles (gotas y partículas microscópicas) que reflejan y absorben la radiación solar, provocaron cambios en el clima (Solomon *et al.*, 2007). El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007). Este aumento de las temperaturas globales podría alterar los flujos de carbono entre la atmósfera, la vegetación y los suelos (Zerva, 2004). Por otro lado, con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios (IPCC, 2007). Sin embargo, la adopción de ciertas prácticas de uso de la tierra y manejo del suelo podrían contribuir a reducir el efecto invernadero mediante el aumento del carbono secuestrado en los ecosistemas terrestres (Zerva, 2004).

Los bosques, las tierras agrícolas y otros ecosistemas ofrecen considerables posibilidades de mitigación del efecto invernadero, aunque no necesariamente permanentes. No obstante, con la conservación y el secuestro de carbono se puede disponer de tiempo para desarrollar y aplicar nuevas tecnologías que permitan disminuir las emisiones de GEI (IPCC, 2001). Los proyectos forestales se destacan entre las iniciativas de compensación de emisiones, permitiendo prorrogar daños causados por el calentamiento global (Jandl, 2005; Norverto, 2002), aún cuando la fijación de carbono por estos proyectos es reversible y el carbono puede liberarse por causas naturales o inducidas por el hombre. Sin embargo, un proyecto forestal puede

contribuir a la reducción de GEI mediante la captura de emisiones, que pueden ser acreditadas mediante certificados de reducción de emisiones (CERs). Para comprar CERs y financiar proyectos en países emergentes, el Banco Mundial administra varios fondos aportados por empresas y gobiernos. Del mercado de carbono, el segmento más grande es el regulado por el Protocolo de Kioto, siendo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones los instrumentos más desarrollados. El MDL incluye a la forestación y reforestación en países en desarrollo, como sumideros de carbono que contribuyen a reducir la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera a nivel global (Salgado Flores, 2004). Sin embargo, además de los mercados obligatorios de carbono, que han sido desarrollados para el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones establecidos por el Protocolo de Kioto, existe una serie de iniciativas voluntarias de reciente creación dirigidas a sectores y ámbitos geográficos no cubiertos por esquemas obligatorios de control de emisiones. Estos mercados de carbono tienen su origen en la decisión voluntaria de varios actores (empresas industriales, empresas de servicios, entidades sin ánimo de lucro, particulares, etc.) interesados en compensar sus emisiones para, de esta manera, mejorar su imagen, su perfil de responsabilidad social corporativa, o su conocimiento sobre la economía del cambio climático (Larrea, 2009). Si bien el mercado regulado de Kioto es el más grande, el mercado voluntario es el de más rápido crecimiento. Ese mercado transa reducciones verificadas de emisiones (VERs), no registradas por la Junta Ejecutiva del MDL, pero nunca rechazadas, las cuales son por lo general utilizadas para compensar emisiones inevitables en un contexto de responsabilidad social corporativa.

Por un lado, la comunidad científica internacional manifestó la urgencia de actuar para encarar a distintos niveles el problema del cambio climático; por otro, los responsables de políticas a nivel internacional, regional y nacional han presentado propuestas para responder a este desafío. La Unión Europea en conjunto con Estados Unidos y Australia adoptaron un compromiso de reducción de emisiones hasta el año 2020, lo que garantiza la continuidad del mercado de carbono (Capoor y Ambrosi, 2009).

En la Provincia de Entre Ríos, hacia el oeste de la zona tradicionalmente forestal, se extienden aproximadamente un millón de hectáreas de suelos marginalmente aptos para forestación. Entre ellos, los Vertisoles resultan potencialmente aptos para plantaciones de *Eucalyptus grandis* como sumideros de carbono. La comercialización del carbono almacenado en las plantaciones podría constituir, consiguientemente, un ingreso adicional que mejore la rentabilidad de los proyectos de inversión forestal (Olschewski y Benítez, 2005), compensando de esta forma el prolongado tiempo de retorno de la inversión. Sin embargo, menos del 1% de los volúmenes de transacción del mercado mundial de carbono durante el año 2008 correspondió a proyectos de uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y forestación. Ese tipo de proyectos siguen siendo marginales en cuanto a su participación en el mercado de carbono, a causa de cuestiones como la preocupación por la permanencia de las reducciones y la precisión de los monitoreos, entre otras. Aún cuando los gobiernos tienen la posibilidad de usar una cantidad limitada de este tipo de proyectos para cumplir sus metas de reducción de emisiones, apenas los han utilizado (Capoor y Ambrosi, 2009).

En cuanto al efecto del cambio de uso de la tierra, las plantaciones forestales pueden producir alteraciones sobre el contenido de carbono en diferentes componentes del sistema respecto del uso anterior. La transformación de tierras agrícolas en sistemas forestales puede afectar el carbono del suelo (Jug *et al.*, 1999; Guo y Gifford, 2002), tanto en calidad y cantidad como en su distribución espacial (Paul *et al.*, 2002). En una plantación forestal en crecimiento, el balance de carbono permanece en desequilibrio por un largo período de tiempo (Polglase *et al.*, 2000). Procesos edáficos como la incorporación de carbono fresco, la descomposición (Robertson y Paul, 2000) y la respiración, una de las principales causas de pérdida de carbono del suelo (Lal, 2004; Maestre y Cortina, 2003; Grove *et al.*, 2001), se ven afectados en alguna medida. Asimismo, el aumento de biomasa arbórea y de la hojarasca por el crecimiento de la forestación está fuertemente ligado a procesos edáficos, y casi todas las prácticas silvícolas pueden afectar el carbono del suelo de alguna manera (Olsson y Boström, 1999; Zerva *et al.*, 2005).

En los Vertisoles del Noroeste de la Provincia de Entre Ríos, la preparación del suelo para la plantación de *Eucalyptus grandis* involucra prácticas intensivas, como el empleo de rastras pesadas y el subsolado profundo. Según Apezteguía (2005), como consecuencia del laboreo del suelo se produce una redistribución del carbono orgánico total (COT), ocasionada por la inversión del horizonte superior del suelo. Mientras que el carbono del suelo disminuye en los primeros centímetros por aumento de la descomposición, a mayores profundidades y a largo plazo se acumula carbono por presencia de raíces remanentes y formación de compuestos orgánicos secundarios (Vesterdal *et al.*, 2002; Paul *et al.*, 2002).

Debido a las elevadas concentraciones de lignina y compuestos aromáticos de la hojarasca de eucalipto (Duryea *et al.*, 1999), esta se acumula formando un “piso” sobre la superficie del suelo. La degradación de la hojarasca acumulada ocurre más lentamente que la de otras especies, favoreciendo la humificación (Eichhorn y Hütermann, 1999; Howard *et al.*, 1998) y la formación de compuestos de carbono más resistentes a la biodegradación. Esa fracción húmica insoluble de la materia orgánica del suelo es más estable en el suelo debido a su elevado peso molecular y al tipo de enlaces químicos, por lo cual se descompone lentamente bajo condiciones naturales y en combinación con minerales del suelo puede persistir por varios cientos de años (Eichhorn y Hüttermann, 1999). Por el contrario, la mayoría de las sustancias no húmicas de la materia orgánica son degradadas rápidamente por los microorganismos edáficos, así como la fracción soluble del carbono orgánico del suelo, que se encuentra disponible para los microorganismos y presenta gran variabilidad, ya que está expuesta a la lixiviación y a pérdidas por escorrentía (Ghani *et al.*, 2003; Hishi *et al.*, 2004).

Por otro lado, el mayor potencial de almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales se encuentra a menudo entre los componentes de la biomasa aérea (Peichl y Arain, 2006), mientras que la biomasa de raíces constituye también un importante reservorio de carbono (MacDicken, 1997). Los árboles desarrollan una gran biomasa, capturando, por consiguiente, grandes cantidades de carbono durante todo el periodo de cultivo (Sedjo, 2001). Una plantación joven, creciendo

rápida puede secuestrar grandes volúmenes de carbono adicional, proporcional al crecimiento de la biomasa. El aumento del stock de carbono puede ser el resultado del aumento de la biomasa forestal y/o del aumento del carbono en el suelo (Sedjo, 2001).

Con respecto al manejo de las plantaciones, Vesterdal *et al.* (2001) evaluaron el efecto de diferentes intensidades de raleo en plantaciones de *Picea* en tres sitios, encontrando que el contenido de carbono del suelo se relacionaba negativamente con la intensidad de raleo. Estos autores atribuyen los menores contenidos de carbono en los sitios raleados a las condiciones favorables para el desarrollo de organismos descomponedores, generadas por la apertura del dosel. Sin embargo, las diferencias en contenidos de carbono del suelo fueron más significativas entre los sitios que entre los tratamientos, observándose mayores contenidos de carbono en los sitios de suelo menos fértil.

Por último, considerar la producción de madera y la fijación de carbono en conjunto requiere establecer el manejo silvícola y el largo de rotación óptimos, analizando dichos aspectos desde el punto de vista económico, incluyendo los ingresos adicionales por carbono secuestrado, evaluado por diferentes métodos de contabilidad (Loza-Balbuena, 2001). Bajo ese esquema de manejo integral, para la estimación del carbono secuestrado en la biomasa de sistemas forestales es necesario contar con métodos rápidos y sencillos (Zianis y Mencuccini, 2004), como las ampliamente usadas ecuaciones de biomasa.

Ante la falta de información regional acerca del potencial de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* para fijar carbono, tanto en su biomasa como en la necromasa y en el suelo donde se encuentran establecidas, así como sobre el efecto del manejo silvícola aplicado, se llevó a cabo el presente trabajo de Tesis, con cuyos resultados se espera realizar un aporte significativo de conocimientos con respecto a la problemática planteada.

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio fue definida en función de los suelos y su potencialidad para realizar proyectos forestales destinados a secuestrar carbono, comprendiendo los departamentos Federal, Federación y Concordia de la Provincia de Entre Ríos (Figura 1.1), al Oeste de la zona considerada tradicionalmente forestal. La región corresponde, desde el punto de vista fitogeográfico, al Parque Mesopotámico. La vegetación natural original corresponde a un monte xerofítico, en el cual dominan las especies leguminosas: ñandubay (*Prosopis affinis*), algarrobos (*Prosopis alba*, *Prosopis nigra*) y acacias (*Sesbania virgata*, *Sesbania punicea*, *Acacia caven*, *Acacia bonariensis*, *Acacia atramentaria*, *Acacia praecox*) (Parodi, 1964; Jozami y Muñoz, 1984).

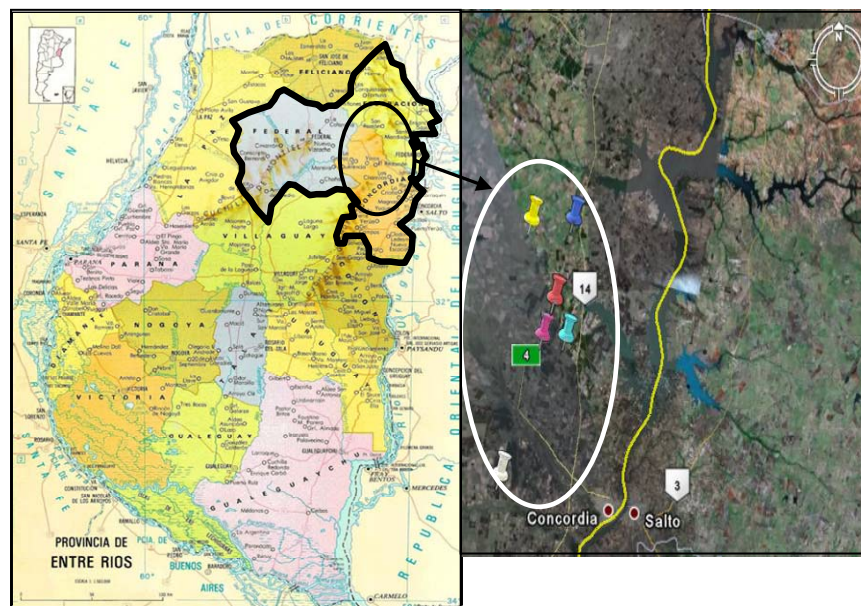


Figura 1. 1 Área de la Provincia de Entre Ríos donde se ubican los sitios estudiados. Las marcas de posición en la imagen indican las plantaciones y pastizales evaluados.

El uso ganadero extensivo que soporta la región desde hace varios siglos, la extracción de postes y leña, así como el aprovechamiento con fines industriales de los ejemplares de valor maderero del monte nativo han dado lugar a un monte empobrecido y a zonas de pastizales con muy baja cobertura arbórea.

Los suelos

Los suelos predominantes son Peludertes argiacuólicos, del Orden Vertisol. Este Orden agrupa suelos con altos contenidos de arcilla, y que presentan en algún período del año grietas de más de 1 centímetro de ancho y de más de 50 centímetros de profundidad, y alguna combinación de micro-relieve *gilgai*, superficies de fricción (*slickensides*) y agregados estructurales cuneiformes entre los 25 cm y 100 cm de profundidad. El micro-relieve *gilgai* está bien desarrollado, con ciclos entre cresta y cresta de hasta 7 metros y diferencias de altura entre cresta y bajo de 15 a 20 cm.

Estos suelos tienen una característica distintiva: una vez mezclados los primeros 18 cm, tienen más de 30% de arcilla en todos los horizontes sub-superficiales hasta una profundidad de 50 cm, presentando como principal problema el drenaje deficiente. Pueden además presentar un elevado porcentaje de arena, de hasta el 25%, originada de aportes eólicos de las arenas del Río Uruguay sobre los materiales limo-calcáreos.

El contenido de carbono orgánico de estos suelos en condiciones naturales se encuentra entre 2,61% hasta los 16 cm, descendiendo de 1,14% en la profundidad de 28–43 cm hasta 0,10% entre 1 m y 1,16 m. Las arcillas presentes son del tipo montmorillonítica, finas, expandibles, responsables de uno de los mayores problemas que tienen estos suelos: el drenaje deficiente. Por un lado, durante los períodos lluviosos el agua en el perfil está en exceso y por otro, hay déficit de agua en el perfil después de algún tiempo sin precipitaciones. Debido a la baja permeabilidad de los horizontes sub-superficiales, parte considerable del agua escurre superficialmente, generando problemas de erosión (INTA - Gob. de Entre Ríos, 1993).

El clima

Esta región está comprendida, en su mayor parte, dentro del clima Templado húmedo de llanura y al Noreste una pequeña franja se encuentra en el

clima Subtropical húmedo de llanura. El perfil del clima templado está configurado con una temperatura media anual de 18.5 °C, y varía entre 25 °C en enero y 12,3 °C en junio. Presenta una definida sucesión estacional, registrándose menor cantidad de lluvia durante el invierno. La franja subtropical húmeda de llanura se caracteriza por inviernos suaves, con amplitud térmica que no excede a 13 °C y un grado de humedad del aire del 70 %, que reduce la oscilación diaria de la temperatura. Hacia el Oeste el clima se hace más continental, con temperaturas estivales mayores (25,6 °C) e invernales más bajas (11,9 °C). El promedio anual de precipitaciones es de 1275 mm para el departamento Concordia, siendo abril el mes más lluvioso y el mes de agosto el menos lluvioso. El régimen pluviométrico es del tipo monzónico, concentrándose más del 60% de las precipitaciones de octubre a abril. La influencia constante de vientos del Noreste incide en las abundantes precipitaciones que se registran (INTA- Gob. Entre Ríos, 1993).

Los pastizales naturales y su uso

Las principales actividades productivas que se desarrollan en los pastizales característicos de los suelos Vertisoles de la Provincia de Entre Ríos son ganadería de cría y cultivo de arroz (Pueyo e Iacopini, 2005). Esos pastizales naturales presentan una gran heterogeneidad, tanto por el clima, el suelo y la presencia o ausencia de monte, como por el manejo de los animales (Pueyo *et al.*, 2005). Además, muchos de estos pastizales ya muestran signos marcados de degradación (Landi, 2000), ya sea por sobre-pastoreo o bien por haber sido manejados con arado o quemas reiteradas, causando la pérdida de muchas especies originales y la aparición de otras especies (Rhades, 2003). La presencia de malezas quitando superficie efectiva de aprovechamiento es un claro indicio de ese deterioro (Landi, 2000). Entre esas malezas se presentan principalmente las chilcas, grupo de arbustos perennes, leñosos, que desarrollan abundante sistema radical, lo que les permite resistir las más variadas condiciones adversas. Entre las especies de importancia económica más difundidas en la Provincia de Entre Ríos se encuentran *Eupatorium*

buniifolium (chilca negra común), *Baccharis spicata* (chilca blanca), *Baccharis dracundifolia*, *Baccharis pingraea*, *Baccharis punctulata* y *Eupatorium laevigatum* (chilcas). Las chilcas se adaptan a distintos tipos de ambientes, dándose situaciones en que alcanzan prácticamente un 100% de ocupación (Marchesini, 2003).

Los valores medios de receptividad forrajera de los campos naturales de los Vertisoles de la Provincia de Entre Ríos varían entre 0,2 equivalente vaca (EV) en mayo y 0,8 EV en agosto, siendo el promedio 0,4 EV ha⁻¹ día⁻¹ (un EV representa el promedio anual de los requerimientos de una vaca de 400 kg de peso, de raza británica, que gesta y cría un ternero hasta el destete a los 6 meses de edad con 160 kg de peso, incluido el forraje consumido por el ternero; también equivale a los requerimientos de un novillo de 410 kg de peso que aumenta 500 gramos por día) (Sevilla y De Battista, 2002). Los bajos niveles productivos, la falta de asociación y participación, la escasez de líneas de crédito para el sector (IIE, 2002), y el aumento del valor de la tierra han contribuido a que desde hace algunos años estos campos estén siendo transformados a plantaciones de *Eucalyptus grandis*.

La actividad forestal en los vertisoles

La marginalidad productiva de los Vertisoles para la actividad forestal está dada principalmente por los crecimientos sensiblemente inferiores a los que se logran en suelos mestizos (Inceptisoles) y arenosos (Entisoles). El incremento medio anual (IMA) en volumen de *Eucalyptus grandis* en suelos arcillosos (Vertisoles) es de 26 m³ ha⁻¹ año⁻¹, mientras que en los suelos arenoso (Cuarzicamente óxico) y mestizo (Haplumbrepte fluvéntico) los IMA en volumen son de 33 y de 51 m³ ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Marcó, 1988). Las principales dificultades para la producción forestal de especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus grandis* en los Vertisoles se presentan en las etapas iniciales de la plantación. En estos suelos las plantas crecen más lento que en los suelos arenosos y mestizos, tardando más tiempo en alcanzar alturas que les permitan superar la competencia con malezas y los efectos dañinos de las heladas, que afectan tanto la supervivencia inicial (durante los 3 meses

posteriores a la plantación) como la supervivencia a los 18 meses (momento en que se considera plantación lograda). Si bien los Vertisoles son suelos menos aptos para forestación con respecto a los suelos mestizo y arenoso, resultan potencialmente aptos para forestaciones como sumideros de carbono. La venta de certificados de carbono podría constituir, consiguientemente, un incentivo para el productor ganadero a la diversificación de su empresa a través de la forestación.

En cuanto al turno de corta, las plantaciones de *Eucalyptus grandis* en suelos Vertisoles son tradicionalmente manejadas en turnos de 15 o más años, pudiendo encontrarse desde plantaciones sin conducción hasta forestaciones más jóvenes con raleos y podas. El manejo forestal ha involucrado, tradicionalmente, sólo la producción de madera. A pesar de que las forestaciones siempre han secuestrado carbono, este servicio ambiental ha permanecido inadvertido y no remunerado (Sedjo, 2001). Sin embargo, la producción de madera y la fijación de carbono pueden considerarse en conjunto, entendiendo que a medida que el bosque permanece mayor tiempo, aumenta el carbono secuestrado, y por consiguiente su valor como servicio ambiental. Una vez establecido el objetivo de fijar carbono como un servicio ambiental rentable, las decisiones de manejo silvícola de las plantaciones forestales que habitualmente se toman en esta región, basadas exclusivamente en la producción de madera, deberán además considerar los procesos relacionados a la fijación del carbono en las componentes de los sistemas forestales.

HIPÓTESIS

La cantidad y calidad de carbono fijado en forestaciones de *Eucalyptus grandis* en Vertisoles de la Provincia de Entre Ríos varía en las componentes de los sistemas forestales según la edad de la plantación y el manejo silvícola aplicado.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la edad y del manejo silvícola de plantaciones de *Eucalyptus grandis*, sobre el carbono almacenado en la biomasa arbórea, la necromasa y el suelo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el contenido de carbono orgánico total y carbono de sustancias húmicas del suelo de pastizales y plantaciones de *Eucalyptus grandis* de diferentes edades, con raleo y sin raleo.

2. Determinar la biomasa arbórea en plantaciones con raleo y sin raleo, de árboles individuales de *Eucalyptus grandis*.

3. Ajustar y validar funciones de biomasa aérea y total de árboles individuales para estimar el carbono fijado en plantaciones de *Eucalyptus grandis* con raleo y sin raleo.

4. Determinar relación de humificación, grado de humificación y grado de polimerización de las sustancias húmicas del suelo de los sitios seleccionados.

5. Establecer la relación entre las prácticas de conducción del monte aplicadas en cada caso y el carbono total almacenado en cada compartimento del sistema.

6. Estimar el carbono total (en suelo, biomasa total y necromasa) de los pastizales y las plantaciones de *Eucalyptus grandis* seleccionados, para evaluar el efecto del cambio de uso del suelo en forma integral.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Apeztegia H. P. 2005. Dinámica de la materia orgánica de los suelos de la región semiárida central de Córdoba (Argentina). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Córdoba, Argentina, 151 pp.
- Capoor K. y Ambrosi P. 2009. State and trends of the carbon market 2009. Washington, D.C., 71 pp. Publicado en internet, disponible en http://wbcarbonfinance.org/docs/State_Trends_of_the_carbon_Market_2009_FINAL_26_May09.pdf. Activo septiembre de 2009.
- Duryea M. L., Englis R. J. y Hermansen L. A. 1999. A comparison of landscape mulches: chemical, allelopathic, and decomposition properties. *Journal of Arboriculture* 25(2):88-97.
- Eichhorn J. y Hütermann A. 1999. Mechanisms of humus dynamics and nitrogen mineralization. En: *Going Underground, Ecological studies in forest soils*. Rastin N. y Bauhus J. (eds.). Research signpost, Trivardim, India, 37 pp.
- Ghani A., Dexter M. y Perrot K. W. 2003. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 35:1231-1243.
- Grove T.S., O'Connell A.M., Mendham D., Barrow N. J. y Rance S. J. 2001. Sustaining the productivity of tree crops. A report for the RIRDC, Land and Water Australia. FWPRDC Joint Venture Agroforestry Program. Rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication N° 01/09, 68 pp.
- Guo L. B. y Gifford R. M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8(4):345-360.
- Hishi T., Hirobe M., Tateno R. y Takeda H. 2004. Spatial and temporal patterns of water-extractable organic carbon (WEOC) of surface mineral soil in a cool temperate forest ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry* 36:1731-1737.
- Howard P. A. J., Howard D. M. y Lowe L. E. 1998. Effects of tree species and soil physico- chemical conditions on the nature of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 30(3):285-297.
- IIE. 2002. Balance de la economía argentina en 2002. Un enfoque regional. Instituto de Investigaciones Económicas – Bolsa de Cereales de Córdoba. Córdoba.
- INTA- Gobierno de Entre Ríos. 1993. Carta de Suelos de La República Argentina, Departamento Concordia, Provincia de Entre Ríos. Plan Mapa de Suelos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 10.
- IPCC. 2001. Cambio climático 2001: Mitigación. Informe especial del Grupo de trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen técnico. Davidson O. y Metz B. (Copresidentes del Grupo de trabajo III del IPCC sobre mitigación del cambio climático). Equipo de redacción principal: Banuri T., Barker T., Bashmakov I., Blok K., Christensen J., Davidson O., Grubb M., Halsnaes K., Jepma C., Jochem E., Kauppi P., Krankina O., Krupnick A., Kuijpers L., Kverndokk S., Markandya A., Metz B., Moomaw W., Moreira J., Morita T., Pan J., Price

- L., Richels R., Robinson J., Sathaye J., Swart R., Tanaka K., Taniguchi T., Toth F., Taylor T., Weyant J. 28 de febrero-3 de marzo de 2001. IPCC, Accra, Ghana, 85 pp.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo de redacción principal: Pachauri R. K. y Reisinger A. (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza, 104 pp.
- Jandl R. 2005. Secuestro de carbono en bosques- El papel del suelo. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1):57-62.
- Jozami J. M. y Muñoz J. D. 1984. Árboles y arbustos indígenas de la Provincia de Entre Ríos, 3ª edición. Impreso en Medios Audiovisuales y Gráficos, Santa Fe, Argentina.
- Jug A., Mackeshin F., Rehfuss K. E. y Hofmann-Schielle C. 1999. Short rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III: Soil ecological effects. *Forest Ecology and Management* 121(1):85-99.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1625.
- Landi M. 2000. Pastizales naturales: inventario de recursos y sistemas de pastoreo. 4ª Jornada regional sobre manejo de pastizales naturales. San Cristóbal, Santa Fe. Publicado en internet, disponible en <http://www.produccion-animal.com.ar>. Activo mayo de 2009.
- Larrea I. 2009. Un acercamiento a los mercados voluntarios de carbono. Publicado en internet, disponible en <http://www.factorco2.com/cas/site/default.asp>. Activo mayo de 2009.
- Loza-Balbuena I. 2001. Impacto del mercado del carbono en la performance económica de proyectos forestales- Estudio de caso para Pinus taeda en Uruguay. Simposio Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. 18-20 octubre de 2001. Valdivia, Chile.
- MacDicken K. G. 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. Forest Carbon Monitoring Program 87 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.winrock.org/ecosystems/files/carbon.pdf>. Activo febrero de 2007.
- Maestre F. T. y Cortina J. 2003. Small - scale spatial variation in soil CO2 efflux in a mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology* 23:199-209.
- Marchesini E. 2003. Control de chilcas. Hoja informativa electrónica N° 99. EEA Concepción del Uruguay. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/informacion/boletines/hie/03/99.htm>. Activo septiem-bre de 2009.
- Marcó M. A. 1988. Incidencia del origen de la semilla y el sitio en el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en el Nordeste de Entre Ríos. III° Jornadas Forestales de Entre Ríos. Recopilación de trabajos desde 1986 a 2006. XXI Jornadas Forestales de Entre Ríos, 4º Ed. ISSN 1667-9253.

- Norverto C. A. 2002. Metodologías para el análisis costo - beneficio de usos del suelo y fijación de carbono en sistemas forestales para el mecanismo de desarrollo limpio. Separata, SAGPyA Forestal N° 25. Diciembre 2002. Publicación trimestral de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Gobierno de la República Argentina, 20 pp.
- Olschewski R. y Benítez P. 2005. Secondary forests as temporary carbon sinks? The economic impact of accounting methods on reforestation projects in the tropics. *Ecological Economics* 55:380-394.
- Olsson M. y Boström B. 1999. Uncertainties in measurements of carbon stocks in forest soils- effects of silvicultural measures. Presentation at the UNFCCC Workshop on Land-Use, Land-Use Change and Forestry, Indianapolis, 26-28 April.
- Parodi L. R. 1964. Las regiones fitogeográficas argentinas. En: Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2(1). ACME S.A.C.I., Buenos Aires, pp. 1-14.
- Paul K. I., Polglase P. J., Nyakuengama J. G. y Khanna P. K. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168:241-257.
- Peichl M. y Arain M. A. 2006. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and forest meteorology* 140:51-63.
- Polglase P. J., Paul K. I., Khanna P. K., Nyakuengama J. G., O'Connell A. M., Grove T. S. y Battaglia M. 2000. Change in soil carbon following afforestation or reforestation: review of experimental evidence and development of a conceptual framework. National Carbon Accounting System. Technical Report N° 20. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, Commonwealth of Australia, 117 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>. Activo mayo de 2009.
- Pueyo J. M. e Iacopini M. L. 2005. Diagnóstico de la Ganadería vacuna en Entre Ríos. Información de Bovinos. Estación Experimental Agropecuaria Paraná, INTA. Publicado en internet, disponible en http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion_animal/bovino/informes/10426_051028_diag.htm. Activo diciembre de 2007.
- Pueyo J. M., Iacopini L., Fonseca J., Burns J., Bonini Y., Ludi R. y Grancelli R. 2005. Medición de la Producción Primaria del Pastizal Natural en el Centro Norte de la Provincia de Entre Ríos. Hoja informativa Electrónica N° 128. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/05/128.htm>. Activo julio de 2009.
- Rhades L. 2003. Manejo del pastizal natural. Hoja Informativa Electrónica N° 81. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/03/81.htm>. Activo febrero de 2007.

- Robertson G. P. y Paul E. A. 2000. Decomposition and soil organic matter dynamics. En: *Methods in Ecosystem Science*. Sala O. E., Jackson R. B., Mooney H. A. y Howarth R. W. (eds.). Springer - Verlag, New York, pp. 105-115.
- Salgado Flores L. 2004. El mecanismo de desarrollo limpio en actividades de uso de la tierra, cambio de uso y forestería y su potencial en la Región Latinoamericana. CEPAL. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 88. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Naciones Unidas. Santiago de Chile, 84 pp. Publicado en internet, accesible en http://www.fonamperu.org/general/mdl/documentos/cepal_lulucf.pdf. Activo mayo de 2009.
- Sedjo R. A. 2001. Forest carbon sequestration: some issues for forest investments. Discussion Paper 01-34. Resources for the future. Publicado en internet, disponible en <http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-01-34.pdf>. Activo septiembre de 2009.
- Sedjo R. A. 2001. Forest carbon sequestration: some issues for forest investments. Discussion Paper 01-34. Resources for the future. Publicado en internet, disponible en <http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-01-34.pdf>. Activo septiembre de 2009.
- Sevilla G. y De Battista J. 2002. Receptividad de los recursos forrajeros en los vertisoles de Entre Ríos. Hoja Informativa Electrónica N° 47. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/02/47.htm>. Activo febrero de 2007.
- Solomon, S., Qin D., Manning M., Alley R. B., Berntsen T., Bindoff N. L., Chen Z., Chidthaisong A., Gregory J. M., Hegerl G. C., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B.J., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Matsuno T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Somerville R., Stocker T. F., Whetton P., Wood R. A. y Wratt D. 2007. Technical Summary. En: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M. y Miller H. L. (eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Vesterdal L., Ritter E. y Gundersen P. 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169:137-147.
- Vesterdal L., Ritter E., Jörgensen F. V., Gundersen P. y Hansen K. 2001. Soil carbon stores- Influence of afforestation of former arable land and of some forest management practices. Cost E21: Contribution of forests and forestry to mitigate greenhouse effects. EFI: The Leading Forest Research Network in Europe. Publicado en internet, disponible en <http://www.efi.fi/coste21/ftp/2001-04-26/vesterdal-sum.pdf>. Activo febrero de 2007.
- Zerva A. 2004. Effects of afforestation and forest management on soil carbon dynamics and trace gas emissions in a sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong) Carr.) forest. Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, April 2004, The University of Edinburgh, Scotland, 271 pp. Collections:

Atmospheric and Environmental Science PhD thesis collection. Publicado en internet, disponible en <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/574>. Activo noviembre de 2007.

- Zerva A., Ball T., Smith K. A. y Mencuccini M. 2005. Soil carbon dynamics in a sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) chronosequence on a peaty gley. *Forest Ecology and Management* 205(1-3):227-240.
- Zianis D. y Mencuccini M. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187:311-332.

CARBONO EDÁFICO

INTRODUCCIÓN

La transformación de tierras agrícolas en sistemas forestales puede alterar el contenido de carbono orgánico total del suelo (COT) (Jug *et al.*, 1999; Guo y Gifford, 2002), así como producir cambios en su calidad, cantidad y distribución espacial (Paul *et al.*, 2002). Las plantaciones forestales pueden afectar de diferente manera el COT de acuerdo al sistema que reemplazan. De acuerdo con Guo y Gifford (2002) si la transformación es de pastizales naturales a forestaciones, los stocks de COT decaen; si la transformación es de sistemas agrícolas a forestaciones, los stocks de COT se incrementan. Sin embargo, existe evidencia científica de que los cambios pueden ocurrir en cualquier sentido. Debido a ello, IPCC (2005) asumen que, en caso de que no se disponga de información específica, entre pastizal y bosque no hay cambios en el contenido de COT. En una plantación forestal en crecimiento el balance de carbono permanece en desequilibrio por un largo período de tiempo (Polglase *et al.*, 2000), afectando procesos edáficos como la incorporación de carbono fresco, su descomposición (Robertson y Paul, 2000) y la respiración edáfica, una de las principales causas de pérdida de COT (Grove *et al.*, 2001; Maestre y Cortina, 2003; Lal, 2004). Asimismo, casi todas las prácticas silvícolas pueden afectar el COT de alguna manera (Olsson y Boström, 1999; Zerva, 2004).

Por otra parte, los principales mecanismos de secuestro de carbono en el suelo incluyen la agregación y una alta tasa de humificación (Lal, 2007). De los componentes de la materia orgánica, las sustancias húmicas muestran una mayor habilidad relativa para promover la formación de agregados estables, y sus efectos son más persistentes (Swift, 1991). Durante los primeros estadios de la humificación, las propiedades de la materia orgánica dependen principalmente de la composición

química de la biomasa aportada por los vegetales (Almendros *et al.*, 1982). En el caso de los eucaliptos, la degradación de la hojarasca ocurre más lentamente en comparación con otras especies, debido a las elevadas concentraciones de lignina y compuestos aromáticos que la caracterizan (Duryea *et al.*, 1999), favoreciendo la humificación (Eichhorn y Hütermann, 1999; Howard *et al.*, 1998). Es decir, la composición química del mantillo de eucalipto permite la formación de compuestos estables de carbono, resistentes a la biodegradación.

Los pastizales naturales en la Provincia de Entre Ríos, destinados principalmente a la ganadería de cría, presentan una gran heterogeneidad (Pueyo *et al.* 2005), mostrando además signos marcados de degradación, como la presencia de malezas quitando superficie efectiva de aprovechamiento (Landi, 2000). Estas condiciones, sumadas a los bajos niveles productivos, la falta de asociación y participación, y la escasez de líneas de crédito para el sector (IIE, 2002) han contribuido a que desde hace algunos años estos campos estén siendo transformados a plantaciones de *Eucalyptus grandis*.

A pesar de que el cambio de uso de estos suelos sigue extendiéndose, no existen estudios acerca del efecto del reemplazo de pastizales con uso ganadero por plantaciones de eucalipto, sobre el carbono orgánico del suelo en esta región. El objetivo de esta parte del trabajo de tesis fue evaluar el impacto del reemplazo de sistemas de ganadería de cría por plantaciones de *Eucalyptus grandis*, sobre la cantidad, calidad y distribución vertical del carbono orgánico en el tiempo, en suelos Vertisoles de la Provincia de Entre Ríos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende los departamentos Federal, Federación y Concordia de la Provincia de Entre Ríos. Los suelos predominantes pertenecen al Gran Grupo Peludertes argiacuólicos, del Orden Vertisol. Debido a que resulta poco práctico estudiar durante décadas los cambios del carbono en los suelos, una

alternativa válida es considerar sitios de diferentes edades asumiendo que cada uno corresponde a un punto en el tiempo. Si los sitios son independientes y se los estudia simultáneamente, esta cronosecuencia permite inferir acerca del comportamiento del carbono en el tiempo (Yanai *et al.*, 2003). En base a esta metodología, entre 2005 y 2008 se seleccionaron 15 sitios de estudio: once rodales de *Eucalyptus grandis* de 1 a 9 años, de los cuales 8 no fueron raleados nunca y 3 se ralearon una vez; y cuatro pastizales con uso ganadero, colindantes o vecinos próximos a esas plantaciones, los cuales se tomaron como línea de base o edad “cero”. Para la selección de los rodales se tuvo en cuenta que su uso anterior haya sido ganadería de cría bajo manejos similares.

Diseño del muestreo

Los 15 sitios se muestrearon según un diseño anidado: en cada sitio se instalaron dos transectas, separadas para asegurar la independencia de las muestras. Sobre las progresivas de cada transecta se sortearon 3 parcelas cuadradas de 400 a 600 m². Las transectas se instalaron con ciertas restricciones: el punto de inicio debía encontrarse a no menos de 20 m del borde de la forestación o del pastizal, en las partes más altas de los lotes y en dirección perpendicular a la pendiente principal. En cada parcela se tomaron muestras compuestas de suelo, a las profundidades 0 a 10 cm (25 sub-muestras), 10 a 25 cm (25 sub-muestras) y 25 a 50 cm (10 sub-muestras).

Métodos

Carbono orgánico total del suelo (COT) por combustión seca (Nelson y Sommers, 1996): las determinaciones se hicieron en un analizador automático de carbono marca LECO, modelo CR-12. Las muestras fueron incineradas en corriente de oxígeno a una temperatura de 1570 °C, y el dióxido de carbono producido se midió por espectrometría de absorción. A las muestras de suelo de todos los sitios también se les determinó el carbono inorgánico de los carbonatos.

Contenido de ácidos húmicos por método de extracción alcalina (Schnitzer, 1982): el método se basa en el fraccionamiento de la materia orgánica de acuerdo con las diferencias en la solubilidad de sus fracciones. Para suelos con carbonatos libres se aplica un pre-tratamiento con ácido diluido para eliminar el carbono inorgánico. Luego se trata la muestra de suelo con el extractante (NaOH 0,1 M) y el sobrenadante se separa por decantación.

Densidad aparente del suelo (DA) por método del cilindro: se extrajeron cuatro muestras en cada parcela y a las mismas profundidades definidas para el muestreo de suelo. Se emplearon cilindros de acero inoxidable de 100 cm³ (5,5 cm de altura x 4,5 cm de diámetro). El muestreo de DA se realizó con el suelo a capacidad de campo.

Con los resultados de las determinaciones de COT, sustancias húmicas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, se calcularon la relación de humificación (Rh) (Acosta *et al.*, 2004; Gigliotti *et al.*, 2005) (2.1), el grado de humificación (Gh) (Orlov, 1995) (2.2) y el grado de polimerización y condensación (Gp) (Roig *et al.*, 1988) (2.3). Para los cálculos se tomaron los contenidos de carbono en ácidos húmicos (56,4%) y en ácidos fúlvicos (49,5%) según Paul y Clark (1996).

$$R_h (\%) = \frac{C_{sh}}{COT} \times 100 \quad (2.1)$$

$$G_h (\%) = \frac{C_{ah}}{COT} \times 100 \quad (2.2)$$

$$G_p = \frac{C_{ah}}{C_{af}} \quad (2.3)$$

$$C_{sh} = C_{af} + C_{ah} (\%) \quad (2.4)$$

Donde C_{ah}: contenido de carbono de los ácidos húmicos (%);

C_{af}: contenido de carbono de los ácidos fúlvicos (%);

C_{sh}: contenido de carbono de las sustancias húmicas (%);

Análisis estadístico

Se analizaron los datos de COT, RH, GH y GP con análisis de varianza (ANOVA) para los primeros 50 centímetros del perfil, según el diseño de muestreo anidado, en el que el factor “transecta” está anidado en el factor “edad”.

En primer lugar se analizaron los datos de las plantaciones sin raleo, tomando los valores de carbono orgánico total y de sustancias húmicas de los cuatro pastizales con uso ganadero como línea base o edad “cero”, para evaluar el efecto del cambio de uso del suelo. Las medias de las edades se compararon con test de Tukey al 95% de confianza y se contrastaron medias del contenido de carbono edáfico de acuerdo a la edad de las plantaciones: pastizales (edad cero o de referencia), plantaciones jóvenes (de 1 a 3 años) y plantaciones adultas (8 y 9 años). Seguidamente, se seleccionaron los sitios con raleo para compararse con los pastizales con ganadería. Se estudiaron con ANOVA y test de Tukey de diferencias entre medias y se contrastaron pastizales bajo uso ganadero (edad cero) y plantaciones raleadas de distintas edades. Por último, se analizaron los datos de las plantaciones raleadas y las plantaciones sin raleo de edades iguales, y se contrastaron las medias para cada edad. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico InfoStat versión 2008.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono orgánico total del suelo

Los suelos de las plantaciones sin raleo presentaron valores de COT variables entre 57,9 y 163,5 megagramos por hectárea (Mg ha⁻¹) en la capa de suelo

de 0 a 50 cm. Por otra parte, en las plantaciones raleadas el COT presentó valores entre 112,8 y 160,6 Mg ha⁻¹ en la capa de suelo de 0 a 50 cm, mientras que en los pastizales con ganadería de cría los contenidos de COT del suelo variaron entre 76,9 y 154,5 Mg ha⁻¹ (Figura 2.1). Con respecto a las diferencias de COT entre las plantaciones sin raleo y entre los pastizales con ganadería de cría, podrían deberse a la gran heterogeneidad que caracteriza a los pastizales, líneas base de las plantaciones de eucalipto. Esa heterogeneidad surge de la combinación de factores como el clima, el suelo, la presencia o ausencia de monte (Landi y Galli, 1984), años de uso, carga animal y falta de planificación del manejo de los pastizales (Rhades, 2003).

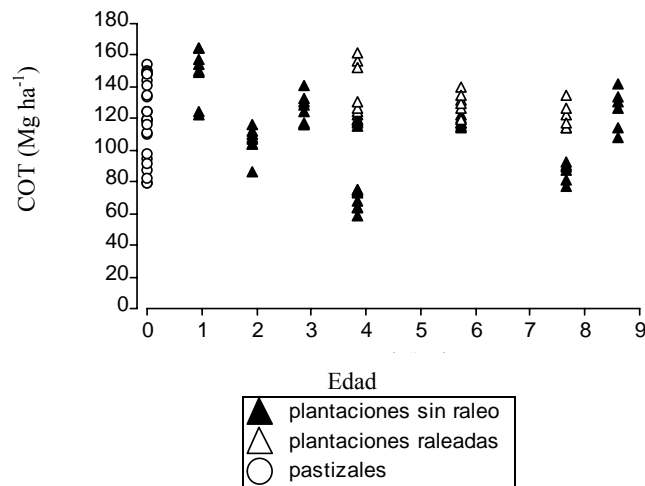


Figura 2. 1 COT de 0 a 50 cm de profundidad en todas las parcelas medidas, para cada edad, uso y manejo evaluados.

Según Vesterdal *et al.* (2002) el uso previo del suelo tiene un efecto significativo sobre el COT, y los cambios en el carbono del suelo luego de una forestación dependen de su edad y de la profundidad del suelo considerada, entre otros factores. Hasta los 50 cm de profundidad el COT del suelo presentó diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) entre las distintas edades, incluyendo a los pastizales con uso ganadero (edad cero).

Los valores de COT de las plantaciones jóvenes sin raleo (1, 2 y 3 años) no se diferenciaron del COT de los pastizales, pero resultaron significativamente mayores ($p=0,003$) que el COT de las plantaciones adultas (8 y 9 años) hasta 50 cm de profundidad (Figura 2.2), y esas diferencias se mantuvieron en las capas de 0 a 10 cm y de 10 a 25 cm, analizadas separadamente.

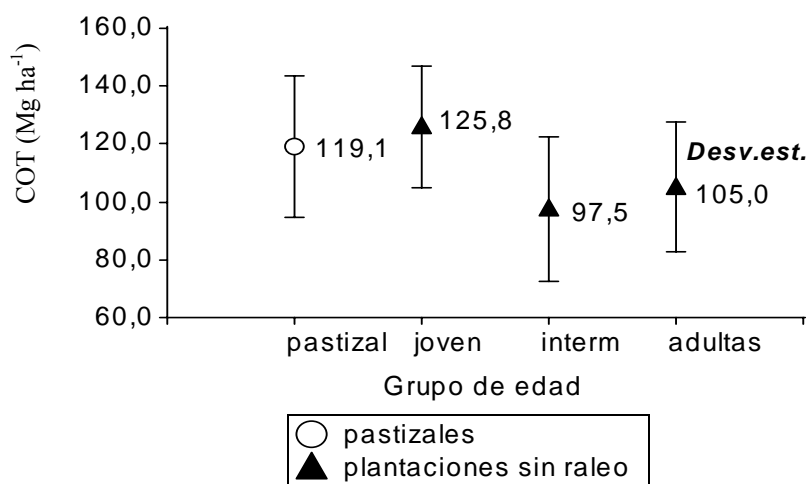


Figura 2. 2 COT promedio de los pastizales y de las plantaciones sin raleo agrupadas por clases de edad (joven: 1 a 3 años; intermedia: 4 a 6 años; adultas: 8 y 9 años), en la profundidad de 0 a 50 cm.

En las plantaciones adultas sin raleo, el COT descendió significativamente con respecto a los valores del pastizal ($p=0,0143$), en concordancia con Guo y Gifford (2002) y Paul *et al.* (2002), quienes plantean que si se transforman pastizales en forestaciones, los stocks de COT decaen. Estos resultados probablemente se deban a la acumulación de mantillo sobre el piso forestal y a la lenta incorporación de materia orgánica al suelo. Si bien la hojarasca de eucalipto favorece, por su composición, la formación de compuestos orgánicos resistentes a la degradación (Duryea *et al.*, 1999; Eichhorn y Hütermann, 1999; Howard *et al.*, 1998), ese proceso ocurre lentamente debido a las elevadas concentraciones de lignina y compuestos aromáticos que la caracterizan.

En cuanto a las plantaciones raleadas y a los pastizales con uso ganadero tomados como edad cero, el COT del suelo no presentó diferencias significativas entre distintas edades de 0 a 50 cm ($p=0,26$). De la misma forma, ninguno de los contrastes planteados fue significativo (valores $p>0,05$): COT de pastizales bajo uso ganadero (edad cero) versus COT de plantaciones raleadas de distintas edades (Figura 2.3). En oposición a estos resultados, Jug *et al.* (1999) exponen que el cultivo intensivo del suelo y el establecimiento de la plantación en los pastizales aceleran la mineralización de la materia orgánica, causando grandes pérdidas de carbono del suelo, mientras que, al remover parte de la cobertura del dosel, los raleos dejan al suelo expuesto a una mayor radiación y temperatura, aumentando consecuentemente la descomposición de la materia orgánica (Paul *et al.*, 2002).

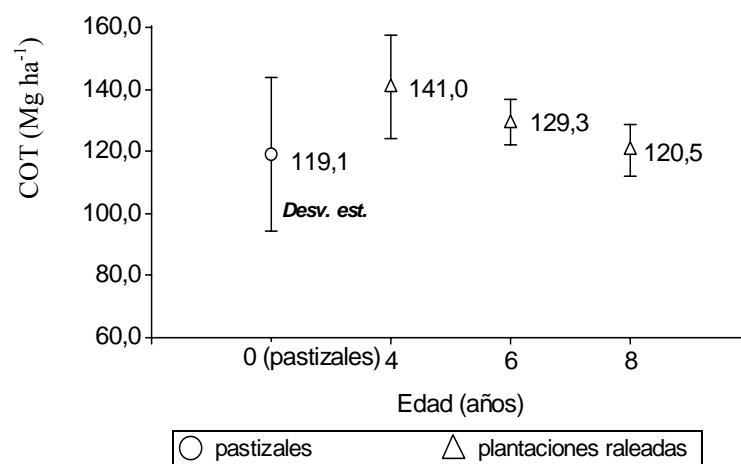


Figura 2. 3 COT promedio de los pastizales y de las plantaciones raleadas de distintas edades, en la profundidad de 0 a 50 cm.

Con respecto al carbono edáfico en los rodales forestales tomando en cuenta el manejo, es decir comparando las plantaciones con y sin raleo de diferentes edades de 0 a 50 cm (Figura 2.4), el COT de las plantaciones de 4 años sin raleo fue significativamente menor ($p<0,0001$) al de plantaciones de la misma edad raleadas, diferencia que se observó también entre las plantaciones de 8 años sin raleo y con raleo ($p=0,001$).

Entre las plantaciones de 6 años con raleo y sin raleo, en cambio, no se detectaron diferencias significativas en el COT. En las plantaciones raleadas el COT alcanza los máximos valores luego de la aplicación del raleo, probablemente a causa de la incorporación de los residuos en forma de compuestos orgánicos al suelo. En los años sucesivos tiende a estabilizarse, descendiendo sin alcanzar valores significativamente inferiores. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Henderson (1995), quien explica que los raleos aumentan el retorno del carbono al suelo a través de los residuos generados y la descomposición de las raíces, por lo que aumenta el COT. El mismo autor plantea que los cambios en el carbono del suelo podrían depender de la intensidad del raleo, pero que podrían no ser significativos a largo plazo.

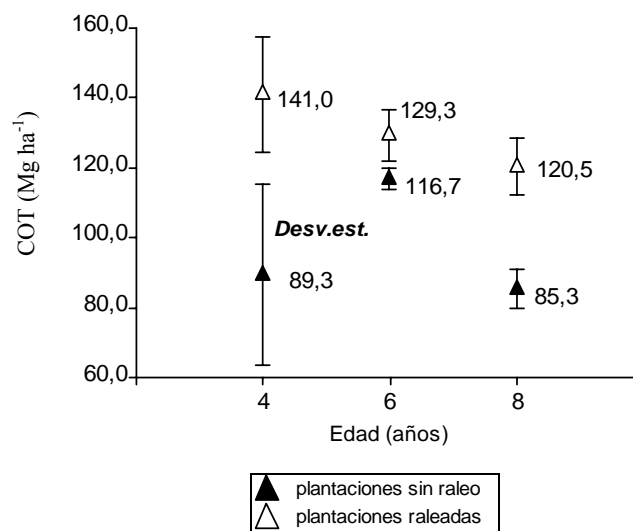


Figura 2. 4 COT promedio de las plantaciones agrupadas según la edad y el manejo, en la profundidad de 0 a 50 cm.

Por el contrario, Vesterdal *et al.* (2002) encontraron que en plantaciones de *Picea* raleadas los contenidos de carbono en el suelo eran menores que en plantaciones sin raleo y que estaban relacionados negativamente con la intensidad del raleo; esos autores atribuyeron dichos resultados a las condiciones favorables para el desarrollo de organismos descomponedores, generadas por la apertura del dosel en las plantaciones raleadas; no obstante, en ese estudio las diferencias en contenido de

COT encontradas fueron mayores entre los sitios que entre los tratamientos. Con resultados similares, Schedlbauer y Kavanagh (2008) plantean que el almacenamiento de carbono en el suelo no se relaciona con incrementos en el carbono acumulado en los compartimentos aéreos. En concordancia, Nilsen y Strand (2008) no encontraron diferencias significativas en el carbono edáfico entre tratamientos de distintas intensidades de raleo de rodales de *Picea abies* luego de 33 años de aplicados los mismos, atribuyendo a que el período de tiempo es probablemente demasiado corto para detectar diferencias en el carbono del suelo debidas al raleo.

Con respecto a la variación vertical del COT, el laboreo produce una redistribución ocasionada por la inversión del horizonte superior del suelo (Apezteguía, 2005). Jug *et al.* (1999) encontraron que el carbono orgánico total aumentaba en la parte superior del perfil luego de la forestación con álamo y sauces, pero que disminuía entre los 20 a 30 cm de profundidad. En el suelo superficial, entre 0 a 10 cm y 0 a 30 cm, el carbono generalmente disminuye durante los cinco primeros años por aumento de la descomposición, mientras que a mayores profundidades y a largo plazo, se acumula carbono por presencia de raíces remanentes y formación de compuestos orgánicos secundarios (Paul *et al.*, 2002; Vesterdal *et al.*, 2002; Trouve *et al.*, 1994).

En los Vertisoles del Noroeste de la Provincia de Entre Ríos la preparación del suelo para la plantación de eucalipto involucra prácticas intensivas como el empleo de rastras pesadas y el subsolado profundo, por lo que podría esperarse una redistribución del COT en el perfil, tal como lo explica Apezteguía (2005). Sin embargo, los resultados del Test de Tukey aplicado a los datos de COT por profundidad de muestreo no presentan un patrón definido. Las edades que se diferencian estadísticamente no son las mismas en cada profundidad analizada, ni siguen una tendencia. Estos resultados indican que las fluctuaciones del carbono del suelo en las distintas profundidades consideradas dependen del manejo y las condiciones de los suelos, así como de los aportes de carbono al suelo por el crecimiento de los árboles en las plantaciones de eucalipto (Paul *et al.*, 2002). Por

eso y por requerirse estudios de la dinámica del carbono en los suelos para su interpretación, resultados del análisis de la variación vertical del COT de acuerdo a la edad no se presentarán ni discutirán en el presente trabajo.

Relación de humificación, grado de humificación y grado de polimerización

Al analizar el carbono de las sustancias húmicas de 0 a 50 cm comparando los suelos de los pastizales (edad cero) y las plantaciones de eucalipto sin raleo, se observó que la relación de humificación (Rh) y el grado de humificación (Gh) difirieron significativamente ($p < 0,0001$ y $p < 0,0001$) a las distintas edades.

La Rh (Figura 2.5) y el Gh (Figura 2.6) de plantaciones jóvenes (1, 2 y 3 años) fueron significativamente menores ($p < 0,0001$ y $p < 0,0001$) a los de las plantaciones adultas (8 y 9 años). Estos resultados sugieren que a medida que crecen las plantaciones se acentúa la humificación, aumentando la fracción estable de la materia orgánica del suelo.

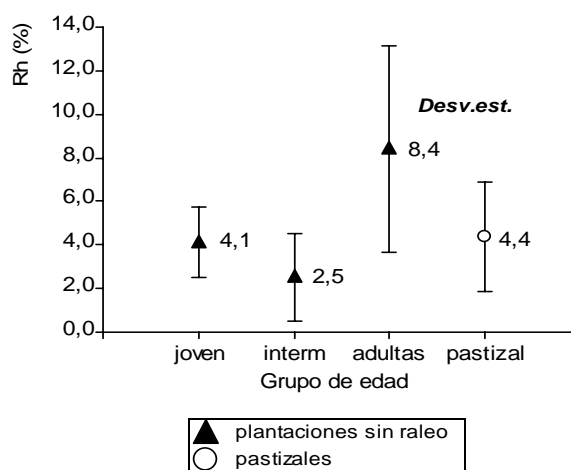


Figura 2. 5 Relación de humificación de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones sin raleo, agrupadas según los grupos de edad: joven: 1 a 3 años; intermedias: 4 a 6 años; adultas: 8 y 9 años; pastizales (líneas base).

De los componentes de la materia orgánica, las sustancias húmicas muestran una mayor habilidad relativa para promover la formación de agregados estables, y

sus efectos son más persistentes (Swift, 1991). En el suelo la materia orgánica (MO) está ligada a enlaces de diversa estabilidad y la fracción más estable permanece durante miles de años (Jandl, 2005). En algunos Vertisoles tropicales se ha comprobado que el principal mecanismo responsable de la estabilidad relativa de la MO persistente es la asociación físico-química de la misma con los componentes inorgánicos del suelo, en virtud de hacerse inaccesible a la degradación enzimática (Ruíz *et al.*, 1997).

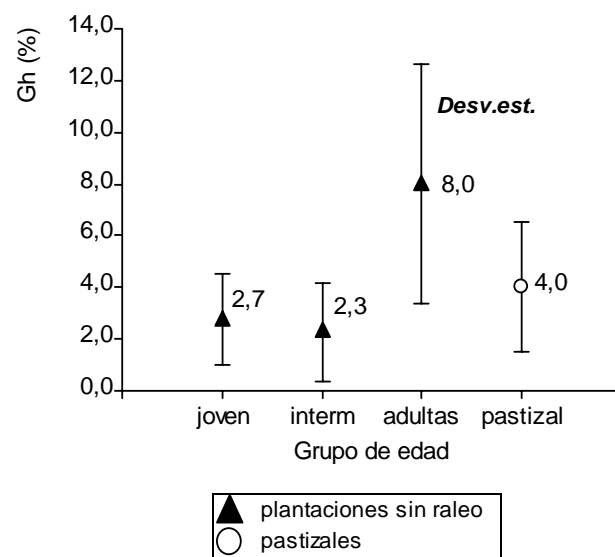


Figura 2. 6 Grados de humificación de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones sin raleo en grupos según la edad: joven: 1 a 3 años; intermedias: 4 a 6 años; adultas: 8 y 9 años; pastizales (puntos de referencia o líneas base).

Según Duffková *et al.* (2005), el grado de polimerización y condensación (Gp) es aplicado para evaluar la calidad del humus: valores mayores a 1 indican humus de alta calidad, resultado de la estabilidad a largo plazo de los ácidos húmicos. Los suelos Vertisoles estudiados presentan problemas de drenaje, son suelos con problemas de aireación, con reducida actividad microbiana y por consiguiente, con mayores obstáculos para que se produzcan efectivamente los procesos oxidativos involucrados en la humificación (Ruíz *et al.*, 1997). En el presente estudio no se encontraron diferencias significativas en cuanto al Gp entre los pastizales y las forestaciones de distintas edades, ni tampoco se diferenciaron las

plantaciones jóvenes de las adultas (Figura 2.7). Sin embargo, en algunas de las plantaciones sin raleo se presentaron valores de G_p mayores a 1, indicando que, en comparación con los pastizales las sustancias húmicas presentes en las plantaciones de eucalipto pueden alcanzar mayor complejidad. Esto podría deberse a que en los pastizales el suelo está más expuesto a la radiación solar y otros agentes ambientales, favoreciéndose más la mineralización que la humificación, como consecuencia del aumento de la temperatura y el descenso de la humedad del suelo (Muscolo *et al.*, 2007).

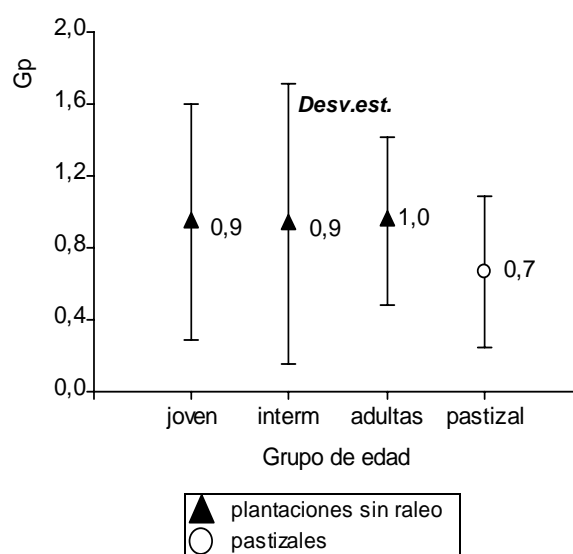


Figura 2. 7 Grado de polimerización de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones sin raleo agrupadas según edad: 1(jóvenes: 1 a 3 años), 2 (intermedias: 4 a 6 años), 3 (adultas: 8 y 9 años), 0 (pastizales, puntos de referencia o líneas base).

En el análisis de plantaciones raleadas y pastizales con ganadería, tanto R_h como G_h y G_p no se diferenciaron de acuerdo a las edades, ni fueron significativos los contrastes entre pastizales, plantaciones jóvenes y plantaciones adultas (Figura 2.8). Esto estaría indicando que el carbono de las sustancias húmicas y de los ácidos húmicos no se ven afectados significativamente por el raleo.

Por último, de la comparación entre plantaciones de acuerdo al manejo resultó que la R_h de las plantaciones de 6 años sin raleo fue significativamente

menor ($p=0,04$) que la relación de humificación de las plantaciones de la misma edad raleadas (Figura 2.9.a). De manera similar, el Gh de las plantaciones de 6 años sin raleo fue significativamente menor ($p=0,03$) que el Gh de las plantaciones raleadas de esa edad (Figura 2.9.b). Esto coincide con lo expuesto por Muscolo *et al.* (2007), quienes explican que la apertura de huecos en el dosel propicia mejores condiciones medioambientales para el proceso de humificación, en comparación con el dosel cerrado. Sin embargo, las plantaciones no se diferencian de acuerdo al manejo, en ninguna de las edades consideradas.

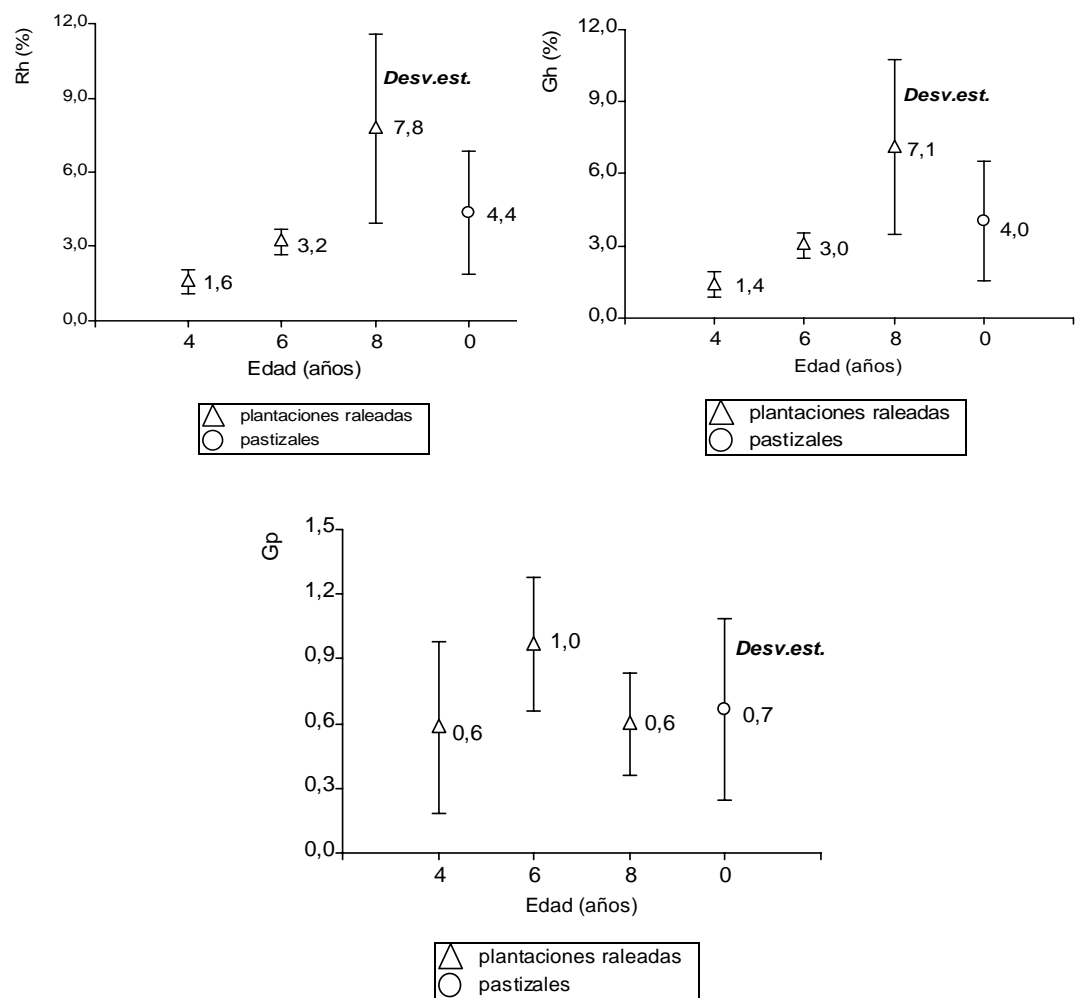


Figura 2. 8 Rh, Gh y Gp de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones raleadas y de los pastizales.

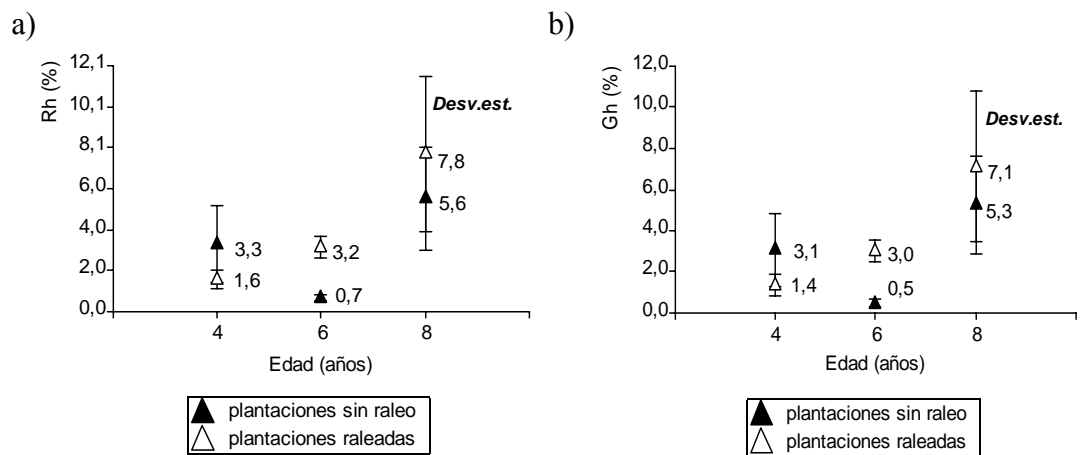


Figura 2. 9 Comparación de las sustancias húmicas del suelo de las plantaciones con raleo y sin raleo. a) Relación de humificación (Rh); b) grado de humificación (Gh).

CONCLUSIONES

- La transformación de pastizales degradados a plantaciones de eucalipto no afecta el COT en los primeros 6 años de establecidas las mismas.
- En plantaciones adultas sin raleo el COT disminuye significativamente con respecto a los pastizales que reemplazaron, pero aumenta el carbono proveniente de la materia humificada.
- El manejo de las plantaciones con raleos favorece la conservación del COT y el carbono de sustancias húmicas en el tiempo.
- La calidad de la materia humificada no varía significativamente al transformar pastizales a plantaciones de eucalipto.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Acosta Y.; Paolini J. y Benítez E. 2004. Índice de humificación y prueba de fitotoxicidad en residuos orgánicos de uso agrícola potencial. Rev. Fac. Agron. [online], 21(4):185-194. Publicado en internet, disponible en

http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S03787818204000400008&lng=pt&nr=iso. Activo mayo de 2008.

- Almendros G., Ibáñez J. J. y Polo A. 1982. Contribución al estudio del subsistema edáfico en los ecosistemas climáticos del Sistema Central (España). II. Caracterización fisicoquímica del humus en los ecosistemas del Puerto de la Quesera (Macizo de Ayllón). *Revue d'Ecologie et de Biologie du Sol* 19(2):151-162.
- Apeztegia H. P. 2005. Dinámica de la materia orgánica de los suelos de la región semiárida central de Córdoba (Argentina). Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Córdoba, Argentina, 151 pp.
- Duffková R., Kvítek T. y Voldřichová J. 2005. Soil organic carbon and nitrogen characteristics in differently used grasslands at sites with drainage and without drainage. *Plant and Soil Environment* 51(4):165-172.
- Duryea M. L., Englis R. J. y Hermansen L. A. 1999. A comparison of landscape mulches: chemical, allelopathic, and decomposition properties. *Journal of Arboriculture* 25(2):88-97.
- Eichhorn J. y Hütermann A. 1999. Mechanisms of humus dynamics and nitrogen mineralization. En: *Going Underground, Ecological studies in forest soils*. Rastin N. y Bauhus J. (eds.). Research signpost, Trivardim, India, 37 pp.
- Gigliotti G., Valentini F., Erriquens F. y Said-Pullicino D. 2005. Evaluating the efficiency of the composting process: a comparison of different parameters. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 09606, 2005 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-09606, European Geosciences Union. Publicado en internet, disponible en <http://www.cosis.net/abstracts/EGU05/09606/EGU05-J-09606-1.pdf>. Activo mayo de 2009.
- Grove T.S., O' Connell A.M., Mendham D., Barrow N. J. y Rance S. J. 2001. Sustaining the productivity of tree crops. A report for the RIRDC, Land and Water Australia. FWPRDC Joint Venture Agroforestry Program. Rural Industries Research and Development Corporation. RIRDC Publication N° 01/09, 68 pp.
- Guo L. B. y Gifford R. M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8(4):345-360.
- Henderson G. S. 1995. Soil organic matter: a link between forest management and productivity. En: *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Bigham J. M. y Bartels J. M. (eds.). Soils Science Society of America, Madison, WI, pp. 419-435.
- Howard P. A. J., Howard D. M. y Lowe L. E. 1998. Effects of tree species and soil physico- chemical conditions on the nature of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 30(3):285-297.
- IIE. 2002. Balance de la economía argentina en 2002. Un enfoque regional. Instituto de Investigaciones Económicas – Bolsa de Cereales de Córdoba. Córdoba.
- IPCC. 2005. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (NGGI). Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendía L., Miwa k., Ngara T.,

- Tanabe K. y Wagner F. (eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, 594 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>. Activo septiembre de 2009.
- Jandl R. 2005. Secuestro de carbono en bosques- El papel del suelo. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1):57-62.
- Jug A., Mackeshin F., Rehfuess K. E. y Hofmann-Schielle C. 1999. Short rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III: Soil ecological effects. *Forest Ecology and Management* 121(1):85-99.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304:1623-1625.
- Lal R. 2007. Carbon Management in Agricultural Soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(2):303-322.
- Landi M. y Galli I. 1984. Introducción al manejo del campo natural en la Provincia de Entre Ríos. *Boletín Técnico. Serie Producción Vegetal* N° 24. INTA EEA Concepción del Uruguay, 20 pp.
- Landi M. 2000. Pastizales naturales: inventario de recursos y sistemas de pastoreo. 4ª Jornada regional sobre manejo de pastizales naturales. San Cristóbal, Santa Fe. Publicado en internet, disponible en <http://www.produccion-animal.com.ar>. Activo mayo de 2009.
- Maestre F. T. y Cortina J. 2003. Small - scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology* 23:199-209.
- Muscolo A., Sidari M. y Mercurio R. 2007. Variations in soil chemical properties and microbial biomass in artificial gaps in silver fir stands. *European Journal of Forest Research* 126(1):59-65.
- Nelson D., Sommers L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods. Part 3*. Sparks D. L. y Bartels J. M. (eds.). SSSA Book Series number 5. Madison, Wisconsin, USA, pp. 961-1009.
- Nilsen P. y Strand L. T. 2008. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years. *Forest Ecology and Management* 256(3):201-208.
- Olsson M. y Boström B. 1999. Uncertainties in measurements of carbon stocks in forest soils- effects of silvicultural measures. Presentation at the UNFCCC Workshop on Land-Use, Land-Use Change and Forestry, Indianapolis, 26-28 April.
- Orlov D. 1995. Humic status of soils and general theory of humification. En: *Humic substances on soils and general theory of humification*. Orlov D. y Grishina D. (eds.). Balkema, Rotterdam, pp. 235-286.
- Paul E. y Clark F. 1996. Carbon Cycling and soil organic matter. En: *Soil Microbiology and Biochemistry*. 2nd edition. Academic Press, New York, 340 pp.
- Paul K. I., Polglase P. J., Nyakuengama J. G. y Khanna P. K. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168:241-257.

- Polglase P. J., Paul K. I., Khanna P. K., Nyakuengama J. G., O'Connell A. M., Grove T. S. y Battaglia M. 2000. Change in soil carbon following afforestation or reforestation: review of experimental evidence and development of a conceptual framework. National Carbon Accounting System. Technical Report N° 20. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, Commonwealth of Australia, 117 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>. Activo mayo de 2009.
- Pueyo J. M., Iacopini L., Fonseca J., Burns J., Bonini Y., Ludi R. y Grancelli R. 2005. Medición de la Producción Primaria del Pastizal Natural en el Centro Norte de la Provincia de Entre Ríos. Hoja informativa Electrónica N° 128. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/05/128.htm>. Activo julio de 2009.
- Rhades L. 2003. Manejo del pastizal natural. Hoja Informativa Electrónica N° 81. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/03/81.htm>. Activo febrero de 2007.
- Robertson G. P. y Paul E. A. 2000. Decomposition and soil organic matter dynamics. En: *Methods in Ecosystem Science*. Sala O. E., Jackson R. B., Mooney H. A. y Howarth R. W. (eds.). Springer - Verlag, New York, pp. 105-115.
- Roig A., Lax A., Cegarra J., Costa F. y Hernández M. 1988. Cation-exchange capacity as a parameter for measuring the humification degree of manures. *Soil Sci.* 146:311-316.
- Ruíz M., Elizalde G. y Paolini J. 1997. Caracterización de las sustancias húmicas presentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias. *Agronomía Tropical* 47(4):381-395.
- Schedlbauer J. L. y Kavanagh K. L. 2008. Soil carbon dynamics in a chronosequence of secondary forests in northeastern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 255(3-49):1326-1335.
- Schnitzer M. 1982. Organic matter characterization. En: *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbial properties*. Page A. L., Miller R. H. y Keeney D. R. (eds.). ASA N° 9 (Part 2) in the Agronomy Series. ASA-SSSA, Madison, WI, USA, pp. 581-594.
- Swift R. S. 1991. Effects of humic substances and polysaccharides on soil aggregation. En: *Advances in Soil organic matter research: the impact on agriculture and the environment*. Wilson W. S. (ed.). The Royal Society of Chemistry. Thomas Graham House, Cambridge, pp. 153-162.
- Trouve C., Mariotti A., Schwartz D. y Guillet B. 1994. Soil organic carbon dynamics under Eucalyptus and Pinus planted on savannas in the Congo. *Soil Biology and Biochemistry* 26(2):287-295.
- Vesterdal L., Ritter E. y Gundersen P. 2002. Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169:137-147.
- Yanai R. D., Currie W. S. y Goodale C. L. 2003. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems* 6:197-212.

Zerva A. 2004. Effects of afforestation and forest management on soil carbon dynamics and trace gas emissions in a sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong) Carr.) forest. Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, April 2004, The University of Edinburgh, Scotland, 271 pp. Collections: Atmospheric and Environmental Science PhD thesis collection. Publicado en internet, disponible en <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/574>. Activo noviembre de 2007.

ECUACIONES DE BIOMASA DE *Eucalyptus grandis* EN VERTISOLES DEL NORTE DE ENTRE RÍOS

INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia de monitorear los stocks de carbono terrestre, para la estimación del carbono secuestrado por ecosistemas forestales es necesario contar con métodos de estimación rápidos y sencillos (Zianis y Mencuccini, 2004). Si bien el muestreo de árboles completos para determinar el carbono almacenado en la biomasa proporciona la información más precisa, comparada con las estimaciones por métodos indirectos, no puede llevarse a cabo en todas las situaciones (Murali *et al.*, 2005), ya que es un procedimiento muy costoso, especialmente en árboles (Gaillard *et al.*, 2002). Así mismo, la biomasa de raíces de especies forestales ha sido poco estudiada por la dificultad de la extracción de los sistemas radicales completos (Guerra *et al.*, 2005). En cambio, los métodos indirectos de estimación de la biomasa de un rodal se basan en relaciones entre dimensiones medibles y la biomasa arbórea, conocidas como relaciones alométricas (Snowdon *et al.*, 2002). Los parámetros mensurables pueden ser el diámetro a la altura del pecho (DAP), el área basal, la altura, la densidad del fuste (Brown *et al.*, 1991, Palm *et al.*, 1986 y Whitmore, 1984, citados de Murali *et al.*, 2005), entre otros. Las ecuaciones se ajustan con árboles representativos de las poblaciones para las que se aplicarán las ecuaciones de predicción (Snowdon *et al.*, 2002). Por lo tanto, las estimaciones aplicando ecuaciones alométricas pueden ser pobres cuando se utilizan en rodales de características diferentes a las de los rodales de donde provienen los datos con los que se ajustaron las mismas (Ares y Fownes, 2000). Zianis *et al.* (2005) explican que se puede mejorar la confiabilidad de esas estimaciones si se aplican ecuaciones de

biomasa que permitan estimar la biomasa total y la de sus componentes utilizando variables independientes de fácil medición (Gaillard *et al.*, 2002).

Las ecuaciones de biomasa arbórea son ampliamente usadas en estudios forestales y ecológicos, entre los que se incluyen las estimaciones de carbono. Las ecuaciones que incluyen el DAP y la altura han sido a veces consideradas más aplicables a mayor variedad de escenarios en cuanto al sitio y manejo. Incluso diversos estudios proponen el amplio uso de ecuaciones basadas solamente en el DAP (Ares y Fownes, 2000). Las ecuaciones de biomasa pueden ser aplicadas directamente a nivel de datos de inventario, y como la estimación de la biomasa depende de datos reales, con dimensiones medidas de los árboles, son necesarias ecuaciones empíricas para predecir la biomasa como una función de variables registradas. La investigación empírica de las últimas décadas ha generado una amplia variedad de funciones de biomasa para las especies arbóreas más importantes. No obstante, los modelos matemáticos son diversos, los conjuntos de datos a menudo muy pequeños y, por lo tanto, la validez de esos modelos se restringe, en la mayoría de los casos, a determinadas condiciones (Fehrmann y Kleinn, 2006). De acuerdo con una revisión realizada por Zianis *et al.* (2005), la mayoría de las ecuaciones de biomasa publicadas para Europa incluyen las variables explicativas diámetro a la altura del pecho, altura del árbol o una combinación de ambas. Según Peichl y Arain (2007), una ecuación alométrica simple puede predecir la biomasa total a partir del diámetro, en una secuencia de edades.

Con respecto a la biomasa radical, la producción de raíces contribuye en aproximadamente la mitad del ciclado de carbono anual en muchos bosques (Vogt *et al.*, 1998). Si bien en la literatura hay valores para un amplio rango de especies, la variabilidad estadística, producida por las diferentes metodologías empleadas, los distintos estados de desarrollo de los bosques evaluados, y la escasa información acerca de los tipos de vegetación de acuerdo a los sitios (MacDicken, 1997), no permiten distinguir las posibles diferencias para cada especie, pudiendo provocar una confusión o un mal uso de los indicadores de biomasa subterránea (Guerra *et al.*, 2005). Al respecto, Vogt *et al.* (1998) señalan que la biomasa radical no debería

estimarse usando relaciones desarrolladas en otros ecosistemas. Por ello, para una estimación más confiable de la biomasa subterránea es necesario contar con ecuaciones locales, desarrolladas para cada especie en particular.

Aún cuando se dispone de ecuaciones de biomasa aérea de eucalipto para la zona de estudio, las mismas no están validadas y se desarrollaron con individuos cultivados en distintos suelos. Finalmente, no se cuenta con ecuaciones de biomasa total ni de biomasa aérea individual de *Eucalyptus grandis* validadas y aplicables a plantaciones en suelos vertisoles con distintos manejos.

En este capítulo se presentan el ajuste y validación de ecuaciones de biomasa total y aérea, para *Eucalyptus grandis* con distintos manejos en suelos Vertisoles de Entre Ríos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y procesamiento de las muestras

Para el ajuste de ecuaciones de biomasa total se seleccionaron y aparearon 54 árboles de 6 a 10 años de dos de los sitios sin raleo evaluados en este estudio, representativos de las clases diamétricas presentes. Su parte aérea se cortó y pesó completamente para determinación de biomasa; para extraer las raíces gruesas de esos mismos árboles (hasta 0,5 cm de diámetro), se excavó hasta 1 metro de profundidad (Figura 3.1), mientras que el volumen de exploración se definió de acuerdo con el distanciamiento de las plantaciones.

Para el ajuste de las ecuaciones de biomasa aérea se seleccionaron y aparearon 45 árboles más, en un sitio de 6 años, con raleo temprano. Estos datos se sumaron a los de biomasa aérea de los 54 árboles ya muestreados de los sitios sin raleo, obteniendo una muestra de 99 árboles en conjunto, resultando cinco clases diamétricas nuevas. Clark (1979), citado de Snowdon *et al.*, (2002) menciona que se

recomienda muestrear entre 20 y 40 árboles, estratificados de acuerdo al diámetro, para el desarrollo de ecuaciones de biomasa generalizadas, para cada especie en particular. Esta recomendación asegura un número grande de árboles en la muestra y que se abarque todo el rango diamétrico.



Figura 3. 1 Trabajo a campo para extracción de árbol completo. De izquierda a derecha: extracción de raíces; ramas y frutos, y hojas para determinación de peso fresco total.

La determinación del peso seco se hizo de acuerdo al método propuesto por Snowdon *et al.* (2002), con modificaciones. Luego del apeo se pesó la biomasa aérea completa y las raíces extraídas en el campo, empleando una balanza electrónica de 300 kg de capacidad. Posteriormente, se separaron alícuotas de la parte aérea y de las raíces, las cuales se pesaron en fresco en el laboratorio (Figura 3.2), con balanza digital. Luego esas muestras se secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante. A partir de los valores de pesos fresco y seco de las alícuotas se calculó el contenido de humedad de cada componente y se determinaron los pesos secos totales por componente.



Figura 3. 2 Alícuotas de ramas y frutos, hojas, raíces gruesas y fuste para determinación de contenido de humedad.

Ajuste de ecuaciones

Para el ajuste de ecuaciones de biomasa total se trabajó con los valores de biomasa total de los 54 árboles de los rodales no raleados y para ajustar las ecuaciones de biomasa aérea se emplearon los datos de biomasa aérea de los 99 árboles (de rodales sin raleo y del rodal raleado).

Para ajustar las ecuaciones se analizaron las relaciones entre la biomasa total y la biomasa aérea (variables dependientes) con las variables dasométricas medidas (variables independientes): diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total; se incluyó en el análisis el sitio como factor de variación. A su vez, se estudió la relación entre las variables independientes para detectar multi-colinealidad antes de seleccionarlas para los modelos de regresión.

Una vez analizadas gráficamente las relaciones entre la biomasa aérea, biomasa total y las variables independientes medidas, se elaboraron modelos de estimación de las variables dependientes para árboles individuales de *E. grandis* aplicando análisis de regresión lineal. Esta técnica estadística se aplica para investigar y modelar la relación entre variables (Montgomery *et al.*, 2007). En este trabajo se evaluaron las variables que se relacionan linealmente con la biomasa, transformándolas para simplificar las relaciones entre variables cuando éstas no fueran lineales. El objetivo fue encontrar ecuaciones de estimación de la biomasa aérea y total de árboles individuales de plantaciones de la misma especie y de características similares, seleccionar las que fueran más simples, con buen ajuste, coeficientes estables y alto valor predictivo.

Luego de analizar mediante regresión lineal posibles modelos incluyendo las variables altura y DAP en distintas combinaciones, se seleccionaron dos modelos sencillos para estimar la biomasa total (BT) en kilogramos: un modelo parabólico incompleto, donde d es el DAP medido en centímetros, y un modelo de variables combinadas, donde d es el DAP medido en centímetros y H la altura total del árbol,

en metros. En ambos modelos se comprobó el cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de varianzas y de distribución normal de los residuos.

Para la biomasa aérea se ajustó un modelo en el cual la raíz cuadrada de la biomasa aérea ($BA^{1/2}$) (variable dependiente) es función del DAP. Cuando se ha transformado la variable dependiente, como en este caso, la re-transformación de la misma a sus valores originales mediante la aplicación de la inversa de esa función en forma directa produce un sesgo: se obtiene un estimado de la mediana de la distribución y no de la media (Miller, 1984; Snowdon *et al.*, 2002; Montgomery *et al.*, 2007). Una forma de conseguir estimaciones insesgadas es aplicar un término de corrección. En este caso, para cada valor del DAP se estima la biomasa aérea (BA) re-transformando la variable dependiente con la función inversa (3.1), y sumándole un término de corrección. Según Miller (1984), para la transformación raíz cuadrada se calcula un término de corrección en función del tamaño de la muestra, del CME y de los desvíos del DAP (3.2)

$$BA_{rt}(Kg) = (BA^{1/2})^2 + \hat{\sigma}^2 + \mathcal{E} \quad (3.1)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \sigma^2 \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

donde σ^2 =CME (error cuadrático medio) del análisis de la varianza

n= tamaño de la muestra

x= DAP (cm)

$BA_{rt}(Kg)$ = biomasa aérea re-transformada y corregida, expresada en kilogramos.

$(BA^{1/2})^2$ = re-transformación a la variable original aplicando la inversa de la función raíz cuadrada.

ε =error de estimación

Comprobación de adecuación de los modelos

Se evaluó el cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de varianzas y de distribución normal de los residuos, realizando el análisis de los residuales de los modelos para detectar valores atípicos. Aunque generalmente los valores atípicos tienen mucha influencia sobre la variabilidad de los datos, en este trabajo no se eliminaron pues corresponden a observaciones reales, no a errores de medición; se trata de valores respuesta “extraordinarios” respecto del conjunto de datos (Montgomery *et al.*, 2007), pero perfectamente posibles. Además se compararon los estadísticos de bondad de ajuste, coeficiente de determinación ajustado (R^2_{ajustado}) y error cuadrático medio (CME).

Validación de los modelos

Para seleccionar el mejor modelo es necesario evaluar también su valor predictivo mediante la validación. Para ello se aplicaron técnicas estadísticas de validación, que permiten contar con una medida de protección, tanto al desarrollador del modelo como al usuario; no es suficiente que el modelo tenga un buen ajuste para garantizar que sea un buen predictor (Motgomery *et al.*, 2007).

Con el objeto de validar los modelos de biomasa total se aplicó un procedimiento de validación llamado *Doble Validación Cruzada*, según el cual para validar un modelo desarrollado con todos los datos se construyen otros dos modelos, ajustados con la división de los datos. Según este procedimiento se dividen los datos en conjuntos de estimación y de predicción, se desarrollan los modelos con los datos originales de estimación y se investiga su eficiencia con los datos de predicción; a continuación se invierten los papeles de los dos conjuntos de datos, se desarrollan modelos con los datos originales de predicción y se prueba su eficiencia con los

datos de estimación. Por otra parte se ajustan modelos con la totalidad de los datos disponibles.

El criterio para seleccionar los datos para la estimación del modelo es que haya árboles de todas las clases de DAP y de los 2 sitios. La selección se hizo de manera que los dos conjuntos de datos no tengan puntos cercanos ni réplicas, para que permitan probar el modelo. Una desventaja de ese método de división de datos es que es algo arbitrario, y no es seguro que el conjunto de datos de predicción, con los puntos restantes, pruebe suficientemente la severidad del modelo. Una división aleatoria tampoco asegura que algunos puntos de los datos de predicción sean de extrapolaciones. Sin embargo, la doble validación proporciona una doble evaluación de la eficiencia del modelo (Montgomery *et al.*, 2007). Por otro lado, típicamente el conjunto de datos de estimación puede ser mayor que el conjunto de datos de predicción, teniendo en cuenta que el conjunto de datos de predicción debe tener como mínimo 15 puntos para una evaluación razonable del modelo. Si los modelos son buenos predictores, será poca la diferencia al usar cualquiera de ellos, y se podrán preferir los modelos con la totalidad de los datos, en los cuales los errores estándar de los coeficientes serán menores (Montgomery *et al.*, 2007).

Para aplicar la doble validación cruzada a los modelos de biomasa total se ordenó la muestra total en función del DAP, dividiéndola en dos partes: una con 34 árboles para construcción de los modelos y otra con 20 para validación. Luego de validar los modelos de biomasa total ajustados, se invirtieron los grupos y se realizaron nuevamente las comprobaciones de bondad de ajuste y de valor predictivo de los modelos.

En cuanto a la biomasa aérea, se destinaron 70 individuos para la estimación del modelo y 29 individuos para la validación, aplicando el procedimiento de validación cruzada. A diferencia del anterior, este método consiste en ajustar una ecuación y luego aplicarla a nuevos datos, sin que estos sean parte del conjunto de estimación. Se requieren muestras más grandes y al menos 15 a 20 nuevas muestras o

“corridas de confirmación”, para tener una evaluación fiable de la eficiencia de predicción del modelo (Montgomery *et al.*, 2007).

El valor predictivo de los modelos de biomasa total y aérea ajustados se evaluó con el estadístico coeficiente de determinación de predicción (3.3), que indica el porcentaje de variabilidad que explica el modelo con nuevos datos, y los estadísticos PRESS (suma de cuadrados de error de predicción) (3.4) y SST (suma total de cuadrados) (3.5) (Montgomery *et al.*, 2007).

$$R^2_{predicción} = 1 - \frac{PRESS}{SST} \quad (3.3)$$

$$PRESS = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.4)$$

$$SST = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (3.5)$$

Otro estadístico calculado para evaluar el poder predictivo de los modelos es el índice de reducción (*IR*) (3.6). Valores menores a 0,1 de este índice indican un modelo muy fiable (Molinero, 2002).

$$IR = R^2_{ajustado} - R^2_{predicción} \quad (3.6)$$

Se calculó asimismo la desviación global (*DG*), mediante la cual se puede conocer también la capacidad predictiva de un modelo (Vidal *et al.*, 2004) (3.7)

$$DG(\%) = \frac{(\sum B_{medida} - \sum B_{estimada})}{\sum B_{estimada}} \times 100 \quad (3.7)$$

donde $\sum B_{medida}$ es la suma de los valores reales de biomasa (total o aérea) del conjunto de datos de ajuste del modelo, expresados en kilogramos, y $\sum B_{estimada}$ es la suma de los valores de biomasa (total o aérea) estimados con el modelo, expresados en kilogramos.

Para evaluar el valor predictivo de los modelos de biomasa total y biomasa aérea para estimar biomasa de plantaciones de 1 a 5 años, se procesaron 15 árboles completos. Esa muestra de validación se tomó de un lote de *E. grandis* de 3 años de edad, en un suelo Vertisol, en Colonia La Paz (Dpto. Federación).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ecuaciones de biomasa total para plantaciones sin raleos

Del análisis de correlación se observó que los valores de biomasa total no se correlacionan significativamente con el sitio, y que tienen una alta correlación con el diámetro, la altura y la combinación de esas variables (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Coeficientes de correlación de Pearson, entre la biomasa total (BT) en Kg y las variables independientes DAP (d) en cm, altura total en metros (H), y los sitios de donde provienen los árboles (sit).

	BT	sit	d	H	d ² H	d ²
BT	1,000	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000
sit	0,300	1,000	0,052	0,099	0,035	0,039
d	0,977	0,266	1,000	0,000	0,000	0,000
H	0,829	0,227	0,881	1,000	0,000	0,000
d ² H	0,989	0,288	0,983	0,866	1,000	0,000
d ²	0,992	0,282	0,991	0,842	0,994	1,000

Los diagramas de dispersión analizados para determinar el tipo de curva que representa mejor esas relaciones (Figura 3.3), demostraron que la biomasa total en función del diámetro ajusta a una curva de forma potencial, mientras que con esa variable elevada al cuadrado, sola o combinada con la altura, la biomasa total se relaciona linealmente.

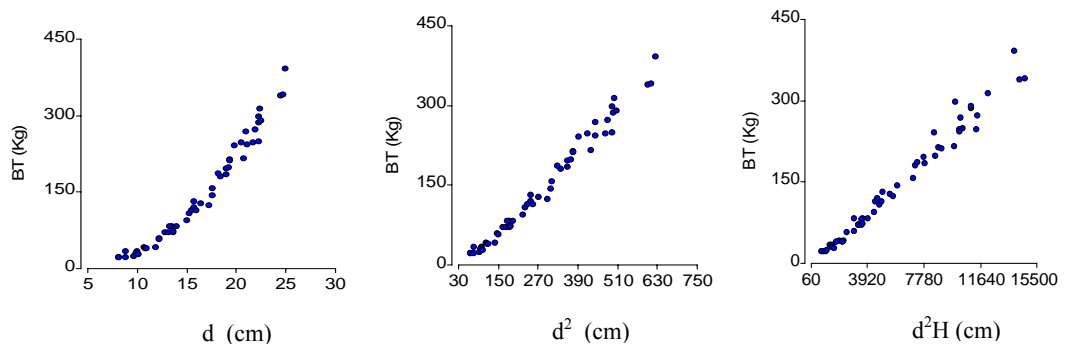


Figura 3. 3 Alícuotas de ramas y frutos, hojas, raíces gruesas y fuste para determinación de contenido de humedad.

Asimismo, se observa la misma tendencia en los dos sitios (Figura 3.4), por lo cual se ajustaron ecuaciones de biomasa total con los datos de los árboles provenientes de ambos sitios. Las variables DAP y altura no presentaron entre sí relación lineal sino logarítmica, por lo cual no se presentó el problema de multicolinealidad. Ambas variables independientes se incluyeron en los modelos evaluados.

Los modelos obtenidos con los 54 datos, los modelos ajustados mediante la doble validación cruzada, y sus estadísticos de bondad de ajuste y de poder predictivo se presentan en la Tabla 3.2. Se observa que, de los modelos ajustados con todos los datos, el de la parábola incompleta presenta mejor ajuste, con mayor coeficiente de determinación y menor error cuadrático medio.

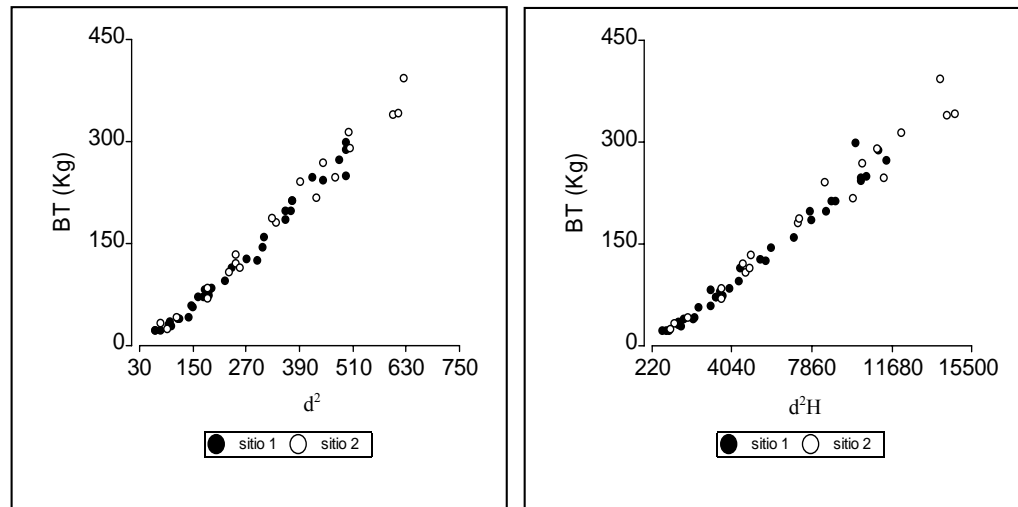


Figura 3. 4 Diagramas de dispersión de la biomasa total en función de las variables independientes DAP al cuadrado (d^2) y d^2H , identificados según el sitio de donde provienen las muestras.

Al aplicar la doble validación, el modelo con DAP^2 ajustado con el conjunto de datos de estimación ($n=34$) explica el 98% de la variabilidad, mientras que cabe esperar que este modelo explique un 97,9% de la variabilidad cuando se predigan nuevas observaciones: la pérdida de variabilidad explicada es mínima. Por consiguiente, la capacidad predictiva del modelo es satisfactoria, mientras que el índice de reducción (IR) y la desviación global (DG), por otra parte, indican que el modelo tiene alto valor de predicción. Luego de la inversión de los grupos, el IR y la DG indican que el modelo sigue siendo fiable.

De la comparación de los modelos de la doble validación cruzada con el modelo ajustado a partir de todos los datos se determinó que la aplicación de cualquiera de estos modelos para predicción de valores de biomasa total individual de *Eucalyptus grandis* en función del DAP^2 permite obtener estimaciones confiables. Si bien entre los tres modelos no existen diferencias sustanciales, el modelo en función del DAP^2 elaborado con todos los datos presenta un excelente ajuste, sus coeficientes son estables y sus errores estándar son menores que los de los otros dos modelos ajustados.

Tabla 3.2 Modelos de biomasa total ajustados con todos los datos y con los grupos de validación, estadísticos de bondad de ajuste y de valor predictivo de los mismos.

	Parábola incompleta		Variables combinadas
	Modelo	$BT(Kg) = -36,4271 + 0,6384 * d^2 + \epsilon$	$BT(Kg) = -8,7464 + 0,0255 * d^2 H + \epsilon$
Estadísticos de los modelos ajustados con todos los datos	N	54	54
	R^2_{ajust}	0,983	0,978
	CME	177,7	233,6
	EE_{const}	3,8	3,9
	$EE_{pendiente}$	0,012	0,001
Estadísticos de la primera validación: modelo ajustado con conjunto de datos de estimación; validada con conjunto de datos de predicción	Modelo	$BT(Kg) = -34,8399 + 0,6340 * d^2 + \epsilon$	$BT(Kg) = -10,1973 + 0,0260 * d^2 H + \epsilon$
	N	34	34
	R^2_{ajust}	0,980	0,972
	CME	185,7	265,3
	EE_{const}	4,8	5,2
	$EE_{pendiente}$	0,016	8,00E-04
	$R^2_{predicción}$	0,979	0,989
	IR	0,001	-0,02
DG	1,9%	3%	
Estadísticos de la segunda validación: inversión de los dos conjuntos de datos	Modelo	$BT(Kg) = -39,8722 + 0,6448 * d^2 + \epsilon$	$BT(Kg) = -8,9978 + 0,0250 * d^2 H + \epsilon$
	N	20	20
	R^2_{ajust}	0,985	0,987
	CME	186,1	164,0
	EE_{const}	6,6	5,5
	$EE_{pendiente}$	0,02	1,00E-03
	$R^2_{predicción}$	0,970	0,957
	IR	0,015	0,03
DG	1%	4%	

Con respecto al modelo ajustado con la variable combinada d^2H , los resultados de la doble validación cruzada indicaron también que los modelos ajustados con todos los datos y con los conjuntos de estimación y de predicción tuvieron similar desempeño; los tres modelos presentaron buen ajuste, alto valor predictivo y coeficientes estables.

De la comparación de los estadísticos de bondad de ajuste y de valor predictivo de los modelos de la parábola incompleta (DAP^2) y de la variable combinada (d^2H), construidos con la totalidad de los datos (Tabla 3.2), se observa que la ecuación con el diámetro al cuadrado presenta mejor ajuste y mayor valor predictivo que el modelo con las variables combinadas, además de ser más simple y fácil de aplicar, ya que implica solamente la medición del DAP.

Es importante remarcar que la aplicabilidad de estas ecuaciones está probada para individuos pertenecientes a plantaciones similares a las de los datos que originaron los modelos, es decir, árboles de 8 a 25 cm de DAP, de entre 6 y 10 años de edad, sin raleos, sobre suelos Vertisoles en la Provincia de Entre Ríos. Para árboles de entre 8 y 11,4 cm de DAP (clase diamétrica 1), de plantaciones de entre 1 y 5 años, la muestra de validación indicó que la ecuación de biomasa total obtenida no permite hacer predicciones confiables, subestimando los valores individuales de biomasa total.

Ecuaciones de biomasa aérea para plantaciones sin raleos y raleadas

Del análisis de correlación (Tabla 3.3) se observó que tanto el diámetro como su potencia presentan una muy alta correlación con la biomasa aérea. Por otro lado, la altura asociada al cuadrado del diámetro aumenta el coeficiente de correlación con la biomasa aérea.

Con respecto a la influencia del sitio, en todos los diagramas de dispersión entre las variables independientes y la biomasa aérea se pudo comprobar que los sitios, a pesar de presentar distintas características, no explicaban la variabilidad de la biomasa aérea. Coincidentemente, Baskerville (1965), citado de Zianis y Mencuccini (2004), estudió ecuaciones alométricas para abeto (*Abies balsamea* M.) basadas en árboles seleccionados de parcelas de diferentes densidades, llegando a la conclusión de que la densidad del rodal no tenía efecto significativo sobre las relaciones alométricas. Por su parte, las relaciones entre la biomasa aérea con el

diámetro al cuadrado y con el diámetro al cuadrado por la altura total presentan tendencia lineal (Figura 3.5).

Tabla 3.3 Coeficientes de correlación de Pearson, entre la biomasa aérea (BA) en Kg, y las variables independientes DAP (d) en cm; altura total (H), en m; DAP por altura total (dH); DAP al cuadrado (d²); DAP al cuadrado por altura total (d²H); sitios (sit).

	BA	d	H	dH	d ²	d ² H	sit
BA	1,00						
d	0,97	1,00					
H	0,84	0,90	1,00				
dH	0,96	0,99	0,94	1,00			
d ²	0,98	0,99	0,86	0,98	1,00		
d ² H	0,99	0,98	0,87	0,99	1,00	1,00	
sit	-0,22	-0,22	-0,20	-0,22	-0,22	-0,22	1,00

De las pruebas de supuestos de los modelos ajustados se puso en evidencia que si bien los residuos se distribuyen normalmente, las varianzas en los distintos valores que asumen las variables independientes no son homogéneas. Teniendo en cuenta la necesidad de contar con un conjunto de datos de varianzas homogéneas para ajustar una ecuación de regresión lineal, se decidió transformar la variable respuesta con la función raíz cuadrada.

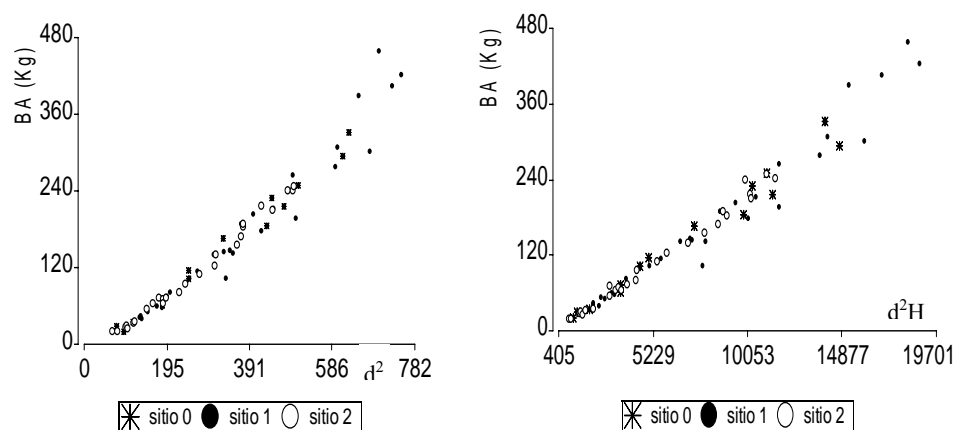


Figura 3. 5 Diagramas de dispersión de la biomasa aérea en función del diámetro al cuadrado (d²) y de la variable combinada (d²H), identificados según el sitio de donde provienen las muestras.

Del análisis de correlaciones entre la variable transformada y las variables independientes y de los diagramas de dispersión para estudiar el tipo de relación entre las variables, se observa que el diámetro y la variable combinada diámetro por altura (dH) tienen una alta correlación con la biomasa aérea y esa relación es de tendencia lineal. Las relaciones entre la variable transformada y las variables independientes cambiaron (Figura 3.6), por lo que los ajustes se hicieron con el DAP y dH.

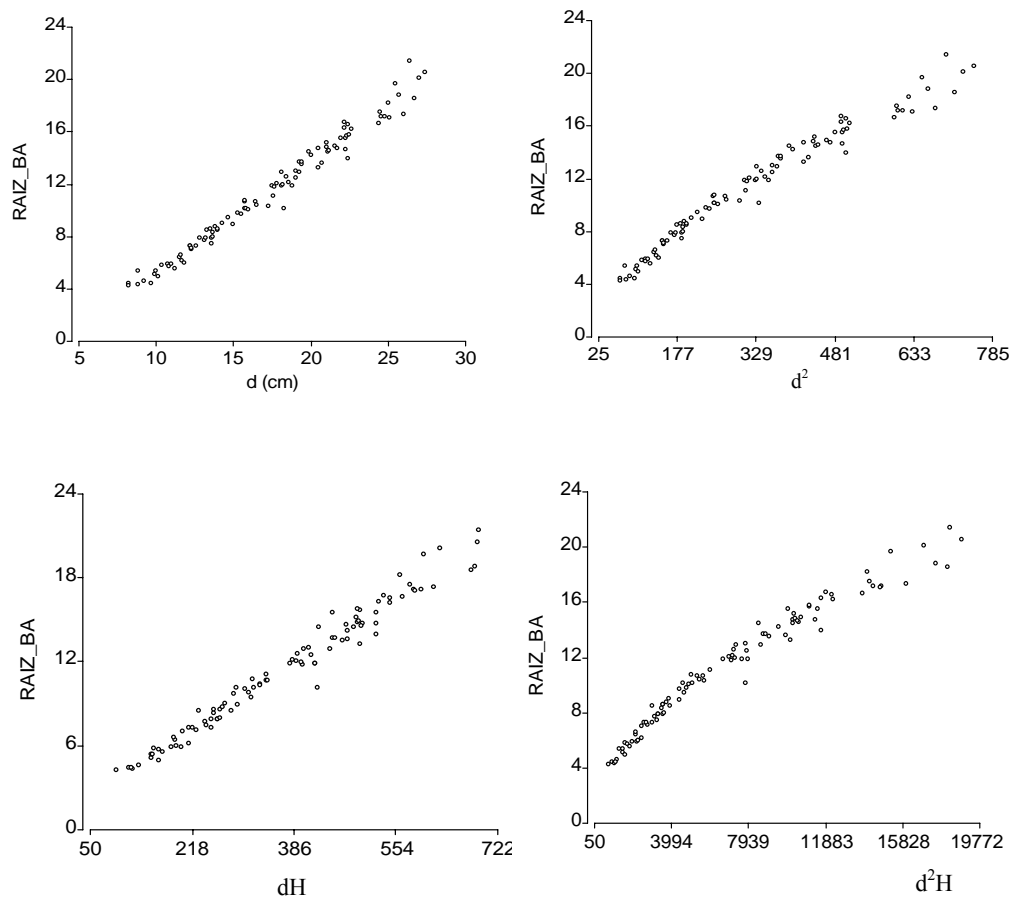


Figura 3. 6 Diagramas de dispersión de la variable dependiente transformada: raíz cuadrada de la biomasa aérea en función del DAP (d), DAP² (d²), DAP por altura total (dH) y DAP² por altura total (d²H).

Con el diagrama de dispersión de los residuos en función de los predichos se detectaron dos valores atípicos. Aunque el valor de los residuos estudentizados de estos dos puntos es mayor a tres no se los eliminó del modelo, ya que se trata de valores medidos, no son puntos influyentes, siguen la tendencia de los demás valores

y su eliminación no produce cambios sustanciales en la estimación de los coeficientes del modelo ni de los estadísticos.

Los modelos ajustados cumplen los supuestos del análisis: los residuos presentan varianzas homogéneas (comprobación gráfica) y distribución normal (Test de Shapiro-Wilks modificado, $p=0,181$).

De la comparación de los estadísticos de bondad de ajuste de las ecuaciones de raíz de la biomasa aérea ajustadas con las variables independientes DAP (d) y DAP por altura total (dH) se puede resaltar que la inclusión de la altura en el análisis de regresión no mejoró el ajuste de la ecuación (Tabla 3.4). Este resultado coincide con diversos estudios, que proponen el amplio uso de ecuaciones de biomasa basadas solamente en el DAP (Ares y Fownes, 2000).

Tabla 3.4 Modelos de estimación de la variable dependiente transformada y estadísticos de bondad de ajuste de los modelos.

MODELO	$BA^{1/2} = -3,3438 + 0,8514 * d + \epsilon$	$BA^{1/2} = 0,8625 + 0,0285 * dH + \epsilon$
$R^2_{ajustado}$	0,978	0,970
<i>CME</i>	0,423	0,591

Para la re-transformación a la variable respuesta original, biomasa aérea, el término de corrección del sesgo para cada valor del DAP (variable independiente) se calcula según la ecuación 3.8.

$$\hat{\sigma}^2 = 0,423 * (0,0143 + \frac{(DAP - 17,2)}{1828}) \quad (3.8)$$

Además, los estadísticos $DG=0,1\%$, $R^2_{predicción} = 0,976$ e $IR=0,002$ calculados con los datos de validación indican que el modelo ajustado con el diámetro a la altura del pecho (DAP) es muy fiable para la estimación de la biomasa

aérea individual de árboles de *E. grandis* con DAP de 8 a 28 cm, de plantaciones con o sin raleo, de 6 a 10 años de edad, en suelos vertisoles en el área de estudio de este trabajo.

Para árboles de entre 8 y 11,4 cm de DAP (clase diamétrica 1), de plantaciones de entre 1 y 5 años, la muestra de validación indicó que la ecuación de biomasa aérea no permite hacer predicciones confiables, subestimando los valores de biomasa aérea individuales.

CONCLUSIONES

➤ Las ecuaciones ajustadas en base al diámetro a la altura del pecho permiten obtener estimadores insesgados y confiables de la biomasa aérea y total de individuos de *Eucalyptus grandis* con DAP de 8 a 28 cm.

➤ La aplicabilidad de las ecuaciones de biomasa total y aérea obtenidas se restringe a plantaciones de la misma especie, de 6 a 10 años, cultivados en suelos arcillosos de Entre Ríos.

➤ Las ecuaciones de biomasa total y aérea desarrolladas subestiman los valores de biomasa de individuos de *Eucalyptus grandis* de menos de 6 años de edad.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Ares A. y Fownes J. H. 2000. Comparisons between generalized and specific tree biomass functions as applied to tropical ash (*Fraxinus uhdei*). *New Forests* 20:277-286.
- Baskerville G.L. 1965. Estimation of dry weight of tree components and total standing crop in conifer stands. *Ecology* 46:867-869.
- Brown S., Gillespie A. J. R. y Lugo A. E. 1991. Biomass of tropical forests of South and Southeast Asia. *Can. J. For. Res.* 21:111-117.

- Clark A. 1979. Suggested procedures for measuring tree biomass and reporting tree prediction equations. En: Forest Resource Inventories. Frayer W. E. (ed.). Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A, pp. 615-628.
- Fehrmann L. y Kleinn C. 2006. General considerations on the use of allometric models for single tree biomass estimation. Paper at the 8th FIA Symposium. Monterey, California. 16-19.Oct. 2006.
- Gaillard C., Pece M., Juárez M., Maldonado A., Acosta V. H. y Gómez A. T. 2002. Biomasa aérea de ejemplares de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) en dos localidades del Parque Chaqueño Seco. Quebracho 9:115-127. Publicado en internet, disponible en <http://fcf.unse.edu.ar/pdf/Quebracho/q9-11.pdf>. Activo mayo de 2009.
- Guerra J., Gayoso J., Schlatter J., Nespolo R. 2005. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. Bosque 26(1):5-21.
- MacDicken K. G. 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. Forest Carbon Monitoring Program 87 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.winrock.org/ecosystems/files/carbon.pdf>. Activo febrero de 2007.
- Miller D. M. 1984. Reducing transformation bias in curve fitting. The American Statistician 38:124-126.
- Molinero L. M. 2002. Construcción de modelos de regresión multivariantes. Asoc. de la Soc. Española de Hipertensión. Liga española para la lucha contra la hipertensión arterial. Publicado en internet, disponible en <http://www.seh-llella.org/pdf/regresion1.pdf>. Activo mayo de 2009.
- Montgomery D. C., Peck E. A. y Vining G. G. 2007. Introducción al análisis de regresión lineal. 3^o edición, 4^o reimpresión. Grupo Editorial Patria. México.
- Murali K. S., Bhat D. M. y Ravindranath N. H. 2005. Biomass estimation equations for tropical deciduous and evergreen forests. Int. J. Agricultural Resources, Governance and Ecology 4(1):81-92.
- Palm C. A., Houghton R. A., Melillo J. M. y Skole D. L. 1986. Atmospheric carbon dioxide from deforestation in southeastern Asia. Biotropica 18(3):177-188.
- Peichl M. y Arain M. A. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. Forest Ecology and Management 253(1-3):68-80.
- Snowdon P., Raison J., Keith H., Ritson P., Grierson P., Adams M., Montagu K., Bi H., Burrows W., y Eamus D. 2002. Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. Technical report N° 31. National Carbon Accounting System. Australian Greenhouse Office. Commonwealth of Australia, 76 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>. Activo mayo de 2009.
- Vidal A., Benítez J. Y., Carlos R. y Gra H. 2004. Estimación de la biomasa de copa para árboles de *Pinus caribaea var. caribaea* en la F. E. I. La Palma de la Provincia de Pinar del Río, Cuba. Quebracho 11:60-66.

- Vogt K. A., Vogt D. J. y Bloomfield J. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200:71-89.
- Whitmore T.C.1984. *Tropical rainforests of the Far East*. Oxford University Press, London, pp.112-113.
- Zianis D. y Mencuccini M. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187:311-332.
- Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R. y Mencuccini M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica. Monographs* 4, 63 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.metla.fi/silvafennica/full/smf/smf004.pdf>. Activo mayo de 2009.

CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA Y NECROMASA DE PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis* Y PASTIZALES CON USO GANADERO

INTRODUCCIÓN

El carbono almacenado en los ecosistemas se divide usualmente en cuatro componentes: el carbono en la biomasa aérea viva, en los detritos leñosos y el mantillo, en los sistemas radicales y en el suelo (Snowdon *et al.*, 2002). En los ecosistemas forestales, el mayor potencial de almacenamiento de carbono se encuentra a menudo entre los componentes de la biomasa aérea (tallo, ramas y follaje) (Peichl y Arain, 2006), mientras que la biomasa de raíces constituye también un importante reservorio (MacDicken, 1997). Aproximadamente el 50% de la biomasa está constituida por carbono (Vidal *et al.*, 2004). Es decir que el carbono fijado en la biomasa puede estimarse como la mitad de la biomasa determinada.

Así mismo, una gran cantidad del total de carbono de los sistemas forestales se acumula en el mantillo (Paul *et al.*, 2004). Las metodologías indicadas en la Guía de buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y forestación elaborada por el IPCC (2005) incluyen entre los depósitos terrestres de carbono al mantillo y la madera muerta. El mantillo se compone de hojas, raíces y material leñoso fino, acumulados sobre la superficie del suelo (Yanai *et al.*, 2003). La madera muerta comprende toda la biomasa boscosa no viva no contenida en el mantillo, ya sea en pie, superficial o en el suelo, la madera muerta que se encuentra en la superficie, raíces muertas y tocones de 10 cm de diámetro o más. Tanto el mantillo como los detritos leñosos han recibido poca atención en los estudios y análisis de suelos en sistemas agrícolas, aunque en sistemas forestales estos componentes son significativos (MacKenzie *et al.*, 2000). El material fino puede presentar distintas

tasas de descomposición, que influyen sobre el carbono almacenado en el mantillo y en el suelo de las plantaciones forestales. El material leñoso grueso, en cambio, se descompone lentamente; el carbono almacenado en la madera o en material leñoso es, en el largo plazo, mayor que las pérdidas de carbono por descomposición de la hojarasca, o de residuos provenientes de raleos o del aprovechamiento (Paul *et al.*, 2004). Según resultados de Noretto *et al.* (2006), en rodales forestados la contribución de vegetación herbácea y pastos es despreciable, mientras que la mayor proporción de carbono de la biomasa aérea está asociada a la biomasa aérea arbórea.

En este trabajo, las plantaciones de eucalipto se compararon con los pastizales naturales utilizados para la cría de ganado, sistema considerado a los fines de este estudio la línea base o de referencia, por constituir una de las actividades productivas típicas de los vertisoles. Esos pastizales se encuentran degradados por el arado o las quemadas reiteradas, el sobre-pastoreo y la falta de descansos para la recuperación del recurso forrajero disponible, con la pérdida de muchas especies originales y la aparición de otras especies con diferente valor forrajero (Rhades, 2003). Presentan, además, una gran heterogeneidad, la cual surge de la combinación del clima, suelo, topografía, y presencia o ausencia de monte (Landi y Galli, 1984). La producción de pasto varía mucho a través del año y entre años, cualquiera sea el pastizal, y dicha variación está determinada fundamentalmente por las condiciones climáticas de cada año (Pueyo *et al.*, 2005).

La forestación de pastizales degradados puede, potencialmente, mejorar el secuestro de carbono, principalmente en la biomasa (Lima *et al.*, 2006). Con respecto a la biomasa aérea, Schedlbauer y Kavanagh (2008) argumentan que el carbono fijado en la biomasa representa la principal contribución a los reservorios de carbono, cuando los bosques reemplazan pastizales. Coincidentemente, Noretto *et al.* (2006) encontraron que los cambios en los reservorios de carbono de una pradera luego de la plantación se debieron principalmente a aumentos en la biomasa aérea y a incrementos en el mantillo.

Con respecto a la biomasa radical, a diferencia de los árboles, cuyas raíces son longevas (Lima *et al.*, 2006), las especies de los pastizales adjudican entre el 30 y el 50% del carbono fijado para la formación y mantenimiento de un sistema radical voluminoso, fino y profundo (Kuzyakov y Domanski, 2000, citado de Lima *et al.*, 2006), de ciclo de vida corto.

Por otra parte, Köchy y Wilson (1997) explican que las diferencias en los procesos asociados al secuestro y liberación de carbono en las diferentes componentes de las forestaciones y de las praderas adyacentes se debe a diferencias en el microclima de ambos sistemas, en cuanto a las condiciones de humedad y temperatura. Las ganancias en carbono en las componentes biomasa y mantillo a menudo están asociadas a la disminución de la escorrentía y la infiltración y al aumento de la humedad del suelo (Rostagno *et al.* (1991); Abril y Bucher (2001), citado de Noretto *et al.*, 2006). Además, la menor temperatura del suelo de las forestaciones, asociada con una mayor cobertura de la superficie, disminuye la tasa de descomposición de la materia orgánica del suelo (Archer, 1995, citado de Noretto *et al.*, 2006).

Los objetivos de este capítulo fueron: a) evaluar la composición de la biomasa de *Eucalyptus grandis* discriminada en componentes de la biomasa aérea (fuste, hojas, ramas y frutos) y biomasa de raíces; b) estimar el carbono almacenado en la biomasa y necromasa de plantaciones de eucalipto de diferentes edades y manejos; y c) comparar los valores estimados de carbono en la biomasa de las plantaciones con los valores de carbono estimados en la biomasa de los pastizales naturales con uso ganadero, tomados como edad cero o sistemas de referencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Componentes de la biomasa forestal

La parte aérea de los 99 árboles apeados para el ajuste de ecuaciones de biomasa fue dividida en las componentes fuste (desde la base hasta los 5 cm de diámetro), frutos y ramas (incluyendo el despunte del fuste, desde los 5 cm de diámetro) y hojas. A su vez, a 54 de esos árboles se les extrajeron las raíces gruesas ($\geq 0,5$ cm de diámetro) hasta 1 metro de profundidad. Adicionalmente, se extrajeron y procesaron 15 árboles completos de 3 años y DAP mayores a 8 cm, como muestra de validación del poder predictivo de las ecuaciones de biomasa total y aérea para árboles jóvenes (Capítulo 3). La determinación del peso seco se hizo de acuerdo al método propuesto por Snowdon *et al.* (2002), con modificaciones, explicado previamente en el Capítulo 3 de este trabajo.

Determinación de carbono en la biomasa de los pastizales

En cada pastizal seleccionado se instalaron dos transectas, separadas para asegurar la independencia de las muestras. Sobre las progresivas de cada transecta se sortearon 3 parcelas cuadradas de 400 m². Las transectas se instalaron con ciertas restricciones: el punto de inicio debía encontrarse a no menos de 20 m del borde del pastizal, en las partes más altas de los lotes y en dirección perpendicular a la pendiente principal. Dentro de cada parcela se marcaron dos sub-parcelas: una de 2 m² y dentro de ella otra de 0,5 m². En las sub-parcelas de 2 m² se cortó en la base y se recogió todo el material verde aéreo (incluyendo matas arbustivas), se pesó en fresco y se tomaron alícuotas para determinación de pesos secos. En las sub-parcelas de 0,5 m² se extrajo todo el pan de tierra hasta los 20 cm de profundidad, para extracción de raíces. Las raíces se separaron mediante inmersión en agua, separándolas de las partículas de suelo adheridas; luego se escurrieron en papel absorbente, y se separó una alícuota para determinación de peso seco. La

determinación de los pesos secos se hizo de acuerdo al método de Snowdon *et al.* (2002). Con el promedio de los valores de peso seco de las parcelas se estimaron la biomasa aérea y radical de los pastizales, y se calculó el carbono almacenado en la biomasa aérea y subterránea por unidad de superficie.

Carbono en la biomasa de las plantaciones de eucalipto

En cada plantación de eucalipto seleccionada se instalaron dos transectas, sobre cada una de las cuales se sortearon 3 parcelas cuadradas de entre 400 m² y 600 m². Las transectas se instalaron con las mismas restricciones definidas para los pastizales. En cada parcela se midieron los DAP de todos los árboles vivos, se midieron algunas alturas totales representativas y se ajustaron ecuaciones de estimación de altura para cada rodal. Adicionalmente, se calcularon los volúmenes comerciales y los incrementos medios anuales en volumen.

Para la estimación de la biomasa de las plantaciones de eucalipto se aplicaron las ecuaciones ajustadas y validadas en el Capítulo 4 del presente trabajo. Con la ecuación de biomasa total, $BT \text{ (kg)} = -36,4271 + 0,6384 * d^2 + \epsilon$, se estimó la biomasa total de los árboles individuales medidos en las parcelas de los lotes forestales sin raleo y en los lotes jóvenes raleados (4 años).

En el caso de los lotes raleados de edades intermedia y adulta (6 y 8 años) se aplicó la ecuación $BA^{1/2} = -3,34381 + 0,85143 * d + \epsilon$, para estimar la biomasa aérea. Luego de re-transformar los valores estimados a la variable original, se aplicó a cada valor el término de corrección del sesgo (Ecuación 3.8). A los valores de biomasa aérea corregidos se les sumó un 15%, correspondiente a la biomasa de raíces, para estimar la biomasa total.

Para árboles de entre 8 y 11,4 cm de DAP (clase diamétrica 1), de plantaciones de entre 1 y 5 años, la muestra de validación indicó que las ecuaciones de biomasa total y aérea ajustadas y validadas para plantaciones de entre 6 y 10 años

subestiman los valores de biomasa individuales. Sin embargo, debido a que no se dispone actualmente de otras ecuaciones, la biomasa de los rodales jóvenes (plantaciones de 1 a 4 años) se estimó aplicando esa ecuación de biomasa total. Por lo tanto es necesario aclarar que todas esas estimaciones son valores subestimados.

Los valores de biomasa total individual estimados en las parcelas de los rodales seleccionados se sumaron para obtener totales por parcela, los cuales luego se promediaron y se calculó la biomasa por hectárea. A esos valores se los multiplicó por 0,5 para calcular el contenido de carbono almacenado en la biomasa.

Carbono en la necromasa de las plantaciones de eucalipto

Se agrupó bajo esta denominación al carbono acumulado en los detritos leñosos y el mantillo. En las parcelas principales se midieron todos los tocones remanentes de los raleos, sin incluir raíces, y los restos de árboles caídos, se calcularon sus volúmenes y se estimaron sus pesos tomando el valor de la densidad básica de la madera de eucalipto según López (1990). Simultáneamente, se instalaron sub-parcelas de 2 m² donde se recolectó todo el mantillo, se lo pesó y se tomó una alícuota para determinar peso seco. Los valores de carbono se calcularon multiplicando los pesos secos de cada componente por 0,5, y se expresaron como contenidos de carbono por unidad de superficie.

Análisis estadístico

Los valores de biomasa total y de necromasa de los pastizales y las plantaciones se analizaron con ANOVA según diseño anidado. Las diferencias entre medias de las distintas edades se probaron con Test de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Componentes de la biomasa

En los individuos de *Eucalyptus grandis* de 6 a 10 años estudiados en este trabajo, la biomasa de la copa representó el 13% de la biomasa total (n=54) y el 15% de la biomasa aérea (n=99), mientras que en los árboles de 3 años de edad la copa correspondió en promedio al 49% de la biomasa total (n=15) y al 61% de la biomasa aérea (n=15). Las proporciones de fuste respecto de la biomasa total fueron del 73% y del 32% para árboles de 6 a 10 años y de 3 años, respectivamente. Mientras que en individuos de 6 a 10 años la raíz representó el 18% con respecto al peso seco del fuste, en árboles de 3 años esa proporción fue del 65%. Peichl y Arain (2007) explican que las relaciones alométricas entre las componentes de la biomasa aérea cambian con la edad del rodal, resultando necesarias ecuaciones edad-específicas. Los mismos autores exponen que para rodales jóvenes de pino, la proporción de la biomasa del fuste respecto de la biomasa total es de un 25%, en tanto que la proporcionalidad raíz/tallo es de 0,3. Según Cairns *et al.* (1997) esta relación, indicador importante de la alometría de los árboles, varía estabilizándose en un rango entre 0,2 a 0,3.

En cuanto a la biomasa radical, en los individuos de *Eucalyptus grandis* cultivados en suelos arcillosos evaluados en este trabajo, la biomasa radical constituye, hasta 1 metro de profundidad, el 13 % de la biomasa total en árboles de 6 a 10 años de edad y el 19% de la biomasa total en árboles de 3 años. De acuerdo a Guerra *et al.* (2005), existe gran variabilidad en la producción de raíces finas y gruesas, según sea el tipo de clima donde se desarrollan, tipo de especie, estado de desarrollo o edad de los individuos. Según MacDicken (1997), la biomasa de raíces representa entre el 10 y el 40% de la biomasa total, mientras que la biomasa de raíces finas contribuye en menos de un 5 % a la biomasa arbórea total (Vogt *et al.*, 1998). Snowdon *et al.* (2002) señalaron valores de biomasa de raíces del 20% para el género *Pinus*, mientras que Kramer (1974, citado de Guerra *et al.*, 2005) indica, para cuatro

especies de árboles, que aproximadamente el 18% de la materia seca se encontraba en las raíces. Así mismo, Fogel (1983) señala que la biomasa de raíces de coníferas comprende entre el 10% y el 25% del árbol. Estas proporciones resaltan la importancia de incluir la estimación de biomasa radical cuando se evalúa la potencialidad de las plantaciones de eucalipto de almacenar carbono en la biomasa.

Carbono en la biomasa de las plantaciones de eucalipto y de los pastizales

En los pastizales estudiados, el carbono almacenado en la biomasa de pastos y matas arbustivas varió entre 0,6 y 7,2 Mg ha⁻¹. En las plantaciones, la biomasa aumenta a medida que crecen los árboles, incrementándose por lo tanto el carbono acumulado. Sin embargo, distintas calidades de sitios, que provocan diferencias en la productividad de las plantaciones, pueden ocasionar que entre las edades consideradas en la cronosecuencia el carbono acumulado en la biomasa no sea continuamente creciente, dando la impresión de descender entre el primero y segundo año y entre el tercero y cuarto (Figura 4.1). Eso podría deberse a que las características climáticas y edáficas, especialmente la disponibilidad de nutrientes y de agua, son determinantes del crecimiento de los árboles y de la distribución del carbono en sus componentes (Snowdon *et al.*, 2002).

Sin embargo, el Análisis de la Varianza y el Test de Tukey demuestran que los incrementos en biomasa total de las plantaciones sin raleo con respecto a los pastizales no son significativos durante los dos primeros años, diferenciándose a partir de los 3 años. Las principales características dasométricas de los rodales de eucalipto seleccionados para este trabajo muestran las diferencias entre plantaciones de distinta edad y calidad de sitio y entre plantaciones de igual edad pero diferente manejo (Tabla 4.1).

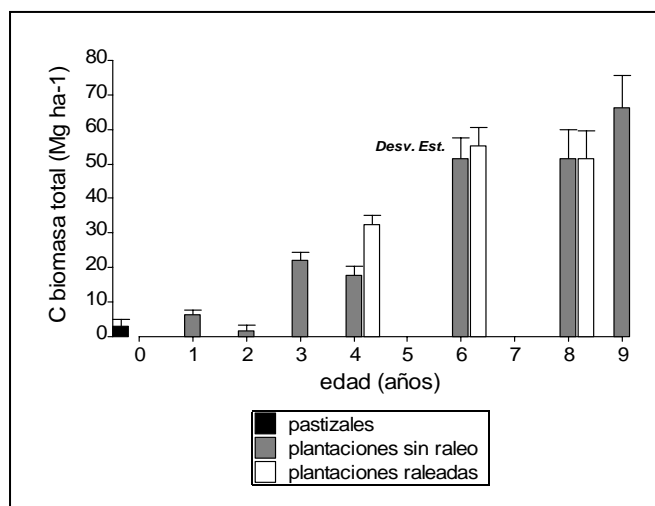


Figura 4. 1 Contenido de carbono en la biomasa total de las plantaciones con distinto manejo y de los pastizales de referencia.

Tabla 4.1 Principales características de las plantaciones forestales estudiadas. IMA: incremento medio anual en volumen.

	Edad (años)	DAP promedio (cm)	H promedio (m)	Volumen promedio (m ³ ha ⁻¹)	IMA (m ³ ha ⁻¹ año)
Plantaciones sin raleo	1	8,6	8,1	19,8	.
	2	7	7,1	11,9	6,0
	3	11,6	12,5	52,2	17,4
	4	10,2	12,4	48,9	12,2
	6	14,4	16,3	115,3	19,3
	8	15,2	16,5	129,8	16,2
	9	20,7	23,7	204,4	22,7
Plantaciones raleadas	4	15,9	15,3	72,6	18,2
	6	19,8	21,3	151,5	25,3
	8	19	22,6	221,7	27,7

El carbono de la biomasa en plantaciones de 4 años raleadas es significativamente mayor al de plantaciones de la misma edad sin raleo, aunque esas diferencias no son estadísticamente significativas entre las plantaciones de 6 y de 8 años (Figura 4.1). Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Chiang *et al.* (2008), quienes de acuerdo a mediciones en ensayos de raleo en bosques de roble,

encontraron que, a largo plazo, los raleos no producen efectos sobre el carbono de la biomasa aérea y la necromasa.

Carbono en mantillo y detritos de las plantaciones de eucalipto y de los pastizales

Los valores de carbono almacenados en la necromasa de los sistemas evaluados variaron de 0 Mg ha⁻¹ en los pastizales a valores entre 0,13 y 12,2 Mg ha⁻¹ en las plantaciones sin raleos de 4 y 9 años, respectivamente, y de 4,7 a 16,4 Mg ha⁻¹ en las plantaciones raleadas de 4 y 8 años, respectivamente (Figura 4.2). Como se pone en evidencia de esos resultados y concordando con MacKenzie *et al.* (2000), los restos de material leñoso y la hojarasca tienen importancia en los ecosistemas forestales, en comparación con los pastizales, donde la menor cobertura favorece la descomposición del mantillo más rápidamente (Archer, 1995, citado de Nosetto *et al.*, 2006). Sin embargo, puede resultar difícil la determinación de la cantidad de mantillo debido a la heterogeneidad espacial en la distribución de los diferentes componentes (Richards y Charley, 1977, citado de Snowdon *et al.*, 2005).

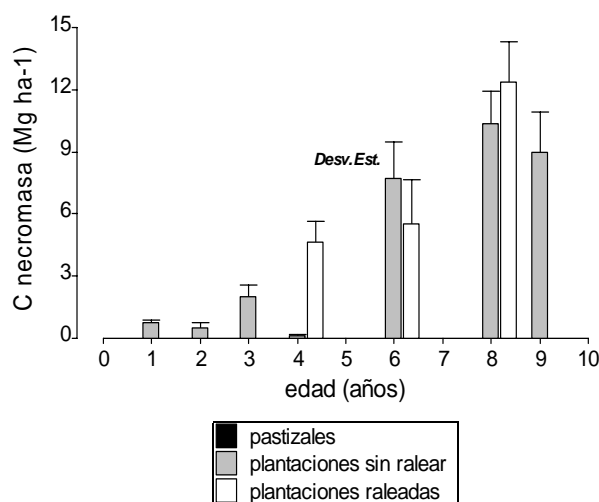


Figura 4. 2 Contenido de carbono en la necromasa de las plantaciones con distinto manejo y de los pastizales de referencia.

Con respecto a diferencias en cuanto al manejo de las plantaciones, se espera que cortas parciales, como los raleos, ocasionen pequeños cambios en el piso forestal (mantillo y detritos leñosos) (Yanai *et al.*, 2003). Coincidentemente, los resultados de este trabajo muestran que aún cuando la necromasa es variable entre plantaciones de una misma edad pero con distintos manejos, es significativamente mayor solamente en las plantaciones de 4 años raleadas, comparadas con las de igual edad sin raleo. Esas diferencias probablemente se deban a la acumulación de residuos del raleo y a los tocones remanentes, que tardan algunos años en descomponerse, y a diferencias locales de humedad y temperatura, que influyen en las tasas de descomposición de los materiales depositados sobre la superficie del suelo (Köchy y Wilson, 1997). Esas diferencias no son significativas cuando se analizan plantaciones de edades intermedia y adulta, coincidiendo con Henderson (1995), quien plantea que los cambios en el carbono podrían depender de la intensidad del raleo, pero que podrían no ser significativos a largo plazo.

CONCLUSIONES

- La inclusión de la biomasa de copa y de raíces en la estimación del carbono fijado en la biomasa forestal mejora sustancialmente las evaluaciones del potencial de las plantaciones de eucalipto para almacenar carbono.
- La transformación de pastizales degradados a plantaciones de eucalipto incrementa significativamente el carbono almacenado en la biomasa y necromasa desde los primeros años.
- Los raleos afectan el carbono almacenado en la biomasa y en la necromasa de las plantaciones en los primeros años posteriores a su aplicación, no detectándose cambios en estas componentes en los años posteriores.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abril A. y Bucher E. H. 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Applied Soil Ecology* 16:243-249.
- Archer S. 1995. Tree–grass dynamics in a Prosopis-thornscrub savanna parkland: reconstructing the past and predicting the future. *Ecoscience* 2(1):83-99.
- Cairns M, Brown S., Eileen H. y Baumgardner G. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forest. *Oecología* 111:1-11.
- Chiang J. M., McEwan R. W., Yaussy D. A. y Brown K. J. 2008. The effects of prescribed fire and silvicultural thinning on the aboveground carbon stocks and net primary production of overstory trees in an oak-hickory ecosystem in southern Ohio. *Forest Ecology and Management* 255(5-6):1584-1594.
- Fogel R. 1983. Root turnover and productivity of coniferous forests. *Plant and Soil* 71:75-85.
- Guerra J., Gayoso J., Schlatter J., Nespolo R. 2005. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. *Avances en la evaluación de Pinus radiata en Chile*. *Bosque* 26(1):5-21.
- Henderson G. S. 1995. Soil organic matter: a link between forest management and productivity. En: *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. Bigham J. M. y Bartels J. M. (eds.). Soils Science Society of America, Madison, WI, pp. 419-435.
- IPCC. 2005. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (NGGI). Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendía L., Miwa k., Ngara T., Tanabe K. y Wagner F. (eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, 594 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>. Activo septiembre de 2009.
- Köchy M. C. y Wilson S. D. 1997. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology* 78(3):732-739.
- Kramer P. 1974. Relaciones hídricas de suelo y plantas. Una síntesis moderna. Centro Regional de Ayuda Técnica. México-Buenos Aires, 538 pp.
- Kuzyakov Y. y Domanski G. 2000. Carbon input by plants into the soil. *Rev. J. Plant Nutr.* 163:421-431.
- Landi M. y Galli I. 1984. Introducción al manejo del campo natural en la Provincia de Entre Ríos. Boletín Técnico. Serie Producción Vegetal N° 24. INTA EEA Concepción del Uruguay, 20 pp.
- Lima A. M. N., Silva I. R., Neves J. C. L., Novais R. F., Barros N. F., Mendonça E. S., Smyth T. J., Moreira M. S. y Leite F. P. 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 235:219-231.
- López J. A. 1990. Densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* de la procedencia de huerto semillero de Sudáfrica en tres sitios edáficos de

- Concordia (Entre Ríos). 26° Congreso técnico sobre celulosa y papel. ATIPCA. Trabajos técnicos, pp. 39-46.
- MacDicken K. G. 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. Forest Carbon Monitoring Program 87 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.winrock.org/ecosystems/files/carbon.pdf>. Activo febrero de 2007.
- MacKenzie N., Ryan P., Fogarty P. y Wood J. 2000. Sampling, measurement and analytical protocols for carbon estimation in soil, litter and coarse woody debris. National Carbon Accounting System Technical Report N°14. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, Commonwealth of Australia, 52 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas/>. Activo septiembre de 2009.
- Nosetto M. D., Jobbágy E. G. y Paruelo J. M. 2006. Carbon sequestration in semi-arid rangelands: comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments* 67:142-156.
- Paul K., Polglase P., Bauhus J., Raison J. y Khanna P. 2004. Modelling change in litter and soil Carbon following afforestation or Reforestation: calibration of the Fullcam 'Beta' Model. National Carbon Accounting System Technical Report N° 40. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, Commonwealth of Australia, 116 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas/>. Activo mayo de 2009.
- Peichl M. y Arain M. A. 2006. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and forest meteorology* 140:51-63.
- Peichl M. y Arain M. A. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management* 253(1-3):68-80.
- Pueyo J. M., Iacopini L., Fonseca J., Burns J., Bonini Y., Ludi R. y Grancelli R. 2005. Medición de la Producción Primaria del Pastizal Natural en el Centro Norte de la Provincia de Entre Ríos. Hoja informativa Electrónica N° 128. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/05/128.htm>. Activo julio de 2009.
- Rhades L. 2003. Manejo del pastizal natural. Hoja Informativa Electrónica N° 81. EEA Concepción del Uruguay, INTA. Publicado en internet, disponible en <http://www.inta.gov.ar/concepcion/info/hie/03/81.htm>. Activo febrero de 2007.
- Richards B. N. y Charley J. L. 1977. Carbon and nitrogen flux through native forest floors. En: *Nutrient Cycling in Indigenous Forest Ecosystems*. CSIRO Division of Land Resources Management, Perth, pp. 65-81.
- Rostagno C. M., Del Valle H. F. y Videla L. 1991. The influence of shrubs on some chemical and physical properties of an aridic soil in north-eastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments* 20(2):179-188.

- Schedlbauer J. L. y Kavanagh K. L. 2008. Soil carbon dynamics in a chronosequence of secondary forests in northeastern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 255(3-49):1326-1335.
- Snowdon P., Raison J., Keith H., Ritson P., Grierson P., Adams M., Montagu K., Bi H., Burrows W., y Eamus D. 2002. Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. Technical report N° 31. National Carbon Accounting System. Australian Greenhouse Office. Commonwealth of Australia, 76 pp. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>. Activo mayo de 2009.
- Snowdon P., Ryan P. y Raison J. 2005. Review of C:N ratios in vegetation, litter and soil under australian native forests and plantations. National Carbon Accounting System Technical Report N° 45. Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage, Commonwealth of Australia, 72 pp. National Carbon Accounting System. Australian Greenhouse Office. Commonwealth of Australia. Publicado en internet, disponible en <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>. Activo mayo de 2009.
- Vidal A., Benítez J. Y., Carlos R. y Gra H. 2004. Estimación de la biomasa de copa para árboles de *Pinus caribaea var. caribaea* en la F. E. I. La Palma de la Provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho* 11:60-66.
- Vogt K. A., Vogt D. J. y Bloomfield J. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200:71-89.
- Yanai R. D., Currie W. S. y Goodale C. L. 2003. Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems* 6:197-212.

CONCLUSIONES GENERALES

En este capítulo se presenta una síntesis del trabajo, abordando el tema de manera integral, presentando las conclusiones de los aspectos estudiados en los respectivos capítulos. Se plantean, asimismo, las principales “brechas” del conocimiento, identificándose las futuras líneas de investigación relacionadas al tema.

En la zona oeste de la Provincia de Entre Ríos se extiende una importante superficie de pastizales naturales sobre suelos Vertisoles, marginalmente aptos para forestación con *Eucalyptus grandis*, pero potencialmente aptos para plantaciones como sumideros de carbono. Por otro lado, el avanzado estado de degradación de los pastizales naturales, evidenciado por la disminución de la cantidad y calidad del recurso forrajero para cría de ganado, y la consiguiente disminución de la rentabilidad, es uno de los factores que determinan que los productores ganaderos comiencen a destinar pequeñas superficies de los pastizales a plantaciones de eucalipto.

El principal objetivo de las plantaciones establecidas es la producción de madera, sin considerar la oportunidad de aprovechar los servicios ambientales como la fijación y conservación del carbono. Sin embargo, el manejo de las forestaciones incorporando el objetivo de maximizar la fijación de carbono, para comercializarlo en el mercado podría constituir un ingreso adicional que mejore la rentabilidad de los proyectos de inversión forestal, y compensar de esa forma el mayor tiempo de retorno de la inversión.

Los resultados de este trabajo demuestran que al reemplazar pastizales degradados por plantaciones de eucalipto, se incrementa el carbono almacenado en el sistema en su conjunto a medida que crecen las plantaciones (Figura 5.1).

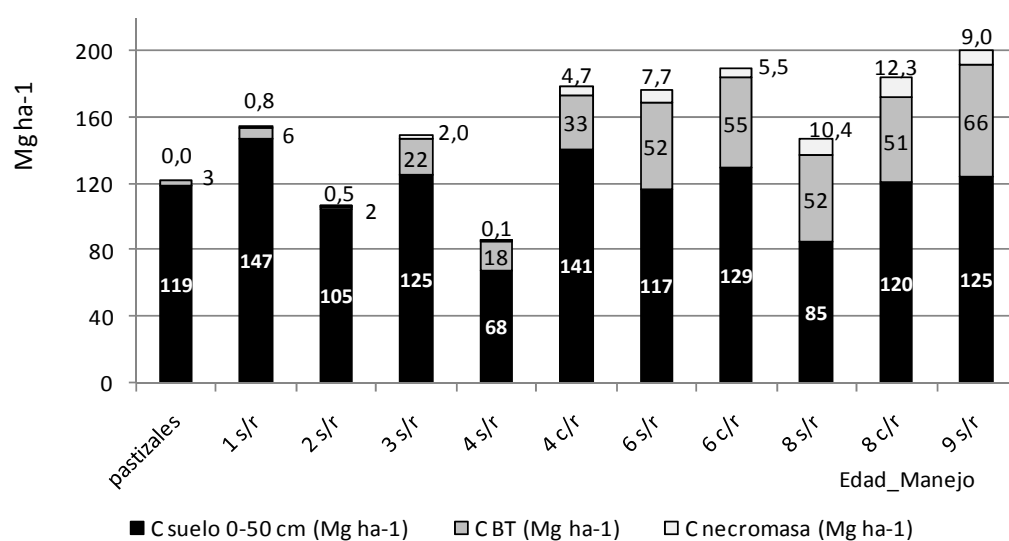


Figura 5. 1 Contenido de carbono en los componentes evaluados en la cronosecuencia (pastizales tomados como edad cero y plantaciones de 1 a 9 años).

Con respecto al efecto a corto plazo de las plantaciones en el suelo, principal reservorio de carbono de los ecosistemas terrestres, el carbono orgánico (COT) no se ve afectado en los primeros 50 cm al transformar los pastizales a plantaciones de eucalipto. Si las plantaciones son manejadas con raleos, el COT no varía significativamente durante los primeros 9 años. Por el contrario, cuando no se aplican raleos, el COT desciende significativamente luego de los 6 años.

En cuanto a la calidad de la materia orgánica, se observa un aumento de las sustancias húmicas, es decir de formas de carbono más estables luego de la plantación, pero no cambia el grado de polimerización, es decir la calidad de la materia humificada. No obstante, en las plantaciones raleadas no se verifican esos cambios, probablemente debido al aumento de la mineralización por cambios en las condiciones locales. Estos resultados indican que para el horizonte temporal que abarcó este estudio, el manejo de las plantaciones tiene influencia en el comportamiento del carbono en el suelo. Para el turno de corta comercial para las plantaciones de eucalipto en suelos Vertisoles, que está definido entre 14 a 16 años, la cronosecuencia evaluada alcanza apenas dos tercios de la edad de corta. Se espera,

según antecedentes de estudios similares, que en los años sucesivos el carbono se estabilice hasta llegar a un equilibrio, diluyéndose los efectos del manejo.

La biomasa total constituye la principal componente de almacenamiento de carbono y que produce un aumento significativo en el carbono total de las forestaciones de eucalipto con respecto a los pastizales de referencia. Si bien la mayoría de los estudios evalúan la biomasa aérea, los resultados del presente trabajo sugieren que incluir la biomasa de raíces mejora sustancialmente las estimaciones de biomasa, sobre todo teniendo en cuenta la proporción que representan las raíces en las plantas jóvenes. Para ello, las ecuaciones de biomasa total y de biomasa aérea ajustadas y validadas localmente en este trabajo permiten realizar estimaciones confiables e insesgadas de la biomasa de individuos de *Eucalyptus grandis* con DAP de 8 a 28 cm de 6 a 10 años, con diferentes manejos.

Con respecto al manejo de las forestaciones con el doble propósito de obtener madera de calidad y de fijar carbono como servicio ambiental, los raleos producen aumento en la biomasa en comparación con las plantaciones sin ralear, aunque las diferencias son significativas solamente en las evaluaciones a la edad de 4 años, manteniéndose valores levemente superiores los años siguientes pero sin significancia estadística. Así mismo, la necromasa es variable entre plantaciones de una misma edad pero con distintos manejos, siendo significativamente mayor solamente en las plantaciones de 4 años raleadas, comparadas con las de igual edad sin raleo.

Resumiendo, la transformación de pastizales degradados a plantaciones de eucalipto sobre suelos Vertisoles de Entre Ríos favorece la acumulación de carbono considerando todas las componentes de ambos sistemas en conjunto, principalmente en la biomasa y en la necromasa.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante la investigación y el análisis de los respectivos temas en que se ha dividido este trabajo de tesis para abordar el estudio del carbono en los sistemas forestales implantados, han ido surgiendo numerosos interrogantes de los cuales se plantean las principales líneas de investigación con las cuales responder a algunos de ellos:

- Estudio del comportamiento del carbono orgánico del suelo en plantaciones de mayor edad y en manejos con ciclos más largos.
- Estudio de procesos edáficos (respiración edáfica, tasas de mineralización y humificación, movimientos del carbono en el perfil).
- Estudio del efecto de distintas intensidades de raleos e incorporación de las podas en los esquemas de manejo.
- Desarrollo de ecuaciones de biomasa total edad- específicas.
- Desarrollo de ecuaciones de biomasa total para plantaciones raleadas.
- Ajuste de ecuaciones parciales, por componentes de la biomasa.
- Estudios del carbono almacenado en las diferentes componentes de plantaciones de eucalipto manejadas con rebrotes luego del primer corte a tala rasa.
- Estudio del balance de carbono de los sistemas forestales, incluyendo las emisiones de carbono.