

REPORTE NACIONAL

Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina

REPORTE NACIONAL:

Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina

AUTORIDADES

Pablo L. Peri

Coordinador

Programa Nacional Forestales

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

Sabina Vetter

Directora Nacional

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial

Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca



Argentina
Presidencia



REPORTE NACIONAL:

Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina.

Agosto 2022

Trabajo Financiado por el INTA en el marco del Programa Nacional Forestal, y la Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-Industrial del Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca.

Agradecimientos

Al Ing Fabio Achinelli, Docente de la FCAyF - UNLP y Profesional de la CIC Buenos Aires, por aportar datos para incluir en el análisis correspondiente a plantaciones de Eucalyptus en provincia de Buenos Aires.

A Cart. Nora I. Clemente, por armado y edición de mapas, Área SIG e Inventario Forestal, Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial.

Fotografías:

Tapa: R. Schincariol, M. Feyling, A. Giacobbi

Portada: L. Vera

Contratatapa: M. D'Angelo

COORDINACIÓN GENERAL
Pablo L. Peri y Daniel Maradei

COORDINACIÓN DE TAREAS DE CAMPO
Ana M. Lupi¹ y Cecilia Tato Vazquez²

**COORDINACIÓN DE ANALISIS DE DATOS Y
ELABORACION DE INFORME**
Javier Gyenge³

ANALISIS DE DATOS Y ELABORACION DE INFORME
Javier Gyenge³, Gabriel Gatica³, Martín Sandoval⁴, Ana M. Lupi¹ y Matías
Gaute⁵

¹Instituto de Investigación Suelos CIRN INTA

² Área de Extensión Forestal, Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial.

³ CONICET, UEDD INTA CONICET Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible, sede Tandil.

⁴ Lab. de Investigación de Sist. Ecológicos y Ambientales (LISEA), FCAyF, UNLP.

⁵ Área SIG e Inventario Forestal, Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial.

PARTICIPANTES DE LA DIRECCIÓN NACIONAL DE DESARROLLO FORESTO-INDUSTRIAL

Nombre y Apellido	Provincia
Daniel Maradei	Ex Director Nacional
Cecilia Tato Vázquez	Coordinadora del Área de Extensión Forestal
Andrea Giacobbi	Técnica Regional – Salta
Camila Szwec	Asistente Técnica Área de Extensión Forestal
Carla Rodríguez	Técnica Regional - Formosa
Diego Domínguez Daguer	Técnico Regional - Buenos Aires
Esteban Zupan	Técnico Regional - Córdoba
Gabriel Zalazar	Técnico Regional - Patagonia Andina Norte
Guillermo Melzner	Técnico Regional - Patagonia Andina Sur
José Mitre	Técnico Regional - Santiago del Estero
Juan Pablo Zabala	Técnico Regional - Corrientes
Julia Nosetti	Técnica Regional - San Juan
Julio García	Ex Técnico Regional - Patagonia Valles Irrigados
Leandro Arce	Técnico Regional - Santiago del Estero y Santa Fe
Lucas Vera	Técnico Regional - Chaco
Luis Cosimi	Técnico Regional – Jujuy
Mario Feyling	Técnico Regional – Tucumán
Mario Flores Palenzona	Técnico Regional - Entre Ríos
Martin López	Técnico Regional - Misiones y NE de Corrientes
Marcelo Falconier	Técnico Regional - Misiones
Marina D'Angelo	Técnica Regional - Misiones
Natalia Naves	Técnica Regional - Mendoza
Rocío Schincariol	Ex Técnica Regional - Delta del Paraná
Sebastián Bessonart	Técnico Regional - Corrientes

PARTICIPANTES DEL INTA

Nombre y Apellido	Unidad de INTA
Alejandra Von Wallis	EEA Montecarlo
Ariel Albornoz	EEA Delta del Paraná
Alejandro Aparicio	EEA Bariloche
Astor Lopez	EEA Sáenz Peña
Carlos Buduba	EEAf Esquel
Carlos Lopez Morillo	EECT Yuto
Dario Ceballos	EEA Delta del Paraná
Diego Aquino	EEA Montecarlo
Ezequiel Balducci	EECT Yuto
Federico Caniza	EEA Bella Vista
Flavio Speranza	EEA Yuto
Francisco Cardozo	EEA Oliveros
Guillermo Merletti	EEA Santiago del Estero
Iris Figueredo	EEA Montecarlo
Javier Álvarez	EEA Delta del Paraná
Laura Faustino	EEA Delta del Paraná
Luis Fornes	EEA Famailla
Marcos Costa	EEA Montecarlo
Maria Garcia	EEA Concordia
Maria Florencia Roldan	EEA Sáenz Peña
Marcelo Martinez	EEA Delta del Paraná
Moledo, Wilfredo	EEA Concordia
Pablo Saravia	EEA Famaillá
Paula Re	EEA Delta del Paraná
Sebastian Kees	EEA Sáenz Peña
Roberto Kobs	EEA Montecarlo
Rodolfo Martiarena	EEA Cuenca del Salado
Sergio Mondaca	EEA San Juan
Vanesa Asencio	EEA Alto Valle
Vanina Cornejo	EEA San Juan
Walter Paternoste	EEA Delta del Paraná

PARTICIPANTES DE OTRAS INSTITUCIONES

Nombre y Apellido	Sede
Gabriela Soto	Dirección de Suelo y Agua Rural. Provincia del Chaco
Daniel Varela,	Dirección de Suelo y Agua Rural. Provincia del Chaco
Diego Kreis	Dirección de Suelo y Agua Rural. Provincia del Chaco
Jose Ledesma	Dirección de Suelo y Agua Rural. Provincia del Chaco
Natalia Mansilla	Dirección de Suelo y Agua Rural. Provincia del Chaco
Rita Pereyra	Fac. de Agronomía y Veterinaria, Univ. Nac. De Río Cuarto.

PRODUCTORES Y EMPRESAS

Provincia	Apellido y Nombre / Nombre empresa
Buenos Aires	Smith, Juan. ForestalNet Etchegaray, Adriana. Nuevos Montes Semillero Buck Estancia La Clavija. Esteban Bruel Estancia El Jabalí S.A. Establecimiento San José. Urionaguena Hermanos Fiplasto S.A. Fabio Boglio Bilotta, Rafael
Chaco	Aznar, Carlos Ramón El Recodo SRL De Arriortua, Sebastián P. Gonzalez, Ramón Antonio Fogar, Roberto Val-Mar S.A. Gauriluk, Esteban Municipalidad de San Bernardo Pawluk, Juan Pablo Slipansky, León. Queste SA Solis, Eusebio Unitan SAICA
Chubut	Cia de Tierras Sud Argentino S.A. Ea El Maitén Cia de Tierras Sud Argentino S.A. Ea Leleque Municipalidad de Esquel, Reserva La Zeta Corralón Pasquini SRL, Forestación Corcovado
Córdoba	Flia Valls. La Yunta. Flia Donath. La Ramada. Flia Rudi. La Cancha. Aceitera General Deheza S.A. Flia Zabaleta. Espinillos.
Corrientes	Bosques del Plata Las Marias/Maria Concepción Tapebicua López, Maria Silvia USAL Ferrum SA de Cerámica y Metalurgia Fideicomiso forestal Euca Forest – Salinas Empresas Verdes S.A. (EVASA) Empresa Williner. Establecimiento las Taperitas Enrique Zeni Forestal Argentina SA
Delta (Bs. As.)	Rodríguez, Silvia EEA Delta Caaby S.A. Papel prensa S.A. Flia Schincariol Flia Martínez

	Gomez, David
Entre Ríos	EEA INTA Concordia Eksarciyan Bogos Asadur.Calabacilla Eksarciyan Bogos Asadur./San Gregorio Comercio y Desarrollo. Ea. Palmar Bomare. Miralejos Giudice. Los Niestos Ftal. Argentina. Charrúas Dacunda.Cnia. La Paz Forescor Zunino-Velazquez Ftal Argentina / El Ceibo Finondo, Carlos Rafael Abedul SA
Formosa	Moya, Samuel Atanacio Maley, Pedro Paredes, Cristobal UNITAN SAICA Biometrica Las Lomitas Sr Acevedo Scheffler, Rodolfo
Jujuy	Herrera, Silvia. Finca El Pedernal, de Alvarado, Pascual. Finca Bella Vista Forestal Norteña S.A.
Mendoza	Toso, Pedro INTA Rama Caída
Misiones	Pindo SA Lipsia SA Steven, Alfredo Simon, Juan Rauschmayr, Maria Papel Misionero Sr. Felix (Vecino de empresa Papel Misionero) Ishichu SRL Buchinsky, Tito Frank, Ralf Establecimiento Santa Cecilia
Neuquén	Corfone Agrupación Mapuche Catalan Los Peucos
Río Negro	Crespo María Angélica-Flia Bressan Bariloche Finca el Nogueral EEA INTA Alto Valle Tiers SA
Salta	Falcón, Raúl.Finca Río Seco Martín, Rubén. Peña colorada Banchik, Jorge. El Refugio Falcón, Raúl. Finca Río Seco

	Yerba buena La Encontrada San Alejo
San Juan	Aval S.A.
Santiago del Estero	FCF Fundapaz Romero, Carlos
Tucumán	Las Grevileas SA EEA INTA Famailla La Providencia / Arcor Finar SA/ Fronterita Monte Grande SA. San Miguel FGF Trapani Trapani, Vicente

SIGLAS UTILIZADAS

COS: Carbono orgánico del suelo

COS30: Cantidad de COS en los primeros 30 cm del suelo (Mg/ha)

COSs: Cantidad de COS en el suelo (Mg/ha)

COSr: Cantidad de COS en los primeros 30 cm del suelo (Mg/ha) bajo uso alternativo (agricultura, pastizales, bosque nativo, entre otros)

COSp: Cantidad de COS en 0-30 cm del suelo (Mg/ha) bajo uso forestal

DA: Densidad aparente (Mg/m^3)

ETP Evapotranspiración potencial (mm)

GEI: Gases de efecto invernadero

MOS: Materia orgánica del suelo

PMA: Precipitación media anual (mm)

Prof.: Profundidad del suelo (cm)

ProfS: Profundidad específica del muestreo (cm)

TMA: Temperatura media anual ($^{\circ}C$)

PM: Parcela de muestreo

UM: Unidad de manejo

DS: Desvío estándar

INDICE

1.- RESUMEN EJECUTIVO	1
2.- OBJETIVOS DEL RELEVAMIENTO	2
3.- MARCO GENERAL DEL RELEVAMIENTO NACIONAL	2
3.1.- La importancia del carbono orgánico del suelo	3
3.2.- La importancia del monitoreo del carbono orgánico del suelo	4
3.3.- Alcance y usuarios de la información contenida en el documento	4
4.- PERFIL AMBIENTAL Y PRODUCTIVO DE ARGENTINA	5
4.1.- Ecorregiones de Argentina	5
4.2.- Perfil productivo del sector agrícola y forestal	7
4.3.- Regiones forestales de Argentina y sus características productivas	9
5.- ARGENTINA EN ACUERDOS INTERNACIONALES RELACIONADOS CON EL MEDIO AMBIENTE	20
6.- PROPIEDADES Y PROCESOS QUE CONTROLAN EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO	21
7.- CONDICIONES DEFINIDAS PARA EL RELEVAMIENTO NACIONAL	24
7.1.- Metodología de relevamiento en el campo	25
7.1.1.- Toma de muestras en el campo	25
7.1.2.- Manipulación de las muestras de suelo en laboratorio	27
7.1.3.- Cálculos aplicados para estimar el valor de las distintas variables	27
7.2.- Relevamiento de información publicada	28
7.3.- Clasificación de las clases de Uso de la tierra	29
7.4.- Análisis estadístico	30
8.- RESULTADOS	33
8.1.- Patrones generales a nivel nacional	33
8.1.1.- Distribución del muestreo por usos y clases de uso de la tierra	33
8.2.- Almacenamiento de C en suelos forestados y su relación con otros usos del suelo	39
8.3.- Almacenamiento de C en suelos forestados analizados por ecorregión y clases de uso de la tierra	41
8.3.1.- Análisis a nivel nacional por Uso de la tierra	41
8.3.2.- Análisis por Ecorregión y por clase de Uso de la tierra	45
8.3.2.1.- Selva Paranaense	45
8.3.2.2.- Yungas	45
8.3.2.3.- Esteros del Iberá	47
8.3.2.4.- Campos y Malezales	47
8.3.2.5.- Chaco Húmedo	49
8.3.2.6.- Chaco Seco	49
8.3.2.7.- Pampeana	51
8.3.2.8.- Delta del Paraná	51
8.3.2.9.- Espinal	53
8.3.2.10.- Monte	54
8.3.2.11.- Estepas y Bosques Patagónicos	55
8.4.- Efecto de factores biológicos y ambientales sobre el almacenamiento de C en suelos forestados por región forestal	57
8.4.1.- Mesopotámica	57
8.4.2.- NOA	60
8.4.3.- Centro Norte	63
8.4.4.- Pampeana	64
8.4.5.- Delta del Paraná	67
8.4.6.- Cuyo y Alto Valle del Río Negro	68
8.4.7.- Patagonia Andina	69
8.5.- Efecto de las rotaciones forestales sobre el COS	72

9.- CONCLUSIONES	
10.- BIBLIOGRAFIA	

73
77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Área forestada (ha) por provincia y grupo de especies.	8
Tabla 2	Descripción de los parámetros de WorldClim (más detalles en http://www.worldclim.com y en Hijmans et al. 2005).	32
Tabla 3	Número de datos individuales discriminado por el origen de los mismos (publicaciones científicas o relevamiento de campo) y por uso de la tierra (línea base, plantaciones forestales y uso alternativo).	33
Tabla 4	Cantidad de datos por clases del uso de la tierra Plantaciones forestales y por especie según el origen de los datos (búsqueda en publicaciones o a partir del relevamiento de campo). En negrita se detalla el total de datos por clases de uso de la tierra. En el caso de Mixto dentro de <i>Eucalyptus</i> spp. se muestran los datos de 5 parcelas obtenidas en la bibliografía en donde no se diferencian las cubiertas por <i>E. camaldulensis</i> de las de <i>E. grandis</i> .	34
Tabla 5	Cantidad de datos por uso de la tierra, clases y origen de los datos (búsqueda en publicaciones o a partir del relevamiento de campo). En negrita se detalla el total de datos por clases de uso de la tierra.	35
Tabla 6	Resumen descriptivo de los valores de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes usos del suelo en Argentina. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada tipo de uso de la tierra dentro de cada Ecorregión. La columna final es el resultado de modelos lineales generalizados mixtos aplicados para evaluar diferencias en la cantidad de COS entre tipos de uso de la tierra.	42
Tabla 7	Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de la Selva Paranaense y de Yungas. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos.	46
Tabla 8	Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de los Esteros del Iberá y de Campos y Malezales. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos.	48
Tabla 9	Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en las ecorregiones del Chaco Húmedo y Seco. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos.	50
Tabla 10	Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de Pampeana y Delta del Paraná. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos.	52
Tabla 11	Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la Ecorregión del Espinal y del Monte. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos.	54
Tabla 12	Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los	56

primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de Bosques y Estepa Patagónica. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos.

Tabla 13	Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Mesopotamia (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))).	58
Tabla 14	Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal del NOA (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))).	60
Tabla 15	Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal Centro Norte (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))).	63
Tabla 16	Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Mesopotamia (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))).	64
Tabla 17	Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Cuyo y Alto Valle del Río Negro (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))).	69
Tabla 18	Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Patagonia (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))).	70
Tabla 19	Promedio de COS (\pm DS; Mg/ha) y cantidad de repeticiones (n) en los primeros 30 cm de suelo por especie forestal en las distintas rotaciones.	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Histograma de frecuencia de los casos obtenidos en el relevamiento de campo y desde la bibliografía.	34
Figura 2	Mapa de la República Argentina en donde se detalla la distribución de las plantaciones forestales, discriminadas por plantaciones con especies de pinos (<i>Pinus</i> spp.), eucaliptos (<i>Eucalyptus</i> spp.), sauces (<i>Salix</i> spp.) y álamos (<i>Populus</i> spp.), especies nativas y otras, y los puntos en donde se realizó el relevamiento de los datos de campo (sitios con muestreo de suelo en las plantaciones forestales).	37
Figura 3	Mapa de la República Argentina en donde se detalla la distribución de las plantaciones forestales, discriminadas por plantaciones con especies de pinos (<i>Pinus</i> spp.), eucaliptos (<i>Eucalyptus</i> spp.), sauces (<i>Salix</i> spp.) y álamos (<i>Populus</i> spp.), especies nativas y otras, y los puntos con datos de COS forestales obtenidos en la bibliografía.	38
Figura 4	Distribución de los sitios visitados en el relevamiento de campo con plantaciones forestales (Izquierda) y distribución de los sitios visitados con plantaciones de <i>Pinus</i> spp. en relación a la región ecológica, ambos en relación a la temperatura media anual (TMA, °C) y precipitación media anual (PMA, mm/año) extraída de Wordclim.org.	39
Figura 5	Valores promedio de cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo en los tres usos del suelo considerados (Línea Base, Plantaciones y Uso Alternativo).	40
Figura 6	Valores promedio de cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo, en las distintas clases que conforman los tres usos del suelo considerados.	41
Figura 7	Distribución de los sitios en donde se obtuvo información sobre la cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo en relación a las distintas Ecorregiones descriptas para la Argentina.	43
Figura 8	Relación entre la cantidad de COS promedio en los suelos de la Línea Base de todas las Ecorregiones y el COS promedio de las Plantaciones y Uso Alternativo (A) y del COS de la Línea Base en relación con las clases <i>Pinus</i> spp. y <i>Eucalyptus</i> spp. del Uso de la tierra Plantaciones (B).	44
Figura 9	Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Selva Paranaense (A) y Yungas (B y C). Los paneles A y B muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que el panel C los muestra por Uso de la tierra.	47
Figura 10	Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Campos y Malezales (A y B) y de los Esteros del Iberá (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que los paneles B y D los muestra por Uso de la tierra.	48
Figura 11	Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Chaco Húmedo (A y B) y Chaco Seco (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que los B y D por Uso de la tierra.	50
Figura 12	Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Pampa (A y B) y Delta del Paraná (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de	53

	la tierra mientras que los B y D por Uso de la tierra.	
Figura 13	Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión del Espinal (A y B) y de Monte (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que los B y D por Uso de la tierra.	55
Figura 14	Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Estepa y Bosques Patagónicos clasificados por clases de Uso de la tierra. Las plantaciones forestales analizadas fueron todas realizadas con Pino ponderosa (<i>Pinus ponderosa</i>). El panel inserto muestra los valores promedio para la Línea Base y Plantaciones forestales.	56
Figura 15	Diferencias entre el COS de los primeros 30 cm de suelo de las Plantaciones forestales con el COS de las clases del Uso de la tierra Línea base con relación al COS de la situación vecina que representa la Línea base (A) y en relación a la Precipitación media anual del sitio (B).	57
Figura 16	Relación entre la cantidad de COS en los primeros 30 cm en relación con la estacionalidad de la PMA (CV en %; bio15 de Wordclim) y el contenido de arcilla del suelo.	59
Figura 17	Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y la edad de la forestación en plantaciones de <i>Pinus</i> spp. y <i>Eucalyptus</i> spp. en la región forestal del NOA.	61
Figura 18	Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y las variables que conforman el modelo combinado (backward selection procedure) de plantaciones de <i>Pinus</i> spp. y <i>Eucalyptus</i> spp. en la región forestal del NOA.	62
Figura 19	Relación entre la cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo y la edad de la forestación en plantaciones de <i>Pinus</i> spp. y <i>Eucalyptus</i> spp. en la región forestal Pampeana.	66
Figura 20	Relación entre la cantidad de COS en los primeros 30 cm en relación con la Temperatura media anual (bio01 de Wordclim) y el contenido de arcilla del suelo.	67
Figura 21	Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y la edad de la forestación en plantaciones de <i>Populus</i> spp., <i>Salix</i> spp. y <i>Eucalyptus</i> spp. en la región forestal de Delta del Paraná.	68
Figura 22	Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y las variables que conforman el modelo combinado (backward selection procedure) de plantaciones de <i>Pinus ponderosa</i> en la región forestal de la Patagonia.	72

1.- RESUMEN EJECUTIVO

Se analizó la cantidad de carbono orgánico del suelo (COS) a 0-30 cm de profundidad de las plantaciones forestales del país en un esfuerzo conjunto entre los técnicos de la Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial (DNDFI -MAGyP) y el Programa Nacional Forestales (PNFOR) del INTA.

Se generó una base de datos de COS con 862 casos, de los cuales 321 corresponden a plantaciones forestales, 356 a líneas base (sistemas naturales usados como referencia) y 185 referidos a usos alternativos del suelo (usos productivos no forestales). De los datos de COS de forestaciones, 106 correspondieron a plantaciones con *Eucalyptus* spp., 167 de *Pinus* spp., 24 de *Populus* spp., 10 de *Salix* spp. y 13 casos con especies forestales nativas.

En el caso de las plantaciones forestales, se observa una gradación de mayor a menor cantidad promedio de COS en el sentido: *Pinus* spp. y plantación con nativas > *Eucalyptus* spp. y *Salix* spp. > *Populus* spp.

Se analizaron los datos de COS y su variación según el uso de la tierra (línea base o de referencia, plantaciones forestales y uso alternativo de otros cultivos) teniendo en cuenta las ecorregiones de Argentina. Por ejemplo, en la *Selva Paranaense* con valores de COS de la línea base más altos (aprox. 71 Mg/ha), no se encontraron diferencias significativas en el COS comparando los usos del suelo y las clases de uso. En contraste, en el *Chaco Húmedo* la mayor cantidad de COS se observó en la línea base (aprox. 74 Mg/ha), seguido de las plantaciones forestales (aprox. 62 Mg/ha) y con un menor valor, el uso alternativo productivo (aprox. 54 Mg/ha).

Se observó una tendencia a que el COS promedio varíe en el sentido: forestaciones > línea base > uso alternativo.

Las plantaciones con *Pinus* spp. mostraron ser más eficientes en acumular COS que las realizadas con *Eucalyptus* spp., sobre todo en las ecorregiones que presentaron valores medios de COS.

Para cada región forestal descrita para Argentina se determinaron ecuaciones que permiten estimar el COS en base a una o a múltiples variables ambientales (temperatura, precipitación, contenido de arcilla en el suelo) y de manejo silvícola (género y edad de la plantación). En general, si bien cada región tiene sus particularidades, se destacan la temperatura media anual, precipitación media anual y algunos indicadores climáticos relacionados con su distribución anual y el % de arcilla en el suelo.

Desde el punto de vista del manejo silvícola, se determinó un aumento progresivo de la cantidad almacenada de COS con la edad de la plantación, excepto en las plantaciones con *Pinus* spp. de la región pampeana. Dada las pérdidas de COS en el establecimiento de la plantación, el tiempo necesario para poder balancear estas pérdidas excede a los tiempos esperados de una rotación para cada región.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de reforzar la intensidad de muestreo para obtener una base de datos más robusta y poder establecer conclusiones más claras en algunas regiones. Además, se observa la necesidad de cuantificar a nivel de sitio variables accesorias que explican el contenido de COS, como la textura.

Se recomienda, a partir de esta información y experiencia, establecer una estrategia de monitoreo que permita cuantificar el estado y la evolución de las reservas de COS en suelos con plantaciones forestales, a escala nacional.

Definir un esquema de monitoreo del COS del suelo se torna indispensable para diseñar, evaluar y promover políticas de secuestro de C atendiendo tanto a las posibles respuestas productivas como así también, cumpliendo con los objetivos de reducción de emisiones de GEI a nivel nacional. Se recomienda hacer foco en las plantaciones forestales haciendo coincidir los muestreos de suelos con las campañas de mediciones de parcelas de inventario forestal que dispone la DNDFI del MAGyP, tomando como base una frecuencia de 1 dato cada 10 años. Se deberían priorizar los muestreos en suelos forestales en las regiones o cuencas en donde hay poca base de dato (por ejemplo, región chaqueña y delta del Paraná) para, en segundo lugar, establecer sitios testigos en todas las regiones buscando establecer esta evolución de los suelos forestales.

2.-OBJETIVO DEL RELEVAMIENTO

Este relevamiento nacional tuvo como objetivo cuantificar la cantidad de carbono orgánico del suelo (COS) en los primeros 30 cm de suelo de plantaciones forestales establecidas en diferentes ambientes de la Argentina. Además, se comparó estos parámetros con la vegetación natural (línea de base o de referencia) y un uso de la tierra alternativo representativo de cada ambiente, así como establecer el efecto de variables ambientales y silvícolas sobre la magnitud de este servicio ambiental.

3.-MARCO GENERAL DEL RELEVAMIENTO NACIONAL

Si bien las plantaciones forestales poseen un objetivo claramente productivo (generar biomasa para distintos tipos de industrias), también se encuentra ampliamente valorado la prestación de numerosos servicios ecosistémicos, entre ellos, la capacidad de secuestrar gases de efecto invernadero (GEI). Así, se ha tomado en cuenta la capacidad de los sistemas forestales de almacenar carbono (C) tanto en biomasa como en compuestos orgánicos del suelo, para desarrollar políticas que favorezcan la instalación de plantaciones con el propósito de mitigar emisiones de GEI. En este marco, en el último Informe Bienal de Actualización a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (MAyDS 2021) nuestro país estimó las variaciones de materia orgánica del suelo con un nivel 2 de cálculo utilizando un factor de emisión de CO₂, o valor por defecto, brindado por las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC). Más allá de la mitigación de los GEI, el C del suelo juega un rol importante manteniendo la calidad del mismo y por lo tanto, sus pérdidas afectan directamente la productividad primaria del sitio.

Este trabajo surge a partir de un acuerdo entre la Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-Industrial (DNDFI -MAGyP) y el Programa Nacional Forestales (PNFOR-INTA) frente a la necesidad de conocer las reservas de COS bajo cobertura de plantaciones forestales y los cambios en las existencias de COS en relación con otros usos del suelo en las diferentes regiones forestales del país.

Para el desarrollo del presente relevamiento intervinieron profesionales de la DNDFI de diferentes regiones del país, de INTA con sedes en diferentes Estaciones Experimentales Agropecuarias, de diversas Facultades, del Consejo Nacional de Investigaciones

Científicas y Técnicas (CONICET), y profesionales de gobiernos provinciales.

Este acuerdo se constituyó en la primera acción de trabajo conjunto con este objetivo, concebida, planificada y ejecutada de manera colaborativa e interinstitucional en el ámbito público del sector forestal nacional (INTA-MAGyP). La información que se analiza y brinda en este documento proviene de un relevamiento en campo que se fortaleció con información de estudios previos publicados en revistas científicas y datos no publicados cedidos por investigadores y docentes de Universidades y otras instituciones. Esto, además de fortalecer la base de datos a analizar, permitió consolidar información previa dispersa.

Además de cuantificar las reservas de COS se buscó determinar el peso relativo de factores o variables ambientales y de manejo forestal que determinan la magnitud de este servicio ambiental en distintas regiones forestales del país. Esto permitirá aumentar la precisión en la estimación de las reservas de COS de forestaciones situadas en diferentes condiciones ambientales.

Para llegar al presente producto se transitaron varias etapas: 1) Acuerdo del objetivo del relevamiento, y definición de las regiones y especies a muestrear. 2) Elaboración de un protocolo de relevamiento de campo. 3) Conformación de equipos de trabajo regionales, 4) Relevamiento de muestras y análisis de laboratorio, y 5) Verificación y depuración de datos y elaboración de informes.

3.1.- La importancia del carbono orgánico del suelo

El suelo es un componente importante de los sistemas productivos, con características intrínsecas particulares asociados a los ambientes donde evolucionan, pero con una naturaleza dinámica en su salud según el uso y el manejo silvícola que se aplique. Son la base para la producción de alimentos, fibras y muchos servicios ecosistémicos esenciales. Además, el suelo representa uno de los recursos clave para la mitigación y adaptación al cambio climático por su capacidad de almacenar compuestos carbonados tanto orgánicos como inorgánicos.

El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente muy dinámico y clave para el funcionamiento de los ecosistemas (productivos o conservados) y servicios ecosistémicos que pueden brindar. La magnitud del carbono (C) almacenado en el suelo, analizado de manera global, supera ampliamente al acumulado en la atmósfera y en la biomasa vegetal (Schlesinger, 1997). El C es el principal componente de la materia orgánica (MOS) del suelo y está correlacionado con muchas propiedades edáficas asociadas a la regulación de la productividad y del ciclo del C en el sistema suelo-atmósfera. Es por ello que se toma generalmente a la MOS o al COS como indicadores de la salud del suelo y del secuestro del C atmosférico.

Entre los beneficios de la MOS podemos mencionar:

Reserva de nutrientes: los suelos con alto contenido de C se asocian a un mayor contenido de nutrientes, promoviendo el crecimiento de los cultivos. Alrededor del 99% del nitrógeno (N) del suelo se encuentra en la materia orgánica edáfica. Además, la MOS proporciona gran parte de la capacidad de intercambio catiónico esencial para la retención y disponibilidad de los nutrientes para las raíces de las plantas (Bhon et al. 1993).

Mejora la estructura del suelo: la MOS une partículas y agregados del suelo y le otorga estabilidad lo que reduce la erosión. También favorece la formación de un espacio poroso equilibrado permitiendo un adecuado ingreso de agua al, (recarga del perfil para los

cultivos), intercambio de aire con la atmósfera y facilita el crecimiento de las raíces para explorar el perfil y acceder al agua y a los nutrientes.

Actúa como un gran almacén de C: a través de mecanismos de estabilización de la MOS, el suelo se constituye en un importante reservorio de C. La aplicación de prácticas de manejo de suelos adecuadas que permitan aumentar las reservas de COS puede contribuir a compensar las emisiones antropogénicas de C. Este C se almacena en el suelo asociado de manera física o química a ciertos minerales, lo que le otorga altos tiempos de recambio, o de manera particulada, cuyo tiempo de vida dependerá de la velocidad de degradación de dicho material.

Promueve una mejora en el secuestro de C de las plantas: una mejora en la fertilidad del suelo (aumentando disponibilidad de nutrientes y agua) promueve un mayor crecimiento de los sistemas productivos, lo que puede conducir a una mayor captación/absorción de CO₂ atmosférico.

Aumentar el almacenamiento de agua del ecosistema: tanto de manera indirecta al mejorar la estructura del suelo, como directa a través de diversos mecanismos asociados a una mayor adsorción, el aumento de los niveles de MOS incrementa la cantidad de agua que puede ser retenida en el mismo (particularmente en los horizontes superficiales) y se reduce las pérdidas por evaporación y escurrimiento superficial.

Filtrado del agua: La materia orgánica juega un papel importante en la reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la purificación del agua para uso humano.

Filtrado de compuestos potencialmente contaminantes. Al influir sobre la biodisponibilidad y la movilidad de diferentes compuestos potencialmente tóxicos, la MOS contribuye a retener contaminantes de productos químicos o derrames de sustancias tóxicas.

3.2.- La importancia del monitoreo del carbono orgánico del suelo

Los suelos tienen una capacidad de almacenamiento de COS que depende de diversos factores, entre ellos sus características intrínsecas (por ejemplo, el contenido de arcilla y los minerales presentes) y el ambiente donde evolucionan (por ejemplo, la temperatura o su estacionalidad). Esta capacidad de almacenamiento puede ser modificada con el cambio de uso de la tierra, la puesta en producción (agrícola, forestal, etc) y la implementación de diferentes estrategias de manejo de suelos, cambiando la dirección de los flujos de C en el sistema suelo-atmósfera. De esta manera, cuantificar el COS es el primer paso para dimensionar las reservas de un suelo y tomar decisiones sobre cómo mejorar el secuestro de C y/o reducir su pérdida, analizando la respuesta de los ecosistemas ante cambios ambientales como producto de la variación climática o ante decisiones relacionadas con el manejo. De esta manera, definir un esquema de monitoreo del C del suelo se torna indispensable para diseñar, evaluar y promover estrategias o políticas de secuestro de C atendiendo tanto a las posibles respuestas productivas como así también, cumpliendo con los objetivos de reducción de emisiones de GEI a nivel nacional (p. ej., contribuciones determinadas a nivel nacional)

3.3.- Alcance y usuarios de la información contenida en el documento

Este documento constituye una referencia para organismos gubernamentales, instituciones de I&D+i, sector productivo, certificadoras y ONG del sector forestal a escalas local, regional

o nacional. A partir de los resultados obtenidos, Argentina mejorará la información disponible sobre las reservas de C de los suelos con plantaciones forestales. Esta información es necesaria en virtud de los acuerdos internacionales (ej., Acuerdo de París) sobre cambio climático y manejo forestal sostenible que ha adherido nuestro país. Además, el estudio de las relaciones con los factores ambientales asociados con la acumulación de COS en diferentes usos del suelo permitirá estimar la dirección de los cambios en las reservas de COS, información importante para empresas, productores y tomadores de decisiones.

Somos conscientes que la intensidad de relevamiento fue variable según las regiones forestales y los ambientes en cada región, lo cual determina diferentes grados de precisión. Sin embargo, aquí podrá encontrar de manera consolidada, una primera aproximación sobre las reservas de COS en plantaciones forestales en diferentes regiones forestales del país con una explicación sobre cuáles son los factores que mayor peso tienen sobre la magnitud del secuestro de COS en cada ambiente. Como otro producto, queda disponible una base de datos en donde se consolidó toda la información recabada en el campo, las publicaciones y las distintas fuentes de información sobre variables ambientales.

Este documento pretende sentar las bases para definir futuras evaluaciones o una estrategia de monitoreo, y de esta manera, avanzar a un esquema nacional de monitoreo de COS en suelos forestales. También se brindan reflexiones sobre la necesidad de mejoras, incertidumbres y otras lecciones aprendidas. Sin duda este informe representa el puntapié inicial para decisores políticos y organizaciones sectoriales.

4.- PERFIL AMBIENTAL Y PRODUCTIVO DE ARGENTINA

4.1.- Ecorregiones de Argentina

La Argentina posee una enorme extensión territorial, con un amplio rango de climas, geomorfologías y suelos, lo cual determina la existencia de una gran variedad de ecosistemas naturales y condiciones favorables para el desarrollo de las actividades primarias como la agricultura, la ganadería y la producción forestal, entre otras. En este marco, la Argentina posee 18 ecorregiones, las que fueron definidas siguiendo distintos criterios en el trabajo de Burkart et al. (1999). Allí se describe a una ecorregión como “un territorio geográficamente definido en el que dominan determinadas condiciones geomorfológicas y climáticas relativamente uniformes o recurrentes, caracterizado por una fisonomía vegetal de comunidades naturales y seminaturales que comparten un grupo considerable de especies dominantes, una dinámica y condiciones ecológicas generales y cuyas interacciones son indispensables para la persistencia a largo plazo”. De esta manera, el uso de ecorregiones permite analizar, en este caso, la capacidad de las forestaciones de acumular COS al homogeneizar las condiciones ambientales inherentes a cada una. Así, en este relevamiento se han determinado la presencia de forestaciones en 12 ecorregiones, las que presentan las siguientes características (según Burkart et al. 1999; Figura 7):

Selva Paranaense: Meseta basáltica con drenaje bien marcado y que ocupa casi toda la provincia de Misiones. Clima cálido y húmedo. La PMA varía de 2000 mm al NE a 1600 mm en su porción SO, presentando una buena distribución durante todo el año. La TMA es de 20°C. Presenta una densa cobertura de selva subtropical húmeda semi-decidua conformada por 4-5 estratos verticales.

Esteros del Iberá: Gran cubeta hidromórfica con pendiente hacia el SO, ubicada en el centro norte de la provincia de Corrientes. Los diversos esteros se separan por cordones arenosos de mayor altura que el entorno del paisaje. Mientras que en los esteros se presentan diversas poblaciones de herbáceas, los cordones arenosos presentan especies de la selva paranaense.

Campos y Malezales: Vastos pastizales y pajonales de llanuras en contacto con la Selva Paranaense, que ocupan la porción SO de Misiones y E. de Corrientes. Clima subtropical con lluvias distribuidas uniformemente en el año (TMA de 1500 mm). Aparecen bosques en galería siguiendo los cursos de agua o formando isletas, pasando a una fisonomía de pajonales casi puros al sur.

Yungas: Sector montañoso vinculado con la Cordillera de los Andes de distribución discontinua conocida también como Selva Tucumano-Oranense. Abarca las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán y Catamarca. Clima cálido y húmedo a subhúmedo que varía fuertemente según altitud, posición en el relieve y exposición de las laderas que determina el tipo de vegetación presente. Varía entre los 400 y 3000 msnm. La precipitación media anual (PMA) es de 900-1000 mm y se concentran en verano. Cobertura de bosque espeso, sobre todo en el pedemonte y en las laderas orientales, con presencia de pastizales en las zonas de mayor altura en donde se verifican las menores temperaturas.

Chaco Seco: Vasta planicie con suave pendiente hacia el este, con algunas interrupciones serranas hacia el sur, y se extiende en la parte occidental de Formosa y Chaco, Santiago del Estero, Santa Fe, Córdoba y sectores de Catamarca, La Rioja y San Luis. Suelos tipo loésicos con importantes procesos de origen aluvial y fluvial. Hacia el norte se encuentran suelos ricos en nutrientes con textura medias y finas, mientras que hacia el centro y SO predominan suelos con texturas más gruesas y escasa materia orgánica. Clima continental, subtropical cálido. La temperatura media anual (TMA) es mayor al norte que al sur (de 23 a 18°C) con áreas en donde se presentan picos extremos de temperatura en verano. La PMA varía entre los 500 y 700 mm (más seco hacia el SO) y son marcadamente estivales. Cobertura de bosque xerófilo, con presencia de sabanas y pastizales.

Chaco Húmedo: Planicie con una pendiente muy suave hacia el este, ocupando la porción oriental de Formosa y Chaco, NO de Corrientes y N de Santa Fe. Clima subtropical cálido. La TMA varía de norte a sur (de 23 a 18°C). La TMA es mayor al este (1300 mm) y disminuye hacia el oeste (750 mm) con un régimen estival. Se observan bosques más diversos que en el Chaco árido y se ubican en las zonas con mejores drenajes, mientras que en los bajos que presentan distinto grado de anegamiento se forman esteros y cañadas con fisonomías de pastizal, sabanas, palmares y pajonal.

Espinal: Se caracteriza por ser una llanura predominantemente plana a suavemente ondulada, que se extiende rodeando la región de la Pampa en su límite norte, oeste y sur. El clima es cálido y húmedo en el norte y templado y seco con marcado déficit hídrico al oeste y sur. Hacia el NO. De la ecorregión los suelos, de origen loésicos, son arcillosos e imperfectamente drenados. Hacia el centro-oeste y sur de la región muestran texturas más gruesas, con escasa materia orgánica. En la porción sur se destaca la presencia de capas petrocálcicas y zonas medanosas. Dada esta variación ambiental, se puede dividir en tres subregiones: Espinal del Ñandubay al norte, de los Algarrobos en el centro y del Caldén en la porción sur. En general son bosques xerofíticos bajos, densos o abiertos, pero de un sólo estrato, alternando con sabanas y pastizales.

Pampa: Extensa llanura con presencia de cordones serranos en su porción sur. Ocupa casi toda la provincia de Buenos Aires, NE de La Pampa y S de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos. Clima templado húmedo a subhúmedo, con veranos cálidos. Las lluvias se distribuyen durante todo el año y varían de 1100 a 600 mm/año desde el NE al SO, respectivamente. La TMA varía de 18 a 15°C en su porción norte y sur, respectivamente. Los sedimentos superficiales muestran una variación en el sentido SO a NE, pasando de texturas más arenosas a más finas (limos y arcillas típicas del loess pampeano). Hacia el sur se destaca la aparición de las Sierras de Tandilia y Ventania que alcanzan alturas de entre 500 a 1000 msnm. De acuerdo a estas variaciones ambientales se reconocen 6 subregiones: Pampa Ondulada, Pampa Entrerriana, Pampa Deprimida, Pampa Medanosa o del Interior, Sierras Bonaerense y Pampa Austral. La formación vegetal originaria es la de un pastizal templado.

Delta e islas del Paraná: Islas bajas e inundables en los valles de inundación de los ríos Paraná, Paraguay y de la Plata. Sus rasgos no se corresponden con el clima y la geología de la zona que atraviesa dado el peso modelador de los ríos. Como resultado de la presencia de los cuerpos de agua, la zona es muy húmeda con escasa presencia de valores extremos diarios y estacionales de temperatura. Se observan bosques y arbustales sobre los albardones o porciones del terreno ubicados, generalmente, en el borde de las islas. Estos albardones están compuestos por sedimentos gruesos y presentan una mayor altura que el centro, en donde se observan pajonales y pastizales. Estos ambientes ubicados en los interiores de las islas suelen tener distinto grado de anegamiento.

Monte de Llanuras y Meseta: Paisaje de llanuras y extensas mesetas escalonadas que se extiende al E. de la Cordillera de los Andes en Mendoza y Neuquén, se extiende por La Pampa y llega a la costa del Océano Atlántico en Río Negro y NE de Chubut. Clima templado árido con escasas precipitaciones entorno a los 100 mm, llegando ocasionalmente, a los 200 mm. Muestran una distribución más uniforme a lo largo del año en su región norte y una mayor concentración en invierno al sur. La TMA ronda entre 10 y 14°C. La vegetación relativamente pobre en comunidades y especies, con reducción de presencia de *Prosopis* spp. hacia el sur quedando una cobertura de arbustos (jarillales y retamales).

Estepa Patagónica: Presenta un relieve de mesetas escalonadas, montañas y colinas erosionadas, con alturas superiores a los 1000 m en su extremo oeste, sobre la Cordillera de los Andes. Clima frío y seco con PMA menores a los 250 mm mostrando un gradiente oeste-este. La TMA fluctúa entre 14 y 10°C en su parte norte. La vegetación se presenta como matorrales achaparrados, con arbustos bajos, una cobertura de herbáceas y presencia de suelo desnudo. Presentan algunos valles en donde se acumula el agua y se observan cursos permanentes o semipermanentes. Estas zonas se denominan mallines, los que presentan suelos con fuertes rasgos hidromórficos y cuya productividad herbácea es muy superior a las áreas de secano circundantes.

Bosques Patagónicos: Estrecha franja sobre la falda este de la Cordillera de los Andes. Presenta un paisaje de montañas quebradas, llegando a alturas mayores de los 3000 m.s.n.m. Clima templado frío y húmedo, con precipitaciones concentradas en invierno en forma de lluvia o nieve. La formación vegetal es el bosque templado húmedo semidecídulo que alterna con arbustales dependiendo de las limitaciones ambientales.

4.2- Perfil productivo del sector agrícola y forestal

El sector agropecuario y agroindustrial es el principal generador de divisas en nuestro país, lidera la balanza comercial y además, en conjunto producen los aportes más significativos

al PBI nacional (Calzada y Treboux, 2019), destacándose la inserción de sectores exportadores en las cadenas regionales y globales de valor. Las principales producciones primarias se relacionan con el cultivo de especies de oleaginosas y cereales, aunque desde una perspectiva regional, se pueden identificar complejos y sectores productivos de fuerte anclaje territorial e importancia económica local.

En cuanto al sector forestal, en Argentina hay alrededor de 20 millones de hectáreas de tierras con aptitud forestal (FAO 2020a). De acuerdo al Ministerio de Hacienda de la Nación (2019) actualmente existen alrededor de 1,3 millones de hectáreas forestadas (Tabla 1), siendo esto un indicador del enorme potencial para la captura de carbono mediante la forestación. A nivel nacional, existe una activa política de promoción de las plantaciones forestales, a la que se suman una serie de herramientas provinciales. Así, a nivel nacional podemos mencionar la Ley 25.080, y sus prórrogas correspondientes, las cuales buscan generar incentivos para la inversión en proyectos foresto-industriales. De manera resumida, esta legislación fomenta las plantaciones mediante aportes económicos estatales no reintegrable de los costos de plantación, y para tareas de poda, raleo y manejo de rebrotes, así como el otorgamiento de beneficios fiscales. La región mesopotámica, la patagónica y la del delta del Paraná son las zonas que han alcanzado mayor desarrollo forestal (la suma de estas tres regiones representa el 92% de la superficie total plantada). A nivel nacional, el cultivo más extendido es el de coníferas (65%), y en su mayoría del género *Pinus* spp. (Tabla 1). De manera reciente, la Dirección Nacional Foresto Industrial publicó en su portal¹ que el 61,3% de las plantaciones forestales del país se han realizado con *Pinus* spp. (la mayor proporción se realizó con *P. taeda*, 35% del total plantado con *Pinus* spp.), seguida por un 26,6% de *Eucalyptus* spp. (la mayor proporción se realizó con *E. grandis*, 51%). En tercer lugar, en cuanto a la superficie plantada, se encuentran los sauces y álamos (6% de la superficie a nivel nacional) en donde un 34% de esa superficie se encuentra plantada con álamos (*Populus* spp) y un 33% de sauces (*Salix* spp.). Las plantaciones con especies nativas ocupan un 2,5% de la superficie total forestada (33.577 ha) siendo las especies más plantadas la *Araucaria angustifolia* (14.005 ha) y *Prosopis* spp. (*P. alba* y otros no determinados con 13.749 ha). Entre ambos cubren el 83% de la superficie total plantadas con nativas.

Tabla 1: Área forestada (ha) por provincia y grupo de especies.

Provincias	Coníferas	Eucaliptos	Salicáceas	Otras	Total	%
Corrientes	345965	121857	--	6161	473983	36
Misiones	348305	40902	--	16617	405824	31
Entre Ríos	14156	112785	23279	577	150797	11
Buenos Aires	4027	7818	65091	78	77014	6
Patagonia	109031	--	1744	--	110775	8
Noroeste	5404	15875	114	3654	25047	2
Centro	34172	14632	1602	2520	52916	4
Cuyo	--	--	8015	--	8015	1
Resto	290	--	--	13122	13412	1
Total	861350	13869	99845	42729	1317793	100

Fuente: Ministerio de Hacienda (2019).

Argentina cuenta con una superficie de bosques nativos que alcanza los 53,6 millones de hectáreas. La amplia variedad de clima, geomorfología y suelos determina la existencia de una gran variedad de ecosistemas forestales naturales, desde selvas subtropicales hasta bosques subantárticos. Estos bosques brindan diferentes servicios ecosistémicos. Sin embargo, existe una pérdida de cobertura forestal de los bosques nativos asociada a factores naturales y antrópicos (Peri et al. 2021) entre los cuales pueden mencionarse:

¹ <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php> ; Junio/2022

- la expansión de la frontera agrícola;
- los incendios forestales;
- el sobrepastoreo;
- la sobreexplotación de los recursos forestales;
- la aplicación deficiente de la legislación;
- falencias en el control de las intervenciones.

4.3.- Regiones forestales de Argentina y sus características productivas

Argentina presenta unas siete regiones forestales (Figuras 2 y 3) distribuidas principalmente en las Ecorregiones del centro y norte de la Argentina. Algunas de dichas regiones forestales se incluyen dentro de una Ecorregión, mientras que otras comprenden varias ecorregiones a la vez. La generación de una región forestal se debe a la interacción entre las condiciones ambientales necesarias para generar cultivos rentables de una o varias especies, sumado a la competencia por el uso de la tierra con otras actividades productivas y por la propia capacidad foresto-industrial presente en la región. Esta misma interacción entre las características ambientales (clima y suelos) y culturales (actividades productivas, industrias instaladas) determinan el tipo y magnitud del manejo silvícola. En general, este último está relacionado con el objetivo productivo de la plantación forestal, encontrando sistemas cuyo principal valor es el de proveer servicios (por ej. cortinas forestales o montes de reparo) y otros en los que se busca es la producción de bienes que posean una determinada calidad industrial (por ejemplo, biomasa para uso energético o para proveer de materia prima a la industria celulósica, o fustes rectos y madera libre de nudos para la industria del aserrío o del debobinado). Esta heterogeneidad entre regiones puede ser descripta de manera breve con el objetivo de cumplir con los objetivos presentados en el presente informe. Más información al respecto puede encontrarse en Galarco y Ramilo (2019) así como en las direcciones web indicadas en el texto en donde los Técnicos Regionales de la Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-industrial de la Nación describen aspectos técnicos de cada región forestal.

Mesopotámica: Abarca las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos y se caracteriza por su activa producción forestal y por concentrar el mayor número de plantas de procesamiento del complejo celulósico- papelerero, la industria de aserrío y elaboración de la madera a nivel nacional. Esta zona está comprendida entre los ríos Paraná y Uruguay en el noreste del país. En Misiones y Corrientes resulta dominante la actividad foresto-industrial basada en la explotación de bosques cultivados de coníferas: *Pinus* spp. (*P. taeda* – principal especie cultivada-, *P. elliotii*, y el híbrido *P. elliotii* x *P. caribaea* var. *hondurensis*) y *Araucaria angustifolia* y con importante crecimiento el cultivo de *Eucalyptus* spp.. En el caso de los cultivos con *Pinus* spp., se prevén turnos de corta que varían de 18 a 22 años para *P. taeda* y *P.elliotti* x *caribaea* y de 20 a 25 para *P. elliotii*. En promedio, las tasas de crecimiento anual varían entre 15 y 25 m³/ha.año. Para el caso de los *Eucalyptus* spp. (*E. grandis* y sus híbridos *E. grandis* x *E. tereticornis* y *E. grandis* x *E. camaldulensis*, en mayor grado, seguido por *E. dunnii* y otras especies), se espera un turno de 12 a 14 años con tasas de crecimiento promedio de entre 25 y 35 m³/ha.año. En la región del E. de Entre Ríos y SE de Corrientes la especie más cultivada es *E. grandis*, seguida de *E. dunnii* y en menor escala, *P. taeda* y *P. elliotii*. En general, los turnos de cortas previstos para los *Eucalyptus* spp. varían de 8 a 14 años con tasas de crecimiento promedio de entre 25 y 40 m³/ha.año. En el caso de los *Pinus* spp. se prevén mayores turnos de cortas (de 18 a 25 años) y menores crecimientos promedio (15-25 m³/ha.año). El sistema predominante de toda la región es el de macizo forestal de producción. En cuanto a la preparación del sitio para la plantación se incluyen tareas de aplicación de herbicidas, apeo y pica de material leñoso remanente y pasadas de subsolador y/o rastras. Así, se esperan impactos sobre los

procesos naturales relacionados con la dinámica de recursos que se llevan adelante en los suelos. Para el caso de la región del NO y centro de Corrientes, se utilizan discos y/o rastras y/o la pasada de un subsolador en la línea de plantación, mientras que se realizan camellones o taipas en los sitios en donde puede acumularse agua luego de las precipitaciones. De acuerdo al destino de la plantación se utilizan densidades que van desde 833 a 1666 plantas/ha para *Pinus* spp y de 625 a 1600 plantas/ha para *Eucalyptus* spp. La intensidad de los tratamientos de poda y raleo dependerá del objetivo de plantación, siendo prácticas cada vez más frecuentes buscando generar madera libre de nudos. En este caso, se prevén unas tres intervenciones de podas y raleos durante el ciclo forestal.

Información complementaria en:

<http://neamisionesforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>

<http://neacorrientesforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>

<http://entrieriosforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>



Plantación de *P. taeda*



Plantación de *E. grandis*



Pastura



Pastizal



Cultivo leñoso



Cultivo herbáceo

Foto.1- Plantaciones de *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*, de un pastizal tomado como línea base y de varios usos alternativos de la región: cultivo leñoso (naranjas), cultivos herbáceos (soja) y una pastura en sitios situados en la Provincia de Entre Ríos (créditos: M. Flores Palenzona, DNDFI -MAGyP).

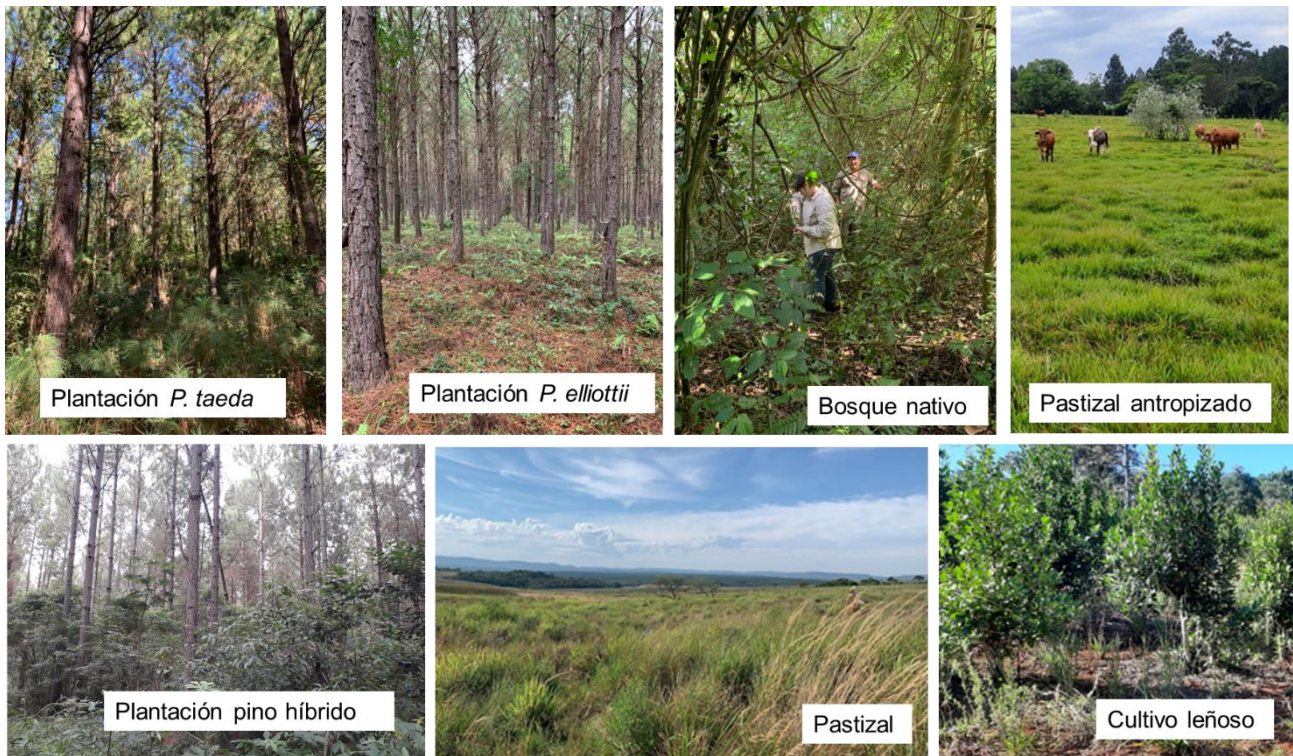


Foto 2.- Plantaciones de *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* y pino híbrido (*P. elliottii* x *caribaea*), de un pastizal y un bosque nativo tomado como línea base y de dos usos alternativos de la región: cultivo leñoso (yerba mate) y un pastizal antropizado (alta carga animal) situados en la Provincia de Misiones (créditos: M. D'Angelo, DNDFI - MAGyP).

NOA: Esta región está integrada por parte de las provincias de Jujuy, Salta y Tucumán y se encuentra contenida en las ecorregiones de las Yungas, el Chaco seco y la Puna. Presenta una gran diversidad ambiental ya que combina climas cálidos y húmedos con fríos y áridos, inherentes a las tres ecorregiones mencionadas. En la región con mayor relieve montañoso, correspondiente con las Yungas, se introdujeron forestaciones de *Eucalyptus* spp. (*E. grandis* y *E. saligna* en las zonas de menor altura, *E. dunnii* y *E. viminalis* en las zonas más altas y frías, y *E. camaldulensis* y *E. terticornis* en las exposiciones más cálidas y secas) y *Pinus* spp. (*P. taeda* y *P. elliottii* hasta los 1200 msnm, y *P. patula* por encima de dicho rango). La mayor superficie plantada con estas especies es en forma de macizos, aunque también se encuentran cortinas forestales y enriquecimiento de bosque nativo en fajas o bosquetes. En cuanto a los turnos de corta, claramente los *Eucalyptus* spp. muestran menores períodos de tiempo (8-14 años para los blancos 14-20 años para los colorados) que los *Pinus* spp. (de 20 a 25 años). Las tasas de crecimiento promedio son relativamente mayores en *Eucalyptus* spp. (20 a 30 m³/ha.año para los blancos y 15-20 m³/ha.año para los colorados) que en *Pinus* spp. (15 a 20 m³/ha.año para *P. elliotti* contra 20 a 30 m³/ha.año para *P. taeda* y *P. patula*). A mediados del siglo pasado las plantaciones se realizaron en sitios de bosque nativo desmontado, mientras que las más modernas se realizaron en sitios previamente forestados o bajo otros usos del suelo. En general, las plantaciones de *Pinus* spp. se realizan en sitios con menos suelo desarrollado y/o con afloramientos rocosos y mayor pendiente, por lo que el trabajo con maquinarias se ve comprometido. Así, dependiendo el relieve, se realizan desde disqueadas y/o subsolados a la realización del hoyo de plantación de manera manual para preparar el terreno. Algo similar ocurre con el combate de malezas, ya que se realiza mediante aplicaciones químicas o incluso, mediante carpidas a mano. La densidad de plantación depende del objetivo productivo, llegando hasta 1100 en el caso de *Eucalyptus* spp. y hasta 2200 plantas/ha para *Pinus* spp. para las

plantaciones con destino celulósico y/o energético, macizos a los que no se le realizan prácticas de manejo silvícolas. En el caso de producir madera para aserrío, la densidad de plantación ronda las 830 plantas/ha y en estos casos, se promueven hasta 3 intervenciones de podas y raleos alcanzando densidades finales de 200-300 plantas/ha.

Información complementaria en:

<http://noaforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>



Foto 3.- Plantación de *Pinus taeda*, de bosque nativo de la línea base y de un cultivo herbáceo perteneciente al uso de la tierra alternativo y de un pastizal antropizado en sitios situados en la Provincia de Salta (créditos: A. Giacobbi, DNDFI -MAGyP).



Foto 4.- Plantación de *Pinus taeda*, de bosque nativo de la línea base y de un cultivo herbáceo perteneciente al uso de la tierra alternativo (caña de azúcar) situados en la Provincia de Tucumán (créditos: M. Feyling Montero, DNDFI -MAGyP).

Centro norte: La región centro norte está comprendida por las provincias de Chaco, Santiago del Estero, Formosa y Córdoba. Comprende las ecorregiones Chaco seco, Chaco húmedo y, parcialmente, el Espinal. Son escasos los bosques cultivados con especies exóticas y actualmente se presenta un fuerte apoyo a la plantación con el género *Prosopis*. En la zona serrana de provincia de Córdoba se establecieron macizos forestales con *P. elliotii* y *P. taeda*, en mayor grado, en los faldeos orientales de las sierras grandes. En áreas extra-serranas es posible encontrar cortinas y montes de reparo de diversas especies de *Eucalyptus* spp. (*E. camaldulensis*, *E. viminalis* y *E. dunnii*). Se espera menores turnos de corta de los *Eucalyptus* spp. que para *Pinus* spp. (15-20 y 20–30 años, respectivamente), básicamente influenciado por las diferencias en las tasas promedio de crecimiento (20-25 y 15-25 m³/ha.año para *Eucalyptus* spp. y *Pinus* spp., respectivamente). La densidad de plantación varía desde 1100 plantas/ha en los macizos a 660 o 400 plantas/ha en sistemas mixtos silvopastoriles y en plantaciones con *Prosopis* spp. (*P. alba*, algarrobo). En el caso de los *Prosopis* spp. se espera que el turno de corta ronde los 40 o más años, dependiendo el objetivo de producción. En general, las plantaciones de mayor edad carecen de manejo silvícola, observándose en algunos sitios intervenciones relacionadas con raleos sanitarios o por lo bajo (árboles de menor desarrollo). Se han incorporado algunas prácticas silvícolas en las plantaciones de menor edad buscando obtener madera para aserrío. Estas forestaciones suelen reemplazar pastizales (tanto en la zona extra-serrana como en la serrana en aquellos sitios de mayor altura) o vegetación leñosa en la zona serrana. En general, en estos ambientes la preparación del terreno se realiza de manera manual y puntual (uso de herbicida rodeando el hoyo de plantación). Para el caso del parque Chaqueño, la preparación del terreno se realiza de manera mecanizada incluyendo las tareas de desmonte, preparación de suelo (rastreado doble con rastra pesado) y aplicación de herbicidas y arbusticidas.

Información complementaria en:

<http://cordobaforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>

http://chaco-forestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica_20.html



Foto 5.- Plantaciones de *Pinus elliottii* (en zona de llanura a la izquierda y en las sierras a la derecha) y de las clases de uso alternativo (maíz) y pastizal de la línea base en la Provincia de Córdoba (créditos: E. Zupan, DNDFI -MAGyP).

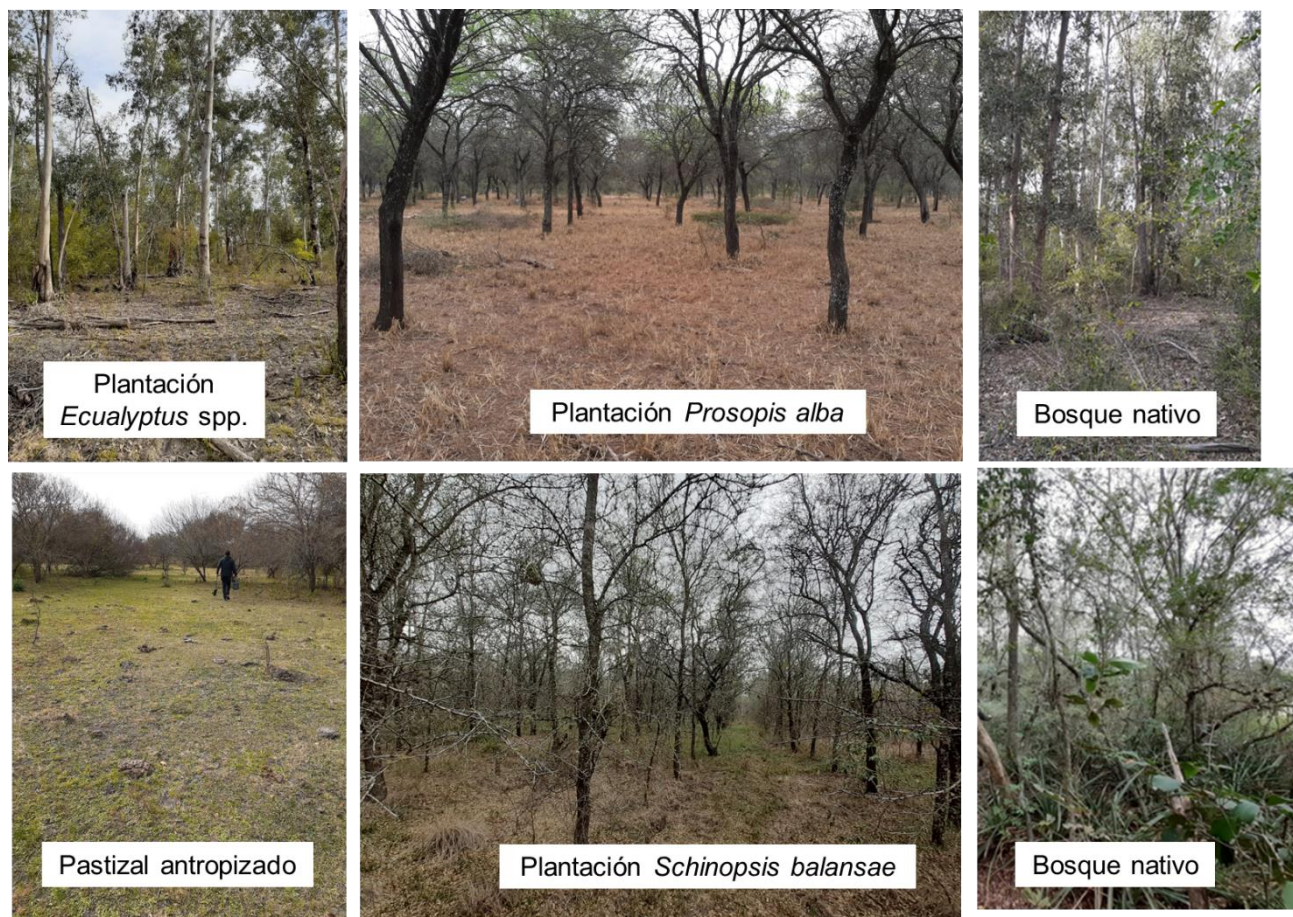


Foto 6.- Plantaciones de *Eucalyptus* spp. (híbrido) y especies nativas (*P. alba* y *S. balansae*), pastizal antropizado (uso alternativo) y ejemplos de bosque nativo de la línea base en la Provincia de Chaco (Créditos: L. Vera, DNDFI -MAGyP).

Pampeana: Comprende la totalidad de la provincia de Buenos Aires, a excepción del Delta Bonaerense, y parte de la provincia de Santa Fe y el este de Córdoba. Esta región está contenida dentro de la ecorregión Pampa y Espinal. Cuenta con la infraestructura de comunicaciones y transporte más desarrollada, así como reúne la mayor concentración poblacional del país. El área metropolitana de Buenos Aires (CABA más una serie de partidos de la Prov. de Buenos Aires situados a su alrededor) posee una importante industria instalada de transformación de la madera (industria del triturado, celulósica y de tableros, del aserrado, de transformación secundaria y del mueble, de debobinado e impregnadoras). Esta región presenta ambientes propicios para el desarrollo de varias especies forestales en tierras cuyas características resultan marginales o no aptas para la agricultura, o bien mediante el desarrollo de sistemas agroforestales. Existe una concentración de la actividad forestal en el NE Buenos Aires y Santa Fe, asociadas a las industrias celulósicas y de tableros que consumen, principalmente, madera triturada de *Eucalyptus* spp. En mayor medida se han plantado *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. dunnii*, *E. viminalis* y los híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis* y *E. grandis* x *E. tereticornis*. En promedio, los turnos de corta comprenden períodos de entre 8 y 18 años, con crecimientos promedio de entre 16 y 35 m³/ha.año. En general, las densidades de

plantación son altas (de 1111 a 1666 plantas/ha). De manera más extendida se han realizado plantaciones para brindar servicios como barreras cortavientos y montes de reparo. Una menor proporción de las forestaciones modernas se realizan buscando generar madera para aserrío. En general, dado el destino de las forestaciones, no se practican tareas silvícolas de podas y raleos, aunque en el caso de *Eucalyptus* spp., suele manejarse el rebrote que se produce luego de la tala rasa (sistema de monte bajo). Existen forestaciones con salicáceas (*Salix* spp. y *Populus* spp.) manejados bajo el sistema de monte bajo con tala rasa a la llegada del turno (de 8 a 12 en caso de *Salix* spp.) y mediante replantación entre tocones luego de la tala rasa (en general practicada luego de 12 a 16 años para *Populus* spp.), ambas con el mismo destino de triturado. En el SE de Buenos Aires o Pampa interserrana, se caracteriza por la mayor concentración de plantaciones con *E. globulus* a nivel nacional, cuya finalidad es la de generar protección y/o producción de madera para alimentar la industria celulósico-papelera. En menor grado se cultiva *E. viminalis* y *E. camaldulensis*. Las tasas de crecimiento son mayores para las dos primeras (de 25 a 14 m³/ha.año) previéndose turnos de corta de entre 10 y 12 años. Dado el destino de la madera, en general se plantan a altas densidades (>1100 plantas/ha) y se conduce con un sistema silvícola de monte bajo. Hacia el NO de esta región se presenta la pampa arenosa, caracterizada por un aumento en el contenido de arena de sus suelos y un clima con mayor déficit hídrico. En esta región las forestaciones tienen un fin industrial, así como también, brindan el valioso servicio ambiental relacionado con la defensa contra la erosión y estabilización de médanos. Se encuentran plantaciones de *Populus* spp. (*P. deltoides* y euroamericanos), *Eucalyptus* spp. (*E. viminalis* y *E. camaldulensis*) y *Pinus* spp. en menor grado. La densidad de plantación varía de entre 625 plantas/ha para *Populus* spp. hasta 1000-1100 plantas/ha para *Eucalyptus* spp.. Desde el punto de vista del manejo silvícola, se practican podas para las plantaciones de *Populus* spp. ya que tienen un destino industrial de aserrío, mientras que son escasas las intervenciones en el caso de *Eucalyptus* spp.. Se estima que los turnos de corta varían entre 8 -14 y 16-18 años de la madera para *Eucalyptus* spp. con destino triturado y aserrío, respectivamente. Para el caso de *Populus* spp., se estima un turno de corta de entre 12 y 16 años. Los crecimientos promedios varían según la posición en el paisaje y la especie, pero serían del orden de los 12 y 32 m³/ha.año. Finalmente, se establecieron plantaciones de *P. radiata* y *P. halepensis* en las estribaciones serranas de Tandilia y Ventania, respectivamente, con turnos de corta de entre 20 y 30 años. En general, se establecieron forestaciones en macizo con fines industriales y de servicio (restauración hidrológica y generación de paisajes). El crecimiento promedio anual es mayor en *P. radiata* que en *P. halepensis* (15-20 contra 5-12 m³/ha.año, respectivamente). Estos ambientes serranos presentan una cobertura natural de pastizal. Las densidades de plantación varían entre 1111 a 833 plantas/ha con muy bajo nivel de manejo silvicultural. Como labores de plantación comprenden, según el ambiente, desde un disqueado hasta la pasada de un subsolador (depende de la profundidad del suelo) y el uso de herbicidas a cobertura total o en la línea de plantación. En el caso de los médanos, se recomienda una siembra previa de pasto llorón, mientras que, en aquellos vegetados, sólo se realiza el hoyado de plantación. En el caso de los ambientes serranos, se prevé un tratamiento con herbicida en un círculo alrededor del lugar en donde se plantará el plantín forestal y la realización de un hoyo de manera manual.

Información complementaria en:

<http://santafeforestal.blogspot.com/>

<http://buenosairesforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica-del-sudeste-de.html>

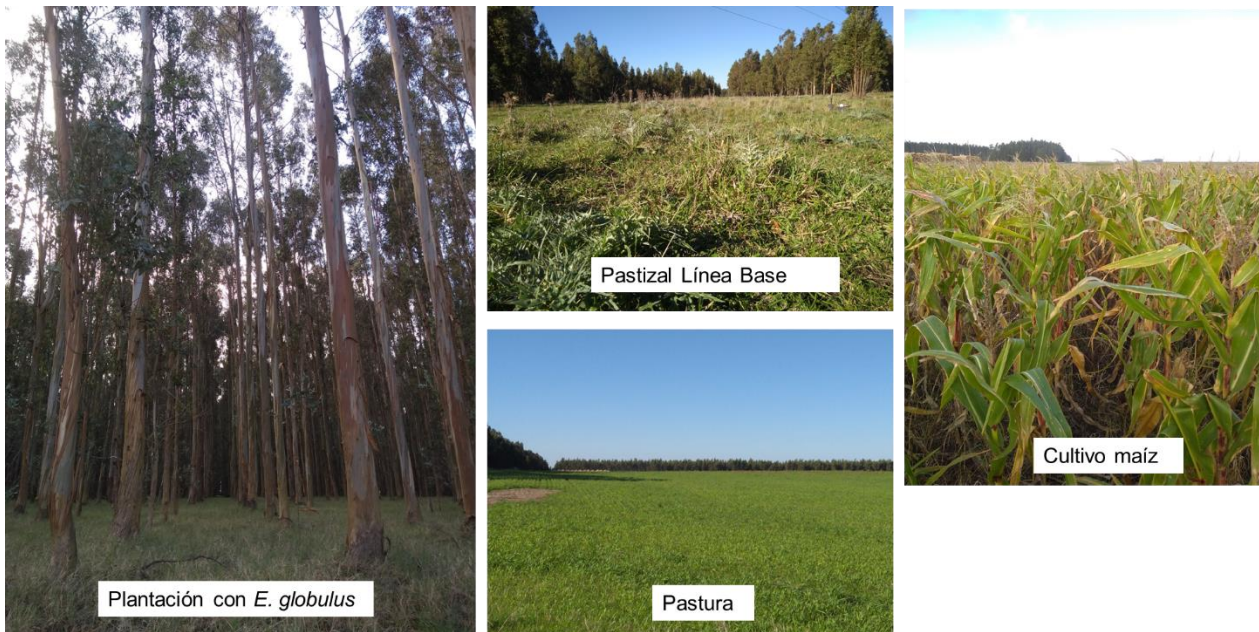


Foto 7.- Plantación de *Eucalyptus globulus*, un pastizal de la línea base (baja carga animal) y dos usos alternativos del suelo (pastura y cultivo de maíz) situadas en el partido de Necochea, Buenos Aires (créditos: D. Domínguez Daguer, DNDFI -MAGyP).



Foto 8.- Plantación de *Pinus radiata* y un pastizal de la línea base situadas en las sierras del partido de Tandil, Buenos Aires (créditos: J. Gyenge, IPADS).

Delta del Paraná: La región del Delta, conformada por el conjunto de islas situadas al noreste de la provincia de Buenos Aires y al sur de la de Entre Ríos correspondiente a la ecorregión que lleva este nombre. El Delta del Río Paraná es una llanura inundable, compuesta por un conjunto de islas que se han ido formando al ramificarse el río antes de desembocar, junto con el Río Uruguay, en el estuario del Río de la Plata. Al igual que la región Pampeana, es único en cuanto a su cercanía al cordón urbano más importante del país, y entre las características más destacables se encuentra la presencia de suelos de buena fertilidad química pero alta fragilidad física generada por los sedimentos fluviales y el riesgo de crecientes en épocas lluviosas. Esta región concentra la mayor superficie cultivada con salicáceas del país. Las condiciones ecológicas de la región determinan los sitios de cultivos de las principales especies de salicáceas. Así, las plantaciones con *Salix* spp. (*S. babylonica* e híbridos con *S. alba*, *S. nigra*, y clones de *S. matsudana* x *S. alba*) se producen en suelos inundables. Dependiendo del material, el turno de corta de los *Salix*

spp. varía de 10 a 18 años, con crecimientos promedios de entre 12 y 28 m³/ha.año. Las plantaciones con *Populus* spp. (*P. deltoides* o álamos carolinos mejorados, y sus híbridos *P. deltoides* x *P. nigra* o euroamericanos) se realizan sobre las áreas más elevadas (albardones), o en sitios con estructuras que permitan el drenado o impidan el ingreso de agua (ataja-repentes y diques). Tanto el turno de corta como el crecimiento promedio de este conjunto de especies es similar al de los *Salix* spp. (12 a 16 años de turno de corta y entre 24 y 30 m³/ha.año de crecimiento). En menor medida existen pequeñas plantaciones de *Eucalyptus* spp. (*E. dunnii*, *E. camaldulensis*, *E. maidenii* e híbridos *E. grandis* x *E. camaldulensis* y x *E. tereticornis*) y *Pinus* spp. (principalmente *P. elliotti*) con densidades de entre 1000 y 1300 plantas/ha. Como mencionamos, las tareas necesarias para disminuir las probabilidades de sufrir inundaciones requieren diseños desde pequeñas intervenciones (construcción de zanjas o canales) hasta grandes movimientos de suelos (dique perimetral y sistematización hidráulica para evitar el anegamiento). Las plantaciones que tienen como destino la industria del triturado, en general las plantaciones de *Salix* spp., tienen densidades de entre 1111 y 1667 plantas/ha, carecen de raleos o podas y en general, se maneja el rebrote durante 2 o 3 ciclos sucesivos. También se instalan plantaciones de *Salix* spp. con destino a aserrío, en donde la plantación se realiza a menores densidades (625 plantas/ha) y se somete a varias podas para lograr un fuste libre de nudos de 7 metros. Aquellas que tienen destino de aserrado o debobinado, en mayor grado las plantaciones con *Populus* spp., se plantan a menores densidades (400 a 278 plantas/ha) por lo que no se practican raleos, y se interviene en 3 momentos para podar las ramas y generar unos 8 metros libres de nudos. Es común observar en este tipo de forestaciones la presencia de un estrato herbáceo el cual puede ser usado para la cría de ganado vacuno.

Información complementaria en:

<http://deltaforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>



Foto 9.- Pastizal de uso de suelo alternativo (pastizal antropizado) y plantación con *Populus* spp. en una zona endicada del Delta del Paraná, Buenos Aires (créditos: R. Schincariol, DNDFI -MAGyP).



Pastizal Línea base



Plantación con *Salix* spp.

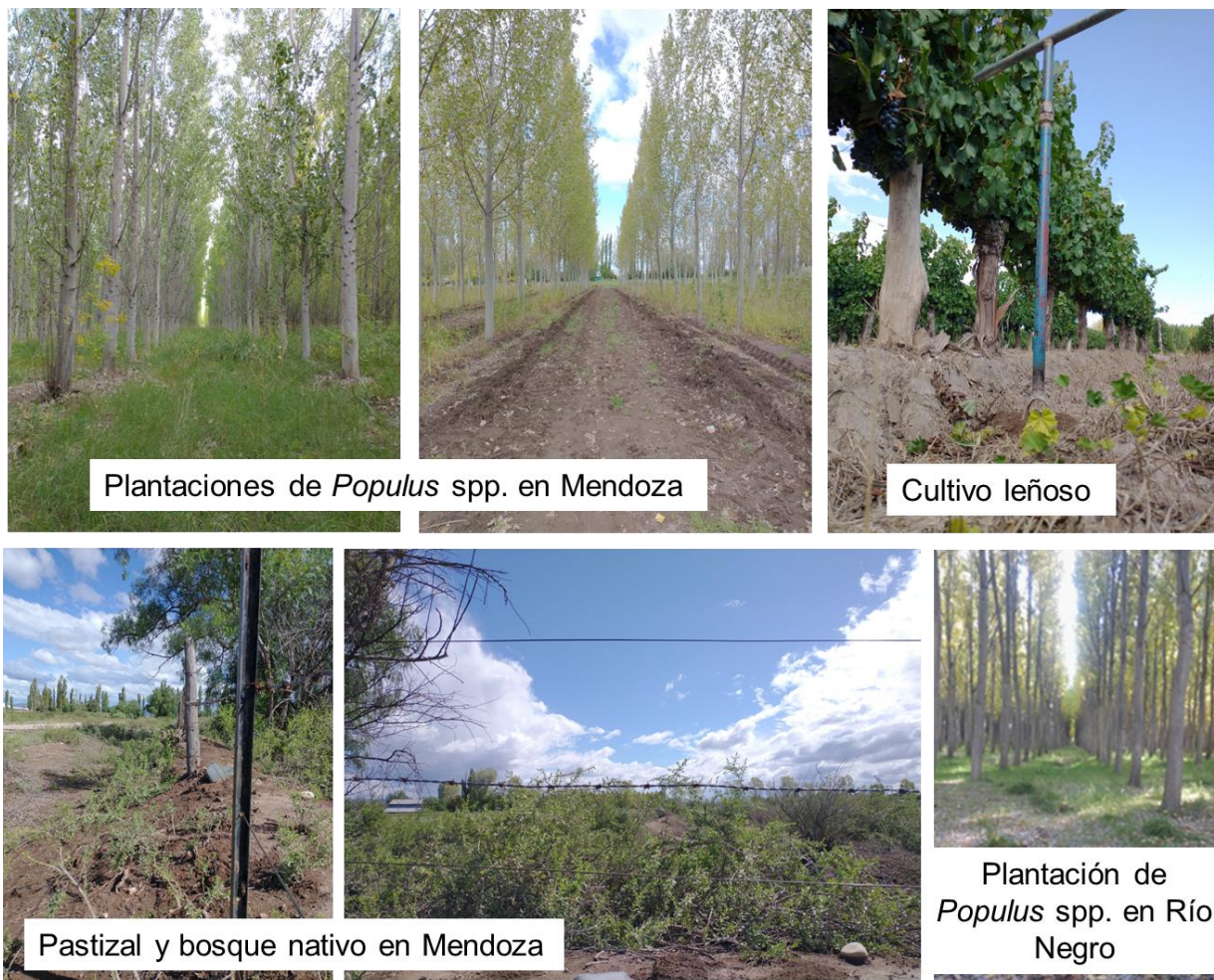
Foto 10.- Pastizal de la línea base y plantación con *Salix* spp. en una zona no protegida contra inundaciones en el Delta del Paraná, Buenos Aires (créditos: R. Schincariol, DNDFI -MAGyP).

Cuyo y Alto Valle del Río Negro: Esta región está comprendida por dos áreas: las llanuras o planicies de la provincia de Mendoza y los valles de las cuencas de los ríos Colorado, Negro, Neuquén y Limay en el norte de la Patagonia. Esta zona se encuentra condicionada por la disponibilidad de agua y el riego constituye un rol fundamental en la producción primaria. En dichos valles irrigados la producción forestal se destaca por proveer tanto madera para las industrias frutihortícolas de la región, como un importante servicio ambiental de ser cortinas forestales que previenen el daño de la fruta (principalmente vid en Cuyo y frutales de pepita y carozo en Río Negro) generado por el viento. Por ser zonas bajo riego, en general, el terreno se encuentra nivelado y sistematizado para distribuir el agua gracias a la gravedad. Se emplean, básicamente, especies de *Populus* spp. (*P. nigra*, híbridos euroamericanos *P. x canadiensis*, y *P. deltoides* o híbridos). En el caso de los macizos, el objetivo productivo es el de generar madera para aserrío o debobinado, por lo que los distanciamientos iniciales son bajos (menos de 800 plantas/ha) y se practican hasta tres instancias de podas. Los turnos de cortas de estos macizos rondan de 10 a 15 años.

Información complementaria en:

<http://patagoniavallesirrigados.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>

<http://regioncuyoforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>



Plantaciones de *Populus* spp. en Mendoza

Cultivo leñoso

Pastizal y bosque nativo en Mendoza

Plantación de *Populus* spp. en Río Negro

Foto 11.- Plantaciones de *Populus* spp. en los valles irrigados de Mendoza y Alto Valle del Río Negro (abajo a la derecha), pastizal y bosque nativo de la línea base y cultivo leñoso (vid) de la clase de uso alternativo (créditos: N. Naves de las imágenes de Mendoza y G. Melzner de la plantación en Río Negro, DNDFI -MAGyP).

Patagonia Andina: Esta región abarca las provincias de Neuquén, Río Negro, Chubut y Santa Cruz, en el extremo sur del país. Está contenida en las ecorregiones de bosques patagónicos y estepa. Las plantaciones se concentran en el oeste de Neuquén y Chubut, en menor medida en Río Negro; en ambientes cuyo relieve característico es el suave ondulado a ondulado, dentro de un paisaje regional montañoso. Las forestaciones, principalmente con *Pinus* spp. (*P. ponderosa* en su gran mayoría), se realizaron en una delgada faja en sentido latitudinal que comprende el ecotono entre las ecorregiones de bosques y estepas patagónicas, sobre la precordillera de los Andes. En esta región se verifica un altísimo gradiente pluviométrico (de 1100 a 200 mm/año en escasos 90 km en el sentido este-oeste), mostrando los mayores déficits hídricos hacia la zona de estepa. El clima sumado al gradiente ambiental determina que los turnos de corta varíen de entre 36 y 48 años y que el crecimiento promedio fluctúe de 7 a 20 m³/ha.año. En menor escala debe mencionarse los cultivos de *Pseudotsuga menziesii*, comúnmente llamado pino oregón, que se cultiva en sitios con menores limitantes ambientales al crecimiento. En general la preparación de terreno es muy baja y se realiza de manera manual (hoyado a pala) y macheteo de plantas arbustivas en el caso de la porción más húmeda de la región. Las plantaciones más viejas se instalaron en sitios en donde se realizó una corta y limpieza de la cobertura leñosa conformada por especies nativas. Las plantaciones que se hicieron en la década del '70 se plantaron a altas densidades, disminuyendo la misma en las

plantaciones modernas (de 2500, a 1300-1600 en el '80 y 1111 plantas/ha en los '90). La intensidad del manejo silvícola también se incrementó en el tiempo al buscar madera para aserrío, en donde actualmente se recomienda realizar tres raleos para finalizar con una plantación de 200 plantas/ha, y también realizar podas en individuos seleccionados.

Información complementaria en:

<http://patagoniaandinaforestal.blogspot.com/p/informacion-tecnica.html>



Pastizal antropizado (alta carga animal)

Pastizal Línea base (baja carga animal)

Plantación *Pinus ponderosa*

Foto 12.- Pastizales sometidos a distinta carga animal que conforman la clase de uso alternativo (Pastizal antropizado) y línea base (baja carga animal) y de una plantación de *P. ponderosa* situadas próximas a la Laguna La Zeta, Esquel, Chubut (créditos: G. Melzner, DNDFI -MAGyP).

5.- ARGENTINA EN ACUERDOS INTERNACIONALES RELACIONADOS CON EL MEDIO AMBIENTE

La República Argentina ha firmado y ratificado numerosos acuerdos ambientales globales, algunos de los cuales tienen lineamientos, productos, contenidos y alcances de gran relevancia para los bosques de nuestro país (COFO, COFLAC, UNFF, IPC), en otros se reciben documentos desde Cancillería por si hay aportes desde la parte forestal (ej. OMC, CDB, etc). Algunos son vinculantes (UNFCCC, CDB) aunque no específicamente forestal, y otros son por adhesión voluntaria como el Proceso de Montreal. Los Acuerdos, foros, procesos internacionales, entre otros, son:

- FAO - Grupo de Trabajo Técnico Intergubernamental sobre los Recursos Genéticos Forestales
- FAO - Comité Forestal Mundial (COFO)
- FAO - Comisión Forestal para América Latina y el Caribe (COFLAC)
- FAO - Comisión Internacional del Álamo y otros Árboles de Crecimiento Rápido que Sustentan a la Población y al Medio Ambiente (IPC)
- FAO - Programa Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales (FRA)
- Naciones Unidas - Foro de Bosques (FNUB o UNFF)

- Naciones Unidas - Objetivos para el Desarrollo Sostenible y Agenda 2030 (ODS)
- Naciones Unidas - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC o UNFCCC)
- Organización Mundial del Comercio (OMC)
- Proceso de Montreal
- Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR)
- Unión Internacional de Institutos de Investigación Forestal (IUFRO)
- Convenio de Diversidad Biológica (CDB)
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) apoyo para el UNFCCC
- Plataforma intergubernamental científico-normativa sobre diversidad biológica y servicios ecosistémicos (IPBES) apoyo para CDB
- Tercer BUR (al 2016):
<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/3er%20Informe%20Bienal%20de%20la%20Republica%20Argentina.pdf>
- Y su anexo que explica algunas variables:
https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/92814035_Argentina-BUR3-1-INFORME%20NACIONAL%20DE%20INVENTARIO%20DE%20GEI%20DE%20LA%20REP%20C3%9ABLICA%20ARGENTINA.pdf (ver pagina 550)
- Cuarto BUR (al 2018):
<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/4to%20Informe%20Bienal%20de%20la%20Rep%20C3%9ABlica%20Argentina.pdf>
- Emisiones GEI: <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/resultados>
https://inventariogei.ambiente.gob.ar/files/Infograf%20C3%9ADA%20Bosques_ESP.pdf
- Datos de emisiones y absorciones del AFOLU:
https://datos.gob.ar/dataset/agroindustria-producciones-sostenibles---emisiones-gei-provenientes-agricultura-ganaderia-otros/archivo/agroindustria_0dd3f6b5-1a9a-4607-b924-1023e98ed965.

6.- PROPIEDADES Y PROCESOS QUE CONTROLAN EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

La cantidad de carbono orgánico del suelo (COS, Mg/ha) en un momento dado es un balance entre las tasas de entradas y la de salida de C. En este simple balance intervienen un conjunto de factores interrelacionados (clima, posición topográfica, la calidad del material vegetal a degradarse, la biota, el tiempo de duración de una determinada cobertura vegetal y la actividad humana) que controlan procesos complejos que varían temporal y espacialmente en el cuerpo del suelo, tanto en forma horizontal como vertical. A partir de esta complejidad, la posibilidad de mejorar nuestras predicciones sobre las consecuencias del cambio en el uso o del manejo del suelo o del cambio climático depende, en parte, de la comprensión de los factores y de los procesos que controlan la distribución y el almacenamiento del COS y en términos prácticos, del establecimiento de sistemas de monitoreo que se sostengan en el tiempo.

Diversos estudios demuestran que, a gran escala, la temperatura media anual (TMA), la precipitación media anual (PMA) y la evapotranspiración potencial (ETP) son tres factores que modelan los patrones de acumulación de C en los ecosistemas. En general, se observa una relación positiva entre el COS y la PMA y ETP, y negativa con la TMA. Sin embargo, se ha demostrado que estas relaciones pueden interactuar entre sí conformando respuestas tanto lineales como del tipo cuadrático o no lineal. Por ejemplo, la COS puede

aumentar como respuesta al incremento de la PMA hasta alcanzar valores umbrales, momento en el que se estabiliza la capacidad de los ecosistemas de incrementar la COS (Guo et al. 2006). También se ha observado respuestas similares para la TMA. Incluso, se observaron interacciones entre ambos factores, en donde la respuesta de la COS a la PMA alcanzó un plató mientras que la relación con la TMA mostró un patrón tipo óptimo (Liu et al. 2011). Otros estudios remarcan la necesidad de establecer variables que relacionan estos parámetros climáticos. Por ejemplo, el uso de relaciones tipo MAP/MAT o MAP/ETP mejoró la capacidad de explicación de los modelos (Homann et al. 2007; Follet et al. 2012). Por último, Eclesia et al. (2012) determinaron que tanto la TMA como la PMA y la edad de las forestaciones explicaban parcialmente los cambios de COS. Es interesante resaltar que la relación de COS con la PMA de las forestaciones (relación negativa) es contraria la encontrada para los pastizales (Eclesia et al. 2012). Finalmente, estos mismos autores encontraron que es posible de mejorar la capacidad de explicar la variación del COS mediante una regresión múltiple que tiene en cuenta la edad y la PMA, mostrando así el efecto combinado de variables ambientales y de manejo silvícola.

Además del factor climático, existen variables del suelo que favorecen o no la acumulación de COS. En este sentido, se ha descrito que el contenido de arcilla impacta positivamente con la capacidad de los ecosistemas de acumular COS. Un estudio reciente analizando patrones globales, afirmó que el contenido de arcillas y limo está directamente relacionado con el COS, independientemente de la mineralogía de la arcilla, el clima y el uso de la tierra (Matus, 2021). En otras palabras, este estudio implica que la máxima acumulación de COS de un sitio está íntimamente ligada con estas variables del suelo, mientras que el resto de las variables explicarían las diferencias entre lo observado y la capacidad máxima de este servicio ambiental (acumular COS). En términos generales, se ha descrito que es posible mejorar la capacidad de estimar el COS a nivel local utilizando algunas variables mencionadas adicionando otras relacionadas con la cantidad de Al, de óxido de Fe, de alofanos, entre otros, según el ambiente (e.g. Georgiou et al. 2022).

Finalmente, también se reporta que un porcentaje de variabilidad en las reservas de COS se relaciona con ciertas propiedades biológicas como la cobertura vegetal y/o con el manejo que el hombre hace de la misma. De esta manera, el grado de cobertura con especies leñosas, de hábitos de vida (por ejemplo, caducifolias o siempreverdes, coníferas o de hoja ancha), su capacidad de fijar N atmosférico y la relación de C y N del material que aportan al suelo, afectan, dependiendo el ambiente, en mayor o menor grado, el máximo valor de COS que puede alcanzar dicho suelo (Maltus, 2021, Hübner et al. 2021). En el caso de las plantaciones forestales, se asocia una pérdida de COS relacionada con el manejo silvícola, como, por ejemplo, pérdidas dadas por la preparación del terreno, una acumulación de COS relacionado con la edad de la plantación, y distintos grados de aportes (o de pérdidas) de COS según el manejo de los residuos de cosecha. Dado que los sistemas pueden acumular un máximo de COS, que está relacionado con el contenido de arcilla y limo del suelo (Maltus, 2021; Georgiou et al. 2022), el manejo que se realice de la cobertura vegetal impactará sobre la diferencia entre el máximo COS posible y lo observado. Así, otros estudios muestran que la introducción de forestación genera un aumento o disminución de COS según sean sistemas que estén más lejos o cerca de dicho máximo valor (por ejemplo, Hong et al. 2020; Hübner et al. 2021). En este sentido, los sistemas naturales o con bajos niveles de intervención muestran estar más cerca del punto de saturación del suelo con C que los manejados, y a la vez, las porciones superficiales del suelo (0-30 cm) muestran valores más cercanos a la saturación que los más profundos (Georgiou et al. 2022). La matriz vegetal, o el bioma en general, en donde se instalan las forestaciones también muestra una impronta sobre el efecto del cambio de uso de la tierra sobre la COS, aunque la magnitud del cambio depende de la especie introducida y del uso antecesor. Mediante

análisis globales, se pudo determinar que el COS disminuye cuando ocurren los siguientes reemplazos de cobertura vegetal: pastura a plantación forestal (-10%), bosque nativo a plantación (-13% o -17,6%) o a cultivos anuales (-42% o -18,5%) y pasturas a cultivos anuales (-59% o -17,6%; Guo y Gifford 2002 y Duarte Guardia et al. 2020, respectivamente para el primer y segundo valor). Por el contrario, el COS aumenta según el siguiente cambio de uso de la tierra: bosque nativo a pastura (+8%), y cultivo anual a pastura (+19% o +23,2%), a plantación forestal (+18%), o a bosque secundario (+53% o +28%; Guo y Gifford 2002 y Duarte Guardia et al. 2020, respectivamente para el primer y segundo valor). En particular, Guo y Gifford (2002) demostraron un efecto negativo sobre las COS cuando se introducen forestaciones de *Pinus* spp. en pastizales, siendo neutro el efecto dado por especies de hoja ancha (en este caso, se analizaron en conjunto los trabajos con *Eucalyptus* spp. y *Populus* spp.). Otras revisiones globales también indicaron el efecto negativo de la introducción de plantaciones con *Pinus* spp. sobre el COS, mostrando efectos nulos o positivos (aumento del COS) las forestaciones con *Eucalyptus* spp. y de otras latifoliadas (Berthong et al. 2010; Shi y Cui, 2010). En el caso de la matriz de bosques, solamente el reemplazo por plantaciones con *Pinus* spp. afectó negativamente el COS en zonas con más de 1500 mm /año. El estudio de Laganier et al. (2010), donde consideran climas contrastantes, también indican que el impacto positivo de forestación es más pronunciado en suelos que han estado bajo cultivo anuales (+26%) en comparación con pasturas o pastizales naturales (<10%). Este mismo autor también demostró la importancia de la cantidad de arcilla del suelo y de la TMA sobre la magnitud del cambio, haciendo variar el impacto de la introducción de forestaciones de valores negativos a positivos (o viceversa). En el Norte de Europa, Bárcena et al. (2014) señala que la forestación de áreas con pasturas conduce a leves pérdidas del COS (-8%). El efecto del tipo de especie empleada en la forestación generó aumentos diferenciales. Las coníferas generaron un incremento del COS del 11%, las especies deciduas del 22% y no hubo efecto con especies mixtas. En cuanto al efecto del tipo de suelo hallaron que las ganancias fueron mayores en texturas gruesas (+35%) y en suelos de origen volcánico (15%), siendo que los suelos de textura fina perdieron C solo en un 8%. En cuanto a las variables que más impactaron sobre los cambios positivos de COS al cambiar el uso de la tierra de pastizales y cultivos a bosques, se destacaron las variables relacionadas con el orden de suelo y/o su textura, el tiempo desde el cambio de uso, en rango de temperaturas medias anuales y el relieve (Duarte Guardia et al. 2020). En este marco, el cambio de la cobertura del suelo a una leñosa en general produce cambios positivos del COS y se relaciona con variables del suelo, clima y el tiempo de permanencia de dicha cobertura.

A nivel local Ecclesia et al. (2012) realizaron en una transecta desde el Norte de Misiones al Norte de Corrientes, y sus resultados indican que los cambios en los contenidos de COS superficiales son independientes del tipo de vegetación nativa que es reemplazada (bosques nativos o pastizales). Las forestaciones de pino que reemplazaron a las vegetaciones nativas aumentaron los niveles de COS en sitios áridos, pero disminuyeron en sitios húmedos indicando que las precipitaciones es una de las variables determinantes. También Berthong et al. (2012), al analizar el reemplazo de pastizales por forestaciones de Eucaliptos en una transecta desde Argentina a Uruguay, informan que el reemplazo de los pastizales naturales generó un aumento o una caída de los pools de COS en asociación con las precipitaciones.

Sabemos que los parámetros climáticos que ejercen el control sobre el COS no son igualmente importantes en todos los ecosistemas y escalas espaciales (Shi et al. 2010). Argentina es un país que en su amplitud geográfica es atravesada por una importante variación climática y de biomas asociados a estos climas. Álvarez y Lavado (1998), trabajaron con bases de datos en región Chaco-Pampeana y demostraron que el contenido

de COS está positivamente correlacionado con la relación temperatura/precipitación, relación que explica un 68% de la variación de COS. Pero en este caso, la región estudiada no incluye sistemas forestales productivos. Por otro lado, Buschiazzo et al. (2004) también estudiaron con mayor intensidad la influencia de diferentes parámetros climáticos y edáficos sobre los niveles de COS, pero concentraron su estudio en el sector de la región semiárida de Argentina. En estos ambientes, de las fracciones orgánicas analizadas, el COS humificado fue la variable que más se mostró condicionada por la TMA y las PMA. Varios estudios muestran que la transformación de la vegetación natural por bosques cultivados con coníferas en la Mesopotamia, en la región pampeana y Patagonia alteran tanto los patrones naturales que determinan el balance entre entradas y salidas como la dinámica del COS. En el caso de la región pampeana, se ha observado que, si bien la COS aumenta con la edad de las forestaciones, el impacto negativo sobre el COS en la etapa de plantación es mayor en la zona más húmeda que seca (Berthong et al. 2012). En relación a esto último, Iglesia et al. (2012) estimaron que en los sitios con PMA cercanos a los 1400 2200 mm/año era necesario unos 40 años para alcanzar el COS de la línea base, llegando a los 100 años en aquellos sitios donde la PMA es aproximadamente de 2200 mm/año.

Estos resultados indican que, si bien existen variables claves relacionadas con la variación de COS (tipo de cobertura vegetal, TMA, PMA, ET, arcilla en el suelo, COS inicial del sitio, entre otras), las mismas interactúan entre sí y cambian la magnitud de su efecto según el sitio particular. De esta manera, este tipo de análisis para las distintas regiones del país permitirá explicar y/o predecir los cambios de COS observados.

7.- CONDICIONES DEFINIDAS PARA EL RELEVAMIENTO NACIONAL

En una primera etapa se definieron las pautas generales del relevamiento, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

Áreas de muestreo: El relevamiento de muestras de suelo a campo se realizó en bosques cultivados con especies exóticas y nativas de mayor importancia comercial, en las diferentes regiones forestales del país: Región Mesopotámica, NOA, Centro Norte, Pampeana, Central, Cuyo y Patagonia.

Áreas forestales elegibles: Se seleccionaron macizos implantados que debían conformar los siguientes criterios:

Ser las principales especies cultivadas en cada provincia.

- Estar implantadas en los ambientes/suelos más representativos.
- Sitios con el mayor número de rotaciones para la especie en la región.
- Ser rodales con edad cercana al turno de corta (± 3 años), considerando la calidad de sitio donde se encuentran.
- Se excluye del relevamiento las áreas con sistemas silvopastoriles, cortinas y las plantaciones con edades superiores o inferiores a la edad de corta promedio para las especies de cada zona.

Línea base y usos alternativos del suelo: Para comparar las reservas de COS entre los usos del suelo se seleccionaron dos escenarios alternativos adecuadamente identificados y descriptos. Uno de estos estuvo representado idealmente por vegetación natural del ambiente aledaño (o lo más próximo posible) a la plantación forestal y en similar posición en el relieve y tipo de suelo (*Línea base o de referencia*). El segundo escenario está representado por otro uso de la tierra más frecuente o representativo (ganadería,

citricultura, agricultura, etc) de cada zona en similar condición de ambiente/suelo al que denominamos uso alternativo.

Escala de trabajo: El muestreo se realizó a escala de unidad de manejo (UM) o lote para cada uso de suelo definido (plantaciones forestales, áreas de referencia y uso alternativo productivo). En cada UM se localizó una parcela de muestreo (PM) con una superficie de 2500 m², establecida en un área homogénea. De cada situación se seleccionaron 3 UM o repeticiones (homogéneos en ambiente, especie, edad, manejo silvicultural). En algunas situaciones las UM se localizaron en un establecimiento y en otros casos en diferentes propiedades. Las UM fueron identificadas en el GIS del MAGyP y se registró la ubicación indicando coordenadas de GPS (formatos KML o SHP). Se delimitaron los límites del rodal forestal, del lote de las áreas de referencia y del uso alternativo. La identificación de las unidades de muestreo se realizó en conjunto entre técnicos del INTA, LISEA y de la DNDFI (según la región de intervención), sobre la base del conocimiento local y los criterios establecidos para la selección y comparación. Además del GIS del DNFI el trabajo en gabinete se realizó con el apoyo de herramientas como Google e imágenes NDVI.

7.1.- Metodología de relevamiento en campo

7.1.1.- Toma de muestras en el campo

En el caso de las muestras de suelo para determinar la concentración de COS, en cada PM se obtuvo una muestra compuesta que se conformó a partir de 10 sub-muestras. Las submuestras se tomaron al azar recorriendo la PM. En cada punto de muestreo, previo a la incorporación del barreno o pala, se despejó de la superficie de todos los residuos orgánicos (mantillo, rastrojos, etc). La muestra se tomó en el estrato 0-30 cm de suelo. Las submuestras se tomaron a una distancia mayor a 1 metro de los árboles, para evitar las raíces y cambios locales en las condiciones de humedad y densidad.



Foto 13.- Toma de muestras de suelos en distintas situaciones para su posterior análisis del contenido de carbono orgánico (Créditos: MJ Nosetti M. D'Angelo, M. Flores Palenzona, L. Vera y M. Feyling, DNDFI -MAGyP).

Para calcular la cantidad de COS en el espesor 0-30 cm se requirió determinar la densidad aparente del suelo (DA). Para ello se empleó el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986; Santos et al. 2017). En cada PM se obtuvieron 3 muestras tomadas en la profundidad de 0-30 cm distribuidas al azar. El valor de DA empleada en el cálculo de la cantidad de COS fue el promedio de las tres muestras. En caso de presencia de fragmentos gruesos se sugirió seguir la metodología apropiada a estas condiciones (método del pozo) detallado en FAO (2020 b).



Foto 14.- Toma de muestras de suelos en distintas situaciones para estimar la densidad aparente usando el método del cilindro (Créditos: R. Schincariol, N. Domínguez Daguer, N. Naves y E. Zupan, DNDFI -MAGyP).

Se evitó tomar muestras de suelo para COS y DA en áreas con excretas, caminos de animales, áreas de tránsito evidente, áreas muy próximas a puntos de riego, áreas con evidencias de erosión, y cortafuegos.

7.1.2.- Manipulación de las muestras de suelo en laboratorio

Las muestras de suelo para COS se secaron al aire hasta peso constante y luego se envió una submuestra de unos 300 g al Laboratorio de Servicios Analíticos de suelos, plantas y ambiente (LABSPA, CERZOS CONICET UNS) en donde se determinó la concentración de carbono por el método de combustión seca (LECO). Las muestras de densidad aparente se llevaron a estufa a 105°C hasta peso constante.

7.1.3.- Cálculos aplicados para estimar el valor de las distintas variables

La densidad aparente del suelo (DA) se calculó de la siguiente forma:

$$DA = M/V$$

DA: densidad aparente (Mg/m^3)

M: masa de suelo seco en estufa

V: volumen del cilindro

Para calcular las reservas de COS en la profundidad muestreada (0-30 cm) se aplicó la siguiente fórmula.

$$\text{COS30 (Mg C/ha)} = \text{COS DA (1- vGi) E}$$

Donde:

DA: densidad aparente de la fracción fina del suelo.

COS: concentración de COS en la fracción fina de suelo (%). En caso de expresar COS en g/kg debe multiplicarse el resultado por 0,1 para obtener COS30 en Mg C/ha.

vGi: volumen de la fracción fina de suelo (cm^3 de fracción fina de suelo/ cm^3 de suelo) = 1 – volumen de fragmentos gruesos [cm^3 fragmentos gruesos/ cm^3 suelo]

E: es el espesor del estrato muestreado (30 cm).

7.2.- Relevamiento de información publicada

Por un lado, se relevaron informes y presentaciones generadas en el marco de las distintas carteras de proyectos de investigación de INTA. En paralelo, se utilizó la base de datos con publicaciones en revistas internacionales con referato provista por SCOPUS®. Se utilizaron las palabras claves “soil carbon”, “organic soil matter”, “carbono”, “suelo”, “materia orgánica” y “Argentina”. En una primera instancia, se separaron manualmente todos aquellos trabajos en donde se analizó el C en el suelo debajo de las forestaciones. Del total de trabajos en donde analizaron suelos forestales solo se utilizaron aquellos que contaran con la suficiente información para poder estimar la COS en los primeros 30 cm de suelo: Coordenada geográfica de cada lugar de estudio (condición necesaria para relacionar el dato con las variables ambientales), descripción de la vegetación predominante (tanto de las forestaciones como la de la Línea base y del uso alternativo), contenido de carbono orgánico (COS, gr/kg), contenido de materia orgánica (MOS, %), densidad del suelo (DA, g/ cm^3) y/o el almacenamiento (cantidad o stock) de COS (COSs) en el suelo. Los datos numéricos fueron obtenidos a partir de tablas o del texto. Se utilizó la herramienta online graphreader.com en caso de necesitar extraer la información a partir de figuras o gráficos. El almacenamiento de COS en el suelo reportadas en otras unidades (por ej., kg/m^2 , g/m^2 , kg/ha , t/ha o t/m^3) fueron unificadas a Mg/ha .

En el caso de que se reporte solo materia orgánica del suelo (MO, %), el COS se estimó utilizando la ecuación:

$$\text{COS} = 0,58 \text{ MO} \quad (\text{Mann, 1986})$$

En caso de que los autores no indican la densidad del suelo (DA), esta se estimó a partir de la relación empírica encontrada con el contenido de materia orgánica del suelo

$$\text{DA} = 100 / (\text{MO} / 0,244) + ((100-\text{MO}) / 1,64) \quad (\text{Post y Kwon 2000})$$

Donde

DA: densidad aparente (Mg/m^3)

MO: materia orgánica (%)

También se aplicó la siguiente ecuación empírica de Hiederer y Köchy (2011) para cuando

el valor de COS se expresó en %

$$DA = -0,1229 \ln(\text{COS}) + 1,2901 \quad (\text{para COS} < 6\%)$$

$$DA = 1,3774 \text{ exponencial} (-0,0413 \text{ COS}) \quad (\text{para COS} > 6\%)$$

y la ecuación de Shi y Han (2014) cuando el valor de COS se expresó en g kg^{-1} :

$$DA (\text{g cm}^{-3}) = 0,537 + 0,765 \text{ exponencial} (-0,0114 \text{ COS})$$

Se utilizó la ecuación propuesta por Jobbágy y Jackson (2000) para estimar el COSs de los primeros 30 en aquellos casos en donde se reportó este valor para diferentes profundidades. Para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Y = 1 - \beta \text{Prof}$$

donde

Y: proporción acumulada de COSs desde la superficie hasta la profundidad Prof (cm), β : tasa relativa de decrecimiento del COSs en profundidad (0,9786; Deng et al. 2016).

A continuación, se estimó;

$$\text{COS30 (Mg/ha)} = ((1 - \beta \text{30}) / (1 - \beta \text{ProfS})) \text{COSx}$$

Donde:

COS30: COSs a los 30 cm de profundidad,

ProfS: profundidad original del estudio (cm).

COSx; valor de COSs reportado por el estudio.

7.3.- Clasificación de los distintos Usos del suelo y sus clases

Argentina posee una gran diversidad de ambientes con su vegetación característica asociada al clima y el suelo donde evolucionan. Del mismo modo, esta diversidad ambiental, asociada a las economías y culturas regionales hacen propicio la implementación de diversos sistemas productivos y usos del suelo.

A efectos de organizar y clasificar la diversidad de información recibida desde las diferentes regiones del país se estableció clasificar, en un primer grado, los usos de la tierra según la intensidad del manejo siguiendo numerosos trabajos científicos (por ejemplo, Georgiou et al. 2022). Dentro de cada uso de la tierra se destacan las clases, las que se dividen, principalmente, por el carácter leñoso o herbáceo y por el grado de disturbio que se genera por el manejo propio de dicho uso de la tierra:

Línea Base o referencia: representa aquellos sitios sin intervención (o con bajo nivel de intervención) y con cobertura vegetal natural:

- Bosque nativo representando una cobertura leñosa con distinto grado de cobertura (bosque denso o ralos, incluyendo del tipo sabana y arbustales).
- Pastizal o vegetación espontánea en áreas sin o con bajo niveles de uso (ej., ganadería).

Uso Alternativo productivo: Otros usos de la tierra que son frecuentes para la región y en donde se verifica un manejo con mayor intensidad que el grupo anterior:

- Cultivos anuales: son todos aquellos cultivos que exijan una preparación de terreno o cosecha de manera anual. Este manejo implica un uso intensivo del suelo con

relativo alto tránsito de maquinaria y cambios periódicos en la cobertura vegetal. Entre otros cultivos, se encuentran el trigo, maíz, algodón, caña de azúcar.

- Pasturas: herbáceas cultivadas para uso ganadero.
- Pastizales antropizados: cobertura en mayor grado dado por herbáceas que permanecen varios años en el terreno y están bajo uso ganadero con moderada o alta carga en ambientes que originalmente fue pastizal o bosque.
- Cultivos leñosos: Aquellos cultivos de especies que forman estructuras leñosas y permanecen varios años en el terreno. Como los frutales de pepita y carozo, cítricos, yerba, vid.

Plantaciones forestales: Sitios en el cual el uso de la tierra se refiere al cultivo de especies leñosas. Sus clases se refieren a la categoría taxonómica relacionada con el género cultivado y al origen para el caso de las plantaciones con especies nativas:

- *Pinus* spp.. Distintas especies del género *Pinus*.
- *Eucalyptus* spp.. Distintas especies del género *Eucalyptus*.
- *Salix* spp.. Distintas especies y genotipos del género *Salix*.
- *Populus* spp.. Distintas especies y genotipos del género *Populus*.
- *Plantaciones con especies nativas*. Plantación con *Prosopis alba* y *Schinopsis balansae*.

7.4.- Análisis estadístico: Variables a utilizar e hipótesis de mecanismos involucrados

Se realizaron diferentes análisis estadísticos en función del objetivo específico a evaluar. En primera instancia se evaluó si las forestaciones contienen mayor o menor COS que la línea base o que otro uso alternativo productivo. Para esta evaluación hemos realizado los análisis estadísticos en una secuencia jerárquica que consiste en comparaciones entre las clases de uso de la tierra a mayor escala (nivel país) y a menor escala (ecorregión). Primero evaluamos si hay diferencias en el COS entre usos de la tierra a nivel país usando modelos lineales generalizados de efectos mixtos (Zuur et al. 2009). Este modelo incluyó como variable respuesta al COS y como predictor (efecto fijo) el tipo de uso de la tierra (con tres niveles: Línea base, Plantación y Otro uso alternativo productivo). La ecorregión fue incluida como factor aleatorio asumiendo que el nivel de promedio de COS es diferente entre las ecorregiones. COS fue modelado considerando una distribución Gamma y una función de enlace "log". La distribución Gamma para COS fue de las distribuciones posibles (normal y log-normal), la que mejor se ajustó presentando el valor más bajo de AIC (del inglés Akaike Information Criterion) (Delignette-Muller 2015). Una aproximación similar se evaluó si el COS difiere entre clases de uso de la tierra, pero en este caso el factor fijo está dividido en 12 niveles (ver sección 7.2 y figura 12 para referencias). La inferencia sobre el efecto de los factores fijos sobre COS en ambos modelos se realizó usando F-test, que es apropiado para muestras desbalanceadas (Bolker et al. 2008) y las comparaciones entre los valores medios de los niveles se analizaron usando el test *a posteriori* de Tuckey (Searle et al. 1980).

La misma aproximación se utilizó para evaluar diferencias entre tipos de cobertura del suelo y de clases de usos dentro de cada ecorregión. Se ajustaron modelos para cada región también considerando primero el tipo de cobertura y luego la clase de uso de la tierra. Sin embargo, estos modelos no incluyen a ecorregión como efecto aleatorio, por lo que se denomina modelos lineales generalizados.

El nivel de COS en la plantación o en el uso alternativo puede depender del nivel de COS en el sistema de referencia (línea base) (Hübner et al. 2021), el cual a su vez varía entre ecorregiones debido a diferencias en las condiciones ambientales. Por lo tanto, se evaluó

si el efecto de la plantación y del uso alternativo sobre el COS están relacionados con los niveles de la línea base usando modelos de regresión simple considerando relaciones lineales y no lineales (polinómicas, exponenciales y/o logarítmicas). Lo mismo se hizo considerando la relación entre el COS de línea base y de plantaciones con diferentes géneros de la especie forestal cultivada (por el número de observaciones se pudo realizar para *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp.). Se seleccionó entre los diferentes modelos (lineales y no-lineales) al que presentó el valor de coeficiente de determinación más alto (R^2).

Otro de los objetivos fue evaluar los factores ambientales y de manejo silvícola que controlan las variaciones en el COS dentro de las plantaciones forestales. Debido a que las prácticas de manejo silvícola que se aplican es un aspecto clave de este análisis, se agregó una categoría de clasificación para esta etapa de análisis que consiste en agrupar las forestaciones dentro de regiones forestales. La clasificación en regiones forestales tiene un aspecto clave en esta etapa de los análisis porque las forestaciones dentro de cada región comparten características similares de manejo silvícola, las que a su vez las diferencian de las otras regiones forestales (más detalles en la sección 4.3). Se evaluó en primer lugar cuál fue la influencia de múltiples factores ambientales (relacionados con el clima y con el contenido de arcilla de suelo) y de variables relacionadas con el manejo silvícola (género de especie cultivada y edad de la plantación) sobre el COS a nivel de todo el país usando modelos lineales generalizados de efectos mixtos. Al igual que en los análisis previos, el COS fue modelado considerando distribución de errores Gamma y función de enlace "log". Este modelo incluyó a los factores climáticos (variables climáticas obtenidos de WorldClim), el contenido de arcilla del suelo, la edad de la plantación y el género de la especie forestal cultivada. En este caso la ecorregión y la región forestal fueron incluidas como factores aleatorios asumiendo que los niveles medios de base (o la ordenada al origen varían entre ecorregiones y entre regiones forestales). Debido a que algunas de las variables climáticas están correlacionadas (covarían fuertemente), antes de incluir en el modelo se realizaron análisis de correlaciones de Pearson entre todas estas variables, y cuando dos variables están correlacionadas por un valor de $r > 0.80$ o < -0.80 , la variable de menor complejidad de interpretación fue incluida en el modelo. El modelo ajustado incluyó 12 variables predictoras en total: Temperatura Media Anual (TMA), Rango medio diurno de temperatura, Rango isothermal, Estacionalidad de la Temperatura, Temperatura media del cuarto más seco, Precipitación anual, Estacionalidad de precipitación, Precipitación del cuarto más húmedo, Precipitación del cuarto más frío, contenido de arcilla en los primeros 30 cm (Tabla 2), edad de la plantación y género de la especie forestal (5 niveles: *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp., Nativas, *Populus* spp. y *Salix* spp.). Para simplificar el modelo, se desarrolló un procedimiento de selección de variables del tipo "Backward" (Kuznetsova et al. 2017). Este procedimiento elimina variables no significativas ($p > 0.05$) y se detiene cuando no hay más predictores no significativos para remover. Una vez obtenido el modelo final (aquel que resulta del Backward procedimiento), las inferencias sobre el efecto de los predictores se realizaron también usando el F-test (Bolker et al. 2008); mientras que la dirección y magnitud de los efectos se evaluaron con el test de Student siguiendo a Pinheiro y Bates (2000).

Tabla 2.- Descripción de los parámetros de WorldClim (más detalles en <http://www.worldclim.com> y en Hijmans et al. 2005).

Variable	Variable (original)	Código
Temperatura Media Anual (TMA)	Annual Mean Temperature	BIO1
Rango medio diario de temperatura	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))	BIO2
Rango isotermal	Isothermality (BIO2/BIO7) (×100)	BIO3
Estacionalidad de temperatura (DE)	Temperature Seasonality (standard deviation ×100)	BIO4
Temperatura Máxima del mes más cálido	Max Temperature of Warmest Month	BIO5
Temperatura mínima del mes más frío	Min Temperature of Coldest Month	BIO6
Rango anual de temperatura (Max-min)	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	BIO7
Temperatura media del cuarto más húmedo	Mean Temperature of Wettest Quarter	BIO8
Temperatura media del cuarto más seco	Mean Temperature of Driest Quarter	BIO9
Temperatura media del cuarto más cálido	Mean Temperature of Warmest Quarter	BIO10
Temperatura media del cuarto más frío	Mean Temperature of Coldest Quarter	BIO11
Precipitación anual	Annual Precipitation	BIO12
Precipitación del mes más húmedo	Precipitation of Wettest Month	BIO13
Precipitación del mes más seco	Precipitation of Driest Month	BIO14
Variación interanual de la precipitación	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	BIO15
Precipitación del cuarto más húmedo	Precipitation of Wettest Quarter	BIO16
Precipitación del cuarto más seco	Precipitation of Driest Quarter	BIO17
Precipitación del cuarto más cálido	Precipitation of Warmest Quarter	BIO18
Precipitación del cuarto más frío	Precipitation of Coldest Quarter	BIO19

Finalmente, se evaluó la importancia y la dirección de los efectos de factores ambientales y de manejo silvícola sobre el COS a nivel de región forestal. Se siguió una aproximación similar a la anterior, pero dividida en más pasos ya que el número de muestras para cada región forestal es menor que a nivel país, y en algunos casos limita el ajuste de modelos complejos con múltiples variables predictoras. Para cada región forestal se siguieron tres pasos. En un primer paso se exploró la influencia de los diferentes factores climáticos sobre el nivel de COS en las forestaciones. Para esto se ajustaron modelos lineales generalizados incluyendo una de las diferentes variables climáticas extraídas de WorldClim y el contenido de arcilla en los primeros 30 cm del suelo. La significancia de cada uno de estos modelos individuales se realizó usando F-test. También se ajustó un modelo denominado de “manejo silvicultural” en el cual se incluyó la edad de la plantación y el género de la especie forestal cultivada; y en el caso de que el género superó dos niveles, se incluyó un término de interacción entre la edad y el género. Este término de interacción evalúa la hipótesis de que el efecto de la edad puede variar en función de la especie forestal plantada (e.g. Berthong et al. 2012). El tercer paso considera el ajuste de un “modelo combinado” que incluye los predictores significativos encontrados en el modelo ambiental y en los modelos de manejo silvicultural. Si dos predictores climáticos que se encontraron como significativos en los modelos univariados estaban fuertemente relacionados ($r > 0.80$ y $r < -0.80$) solo se incluyó la variable de más fácil interpretación ecológica. Para todos los modelos se calcularon los coeficientes de determinación apropiados para modelos basados en máxima verosimilitud (Nakagawa y Schielzeth 2013). Las inferencias se hicieron basados en los valores de R^2 de los diferentes modelos. En el caso de la región forestal del Delta del Paraná, donde la

variación espacial climática es reducida, sólo se ajustó el modelo de manejo silvicultural.

Todos los análisis se hicieron usando el lenguaje de programación R (R Core Team 2021). La determinación de la distribución de errores para COS fue realizada con el paquete “fitdistrplus” (Delignette-Muller, 2015), los modelos lineales generalizados de efectos mixtos se ajustaron con el paquete “lme4” (Bates et al. 2015), la selección de modelos de tipo Backward con el paquete “lmerTest” (Kuznetsova et al. 2017) y las inferencias basadas en el F-test se realizaron con la función Anova del paquete “car” (Fox y Weisberg 2019). Los coeficientes de determinación (pseudo-R²) para todos los modelos se estimaron usando el paquete “MuMIn” (Barton, 2020).

8.- RESULTADOS

8.1.- Patrones generales a nivel nacional

8.1.1.- Distribución del muestreo por usos y clases de uso de la tierra

En total se recabaron 859 datos individuales de COS a partir de 352 datos obtenidos por el relevamiento de campo y 507 de la bibliografía (Tabla 3). La ubicación geográfica de estos datos se corresponde con las principales regiones forestales de la Argentina (Figuras 2 y 3). En total, el mayor número de datos se obtuvieron para la situación Línea de base, seguida por las plantaciones, básicamente debido al aporte de datos provenientes de la bibliografía (Tabla 3). En el relevamiento de campo se evaluó un mayor número de muestras provenientes de forestaciones que de los otros dos usos del suelo (Tabla 3).

Tabla 3.- Número de datos individuales discriminado por el origen de los mismos (publicaciones científicas o relevamiento de campo) y por uso de la tierra (línea base, plantaciones forestales y uso alternativo).

Uso de la tierra	Total	Bibliografía	Relevamiento
Línea base	356	250	106
Plantación	319	183	136
Uso alternativo	184	74	110

La distribución del número de casos, teniendo en cuenta la cantidad de COS en las forestaciones, fue similar entre los datos relevados a campo y los obtenidos desde la bibliografía (Figura 1). La mayor cantidad de datos se observaron en los valores medios de COS menores a 50 Mg/ha, alcanzando valores máximos de aproximadamente 200 Mg/ha (Figura 1).

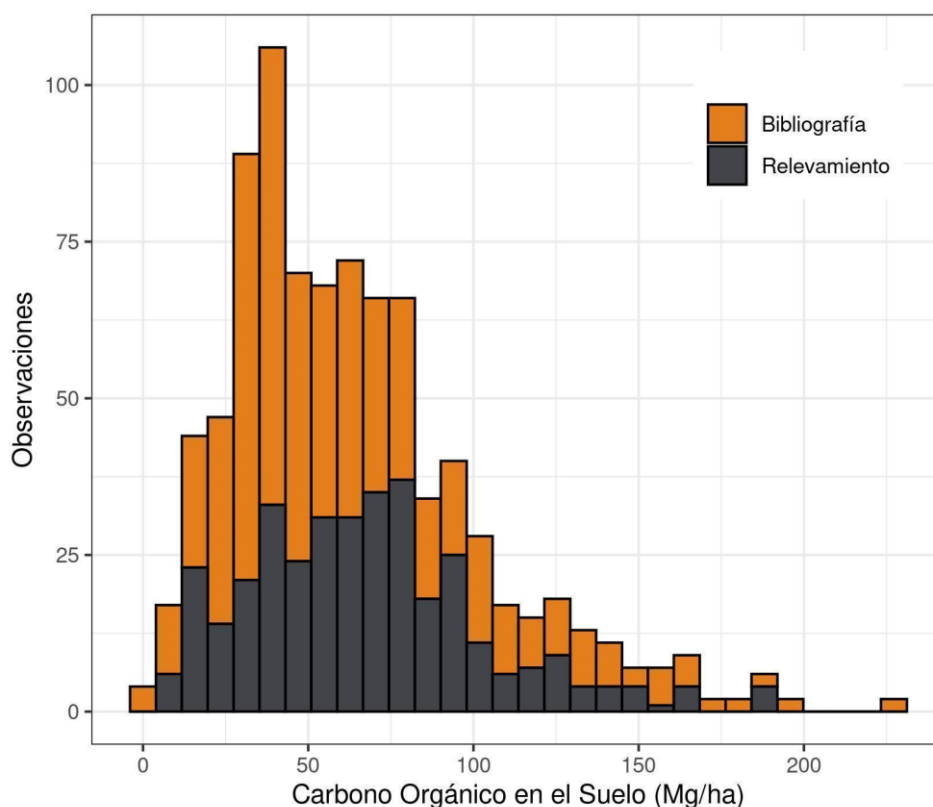


Figura 1.- Histograma de frecuencia de los casos obtenidos en el relevamiento de campo y desde la bibliografía.

Se recabó una mayor cantidad de datos individuales para las plantaciones de *Pinus* spp. (Tabla 4), en donde se recabó información sobre plantaciones realizadas con siete especies y un híbrido interespecífico. Esto se debe a que se plantan especies de *Pinus* spp. a lo largo de casi todo el país respondiendo a sus requerimientos ambientales y la tasa de producción asociada a estos (Figuras 2 y 3). En segundo lugar, se destaca la cantidad de datos relevados de *Eucalyptus* spp. (105) que comprenden unos 9 niveles. En este caso, bajo la clase *E. híbridos* se detallan cinco sitios con clones de *E. grandis* (X44, X48, X127 y *Corymbia*), mientras que otros 5 casos provienen de la bibliografía en donde no se detallan las especies.

Tabla 4.- Cantidad de datos por clases del uso de la tierra Plantaciones forestales y por especie según el origen de los datos (búsqueda en publicaciones o a partir del relevamiento de campo). En negrita se detalla el total de datos por clases de uso de la tierra. En el caso de Mixto dentro de *Eucalyptus* spp. se muestran los datos de 5 parcelas obtenidas en la bibliografía en donde no se diferencian las cubiertas por *E. camaldulensis* de las de *E. grandis*).

Clases	Especies	Bibliografía	Relevamiento
<i>Eucalyptus</i> spp.		54	51
	<i>E. camaldulensis</i>	7	8
	<i>E. globulus</i>	1	3
	<i>E. grandis</i>	23	22
	<i>E. viminalis</i>	16	2
	<i>E. dunnii</i>	0	7
	<i>E. híbrido</i>	0	5

	<i>E. tereticornis</i>	0	4
	Mixto	5	0
	<i>Eucalyptus spp.</i>	2	0
<i>Pinus spp.</i>		110	57
	<i>P. elliotii</i>	8	14
	<i>P. halepensis</i>	9	0
	<i>P. pinea</i>	1	0
	<i>P. ponderosa</i>	62	9
	<i>P. radiata</i>	17	1
	<i>P. taeda</i>	13	26
	<i>P. patula</i>	0	4
	pino híbrido	0	3
<i>Populus spp.</i>		14	10
	<i>P. deltoides</i>	3	0
	<i>Populus spp.</i>	11	10
<i>Salix spp.</i>		5	5
	<i>S. babylonica</i>	1	0
	<i>Salix spp.</i>	4	5
<i>Plantación con Nativas</i>		0	13
	<i>Prosopis alba</i>	0	9
	<i>Schinopsis balanceae</i>	0	4
TOTAL		183	136

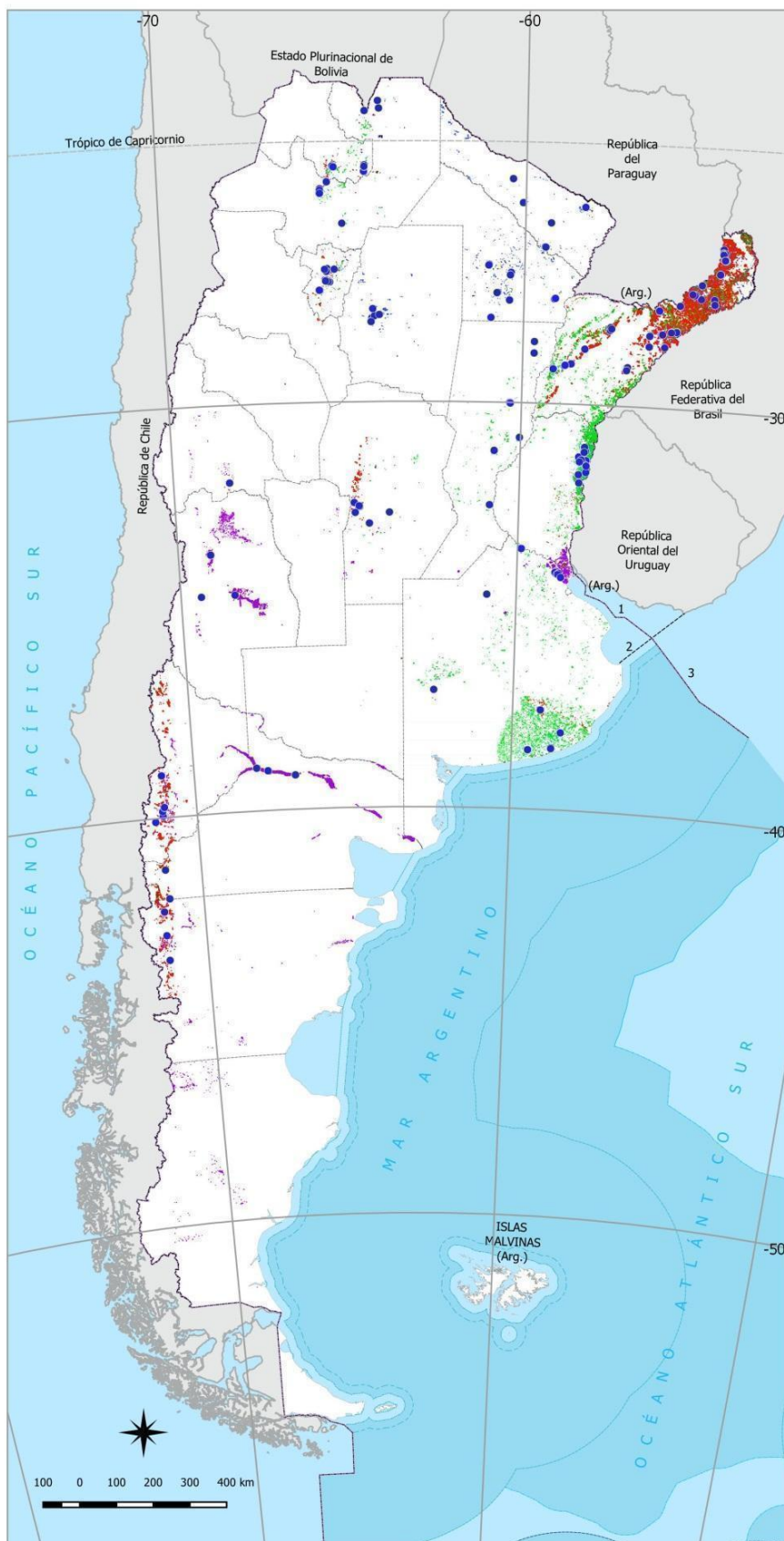
Con respecto a las clases de la Línea base o referencia, los pastizales y bosques nativos se encuentran representados de manera similar sin importar el origen de los mismos (178 casos en total para cada clase de uso de la tierra; Tabla 5). En cuanto al uso alternativo productivo, el relevamiento de campo permitió incrementar el número de datos de las clases cultivos leñosos y pastizal antropizado, que tenían escasa representación de datos obtenidos en la búsqueda bibliográfica.

Tabla 5.- Cantidad de datos por uso de la tierra, clases y origen de los datos (búsqueda en publicaciones o a partir del relevamiento de campo). En negrita se detalla el total de datos por clases de uso de la tierra.

Uso de la tierra	Clases	Bibliografía	Relevamiento
Línea base		250	106
	Bosque nativo	128	50
	Pastizal	122	56
Uso alternativo		75	110
	Arbustal	10	0
	Cultivos anuales	51	35
	Cultivos leñosos	9	22
	Pastizal antropizado	2	22
	Pastura	3	31

La distribución de los sitios relevados a campo se correspondió con las principales zonas forestales de Argentina (Figura 2 y 3). La mayor densidad de plantaciones con *Eucalyptus* spp. se registró en el sudeste bonaerense (región pampeana) y en la región Mesopotámica (Entre Ríos y Corrientes). Por el contrario, las plantaciones con *Pinus* spp. muestran una distribución muy amplia, que va desde la región Mesopotámica de clima subtropical (provincia de Misiones), con presencia en las sierras de Córdoba (región Centro Norte) con clima mediterráneo y luego en la región Patagonia Andina con clima templado-frío. A este amplio rango climático le corresponde también, una gran variación de suelos y por supuesto, la oportunidad de cultivar las distintas especies detalladas en la Tabla 4. Los álamos (*Populus* spp.) en su mayor densidad se cultivan en el Delta del Paraná (N.E. de Buenos Aires) y en los valles irrigados de la región de Cuyo y Alto Valle del Río Negro. Las especies nativas en plantaciones se concentran en la región Centro Norte (Chaco y Formosa).

Con respecto a los datos de COS obtenidos en la bibliografía, los sitios muestran una distribución a nivel nacional similar a la observada en el relevamiento de campo, excepto aquellos situados en la región Centro Norte (Figura 3).



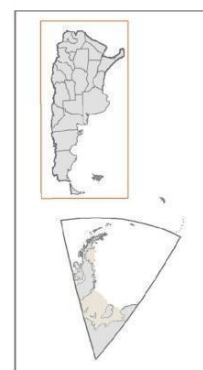
Referencias

Plantaciones forestales

Clasificación por grupo de especies

- Pinos
- Eucaliptos
- Sauces y Álamos
- Nativas
- Varias especies
- Sitios con muestreo de suelo

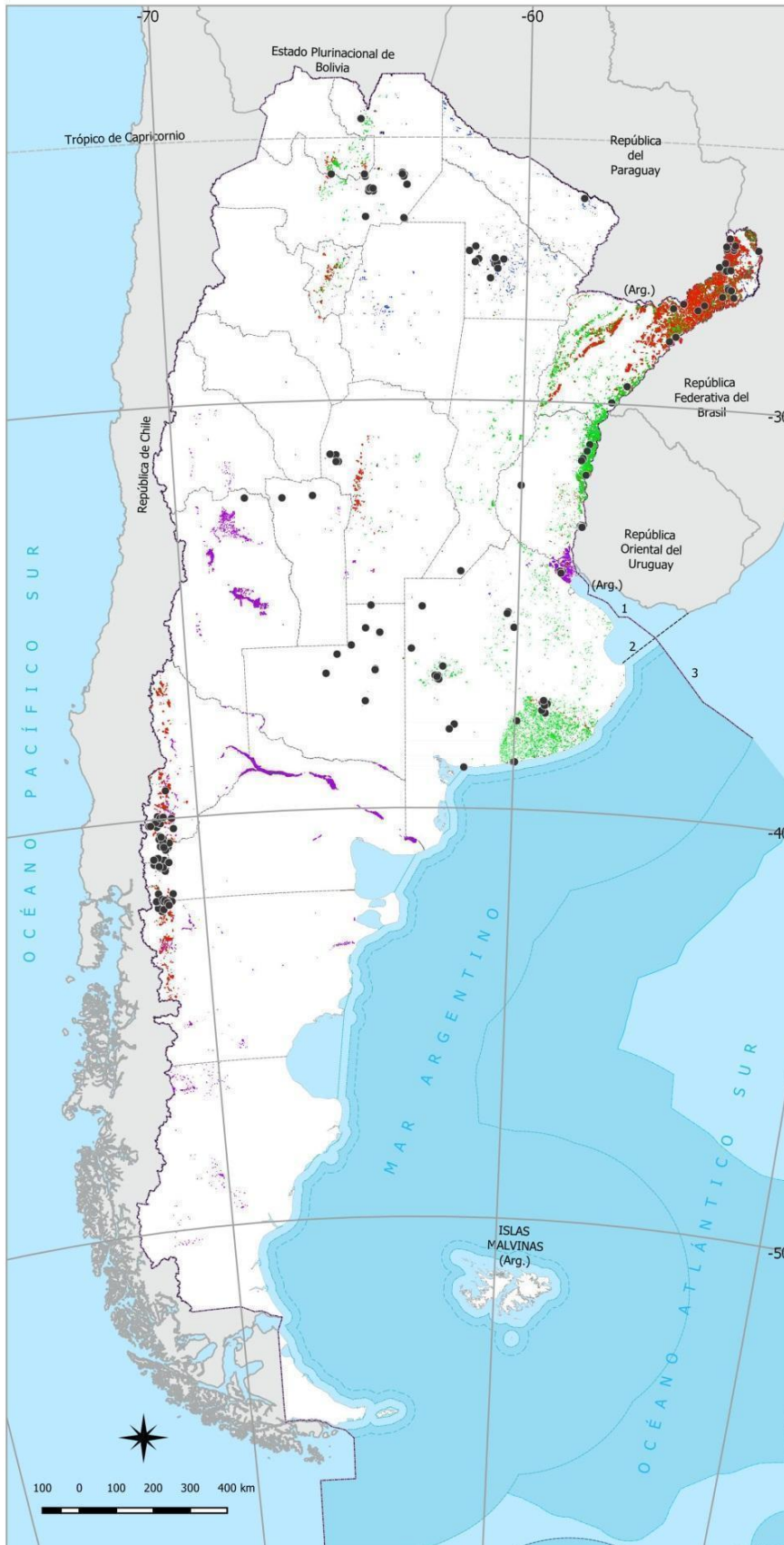
1. Limite del lecho y subsuelo del Río de la Plata
2. Limite exterior del Río de la Plata
3. Limite lateral marítimo argentino - uruguayo



Fuente: Cartografía de "Plantaciones forestales de la República Argentina" y sitios con muestreo de suelo (Área SIG e Inventario Forestal - Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación) y límites político administrativos (Instituto Geográfico Nacional) - Abril 2022

Proyección conforme Gauss-Krüger
(meridiano central 63° Oeste)
Marco de Referencia Geodésico

Figura 2.- Mapa de la República Argentina en donde se detalla la distribución de las plantaciones forestales, discriminadas por plantaciones con especies de pinos (*Pinus* spp.), eucaliptos (*Eucalyptus* spp.), sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.), especies nativas y otras, y los puntos en donde se realizó el relevamiento de los datos de campo (sitios con muestreo de suelo en las plantaciones forestales).



Referencias

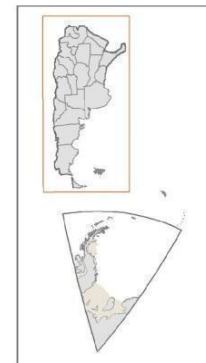
Plantaciones forestales

Clasificación por grupo de especies

- Pinos
- Eucaliptos
- Sauces y Álamos
- Nativas
- Varias especies

- Sitios según bibliografía

1. Limite del lecho y subsuelo del Río de la Plata
2. Limite exterior del Río de la Plata
3. Limite lateral marítimo argentino - uruguayo



Fuente: Cartografía de "Plantaciones forestales de la República Argentina" y sitios según bibliografía (Área SIG e Inventario Forestal - Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación) y límites político administrativos (Instituto Geográfico Nacional) - Abril 2022

Proyección conforme Gauss-Krüger
(meridiano central 63° Oeste)
Marco de Referencia Geodésico

Figura 3.- Mapa de la República Argentina en donde se detalla la distribución de las plantaciones forestales, discriminadas por plantaciones con especies de pinos (*Pinus* spp.), eucaliptos (*Eucalyptus* spp.), sauces (*Salix* spp.) y álamos (*Populus* spp.), especies nativas y otras, y los puntos con datos de COS forestales obtenidos en la bibliografía.

Los datos provenientes de las forestaciones muestreadas y de la bibliografía se distribuyeron en un amplio rango de TMA y PMA (Figura 4 izquierda). En particular, las plantaciones con *Eucalyptus* spp. se distribuyeron en un rango de 12°C de TMA y 750 mm de PMA hasta 22,5°C de TMA y 1500 mm de PMA. Por el contrario, las plantaciones con especies nativas (*Prosopis* spp.), se situaron en un acotado rango de TMA (alrededor de los 22°C) pero mayor rango de PMA (de 500 a 1400 mm/año). Las plantaciones con álamos (*Populus* spp.) se distribuyeron en un relativo estrecho rango de PMA (de 200 a 1000 mm/año). El género *Pinus* spp. comprendió el mayor rango de distribución, ya que se observan los sitios ubicados en Patagonia (de entre 5 y 10°C de TMA y 500 a 1500 mm de PMA), y los de la región de las sierras de Córdoba – región pampeana – mesopotámica y yungas de Salta (de entre 12 y 22°C de TMA y de 500-1900 de PMA). En este sentido, las plantaciones con *Pinus* spp. se ubican en ambiente tan disímiles como en la estepa patagónica y la selva paranaense y las yungas (Figura 4 derecha).

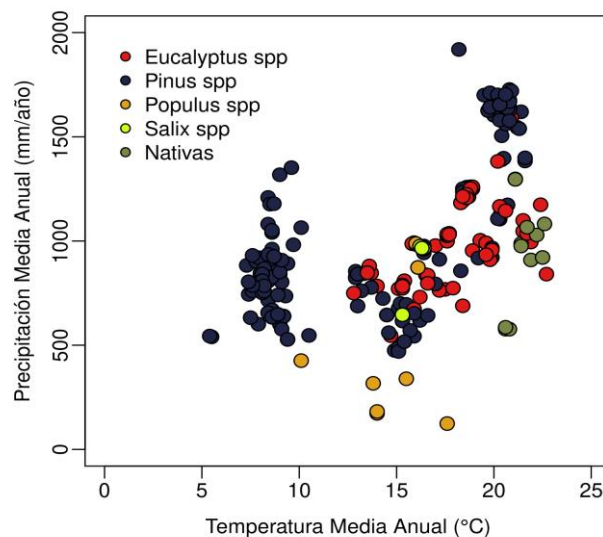


Figura 4.- Distribución de los sitios visitados en el relevamiento de campo con plantaciones forestales según el Género de los mismos (Izquierda) y distribución de los sitios visitados con plantaciones de *Pinus* spp. en relación con la ecorregión, ambos en relación con la temperatura media anual (TMA, °C) y precipitación media anual (PMA, mm/año) extraída de Wordclim.org.

8.2.- Almacenamiento de C en suelos forestados y su relación con otros usos del suelo

Tanto a nivel de uso de la tierra (Figura 5) como de clases de uso (Figura 6) se observa una amplia dispersión de datos, básicamente generada por la agrupación de sitios que difieren en la matriz ambiental que los contiene. Por ejemplo, dentro de los pastizales de la línea base se agrupan los datos de COS de los pastizales patagónicos con los pampeanos y lo de la ecorregión de campos y malezales. Esta variación sumada al desbalance en el número de casos para los distintos factores y a la presencia de valores extremos que sin ser anormales están muy alejados del valor medio no permiten hacer un análisis estadístico a nivel nacional comparando la cantidad de COS de los distintos sistemas. En este marco, es posible mencionar que se observa una tendencia a que las reservas promedio de COS varíe en el sentido: forestaciones > línea base > uso alternativo (Figura 5).

El análisis por clase de uso de la tierra a nivel nacional presenta similares problemas analíticos que los anteriormente mencionados. Sin embargo, desde un punto de vista

cualitativo, se observa un valor promedio mayor en las reservas de COS de los bosques nativos que de los pastizales dentro de la línea base, aunque la magnitud en la diferencia de los valores promedios entre ambas clases alcanza solamente los 10 Mg/ha (Figura 6).

En el caso de las plantaciones forestales, se observa una gradación de mayor a menor cantidad promedio de COS en el sentido: *Pinus* spp. y plantación con nativas > *Eucalyptus* spp. y *Salix* spp. > *Populus* spp. (Figura 6). Este orden significa un cambio entre los valores promedios máximo y mínimo de aproximadamente de 70 a 40 Mg/ha. Finalmente, en el uso alternativo productivo se observa una mayor gradiente entre clases (de 30 a 70 Mg/ha), siguiendo el orden: pasturas > cultivos leñosos > cultivos anuales > pastizal > arbustal (Figura 6).

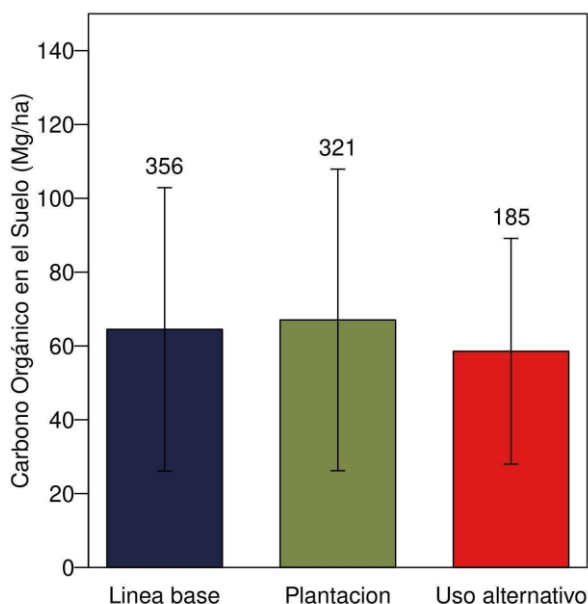


Figura 5.- Valores promedio de cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo en los tres usos del suelo considerados (Línea Base, Plantaciones y Uso Alternativo). El número arriba de cada barra indica el número de casos

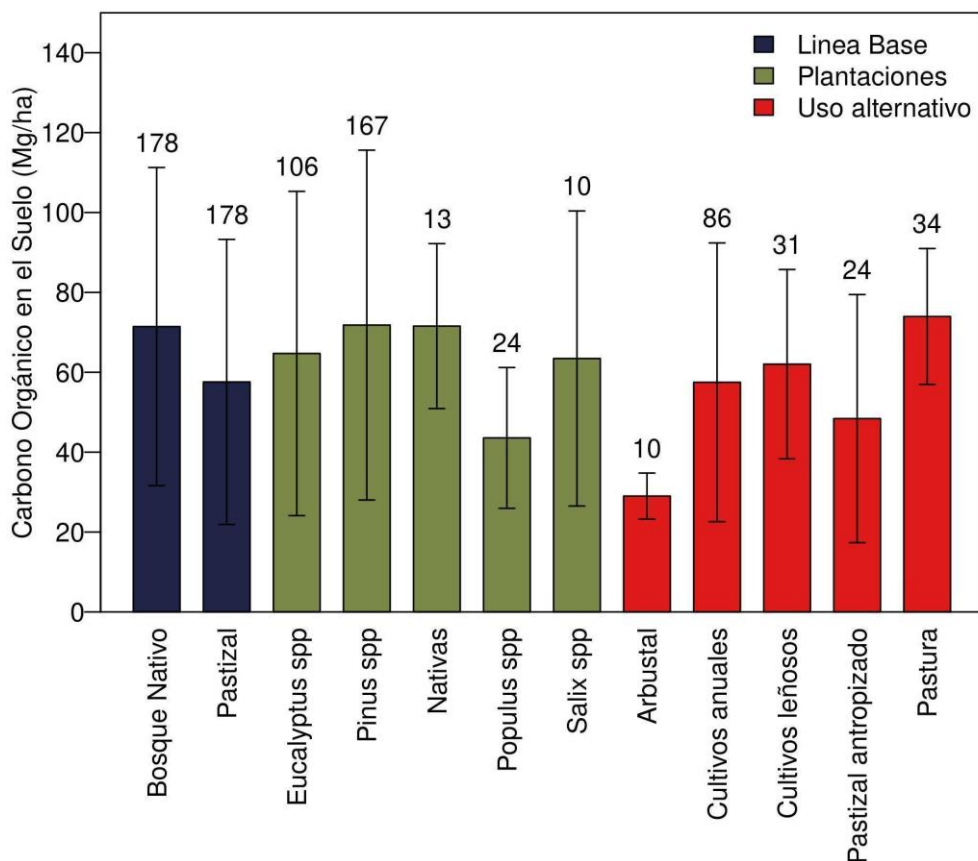


Figura 6.- Valores promedio de cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo, en las distintas clases que conforman los tres usos del suelo considerados. El número arriba de cada barra indica el número de casos.

8.3.- Almacenamiento de C en suelos forestados analizados por ecorregión y clases de uso de la tierra

La agrupación de datos por ecorregión, como mencionamos, permite agrupar los usos de suelos en una matriz ambiental homogénea, así como también permite analizar los cambios con las formaciones boscosas naturales más conspicuas del país. Sin embargo, se obtuvo más información para las regiones en donde las características ambientales permiten una mayor productividad forestal y en donde se han generado las principales cuencas forestales del país. Así, se observa una menor cantidad de datos para la Ecorregión del Monte y Espinal que para el resto de las ecorregiones (Figura 7).

8.3.1.- Análisis a nivel nacional por Uso de la Tierra

Un primer análisis estadístico teniendo en cuenta la ecorregión y el uso de la tierra, permitió reconocer que solamente hay diferencias estadísticas entre las tres clases de uso de la tierra en la región Chaqueña, tanto en el seco como en el húmedo, y en las Yungas (Tabla 6). Tanto en la Ecorregión de las Yungas como en la del Chaco Seco se observó una mayor cantidad de COS en las plantaciones forestales que en los otros usos del suelo. En el caso del Chaco Húmedo, las plantaciones mostraron una cantidad de COS intermedia. Por otro lado, en la región del Espinal se estimaron diferencias con un nivel de significancia marginal ($P=0,08$; Tabla 6). En esta última ecorregión, las plantaciones mostraron una cantidad de

COS promedio absoluto mayor que los otros Usos de la tierra. En el resto de las ecorregiones no se detectaron diferencias significativas entre usos del suelo. Es importante recalcar que dentro de cada clase de uso de la tierra existen distintos niveles asociados a los géneros, genotipos o especies forestales o varios usos del suelo alternativo, por lo que la ausencia de diferencias significativas a este nivel no significa que alguna clase en particular sea capaz de almacenar más o menos COS que otras. Por esta razón, se analizaron las diferencias significativas entre las distintas clases de uso de la tierra por ecorregión siempre que la cantidad de datos lo permitió.

Tabla 6.- Resumen descriptivo de los valores de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes usos del suelo en Argentina. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada tipo de uso de la tierra dentro de cada ecorregión. La columna final es el resultado de modelos lineales generalizados mixtos aplicados para evaluar diferencias en la cantidad de COS entre tipos de uso de la tierra. Se resaltan en gris las ecorregiones en donde se observaron diferencias significativas (menores a 0,05 en negrita) o marginales (mayores pero cercano a 0,05 en itálica).

Ecorregión	Línea Base			Plantación			Uso alternativo			Test Estadístico	
	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	valor F	valor de p
Selva Paranaense	71,03	44,09	121,8	69,36	38,82	152,59	68,14	40,56	188,27	0,63	0,54
Esteros del Iberá	19,74	12,2	47,41	16,33	10,99	34,7	21,59	11,67	49,45	1,23	0,32
Campos y Malezales	61,46	30,32	98,67	63,26	17,86	108,2	61,89	33,78	90,11	0,73	0,49
Yungas	79,05	34,79	160,79	95,67	35,07	191,65	66,43	18,7	144,97	7,12	0,0015
Chaco Seco	54,53	2,09	227,55	67,16	44,2	78,32	41,59	21,84	76,43	13,66	<0,001
Chaco Húmedo	74,21	39,21	117,45	61,71	34,44	112,09	54,11	29,15	83,24	14,37	<0,001
Espinal	61,37	11,59	106,52	70,95	33,23	124,84	40,69	5,93	109,84	<i>2,97</i>	<i>0,08</i>
Pampa	81,34	16,18	196,63	65,09	3,6	176,32	75,12	13,58	162,22	2,33	0,1
Delta	37,09	10,6	85,74	49,45	14,74	139,1	--	--	--	2,45	0,13
Monte	43,5	8,62	99,46	47,07	24,97	63,33	51,27	27,19	88,53	0,19	0,82
Bosques y Estepa Patagónica	59,68	10,2	188,88	62,17	13,19	186,16	--	--	--	0,18	0,67

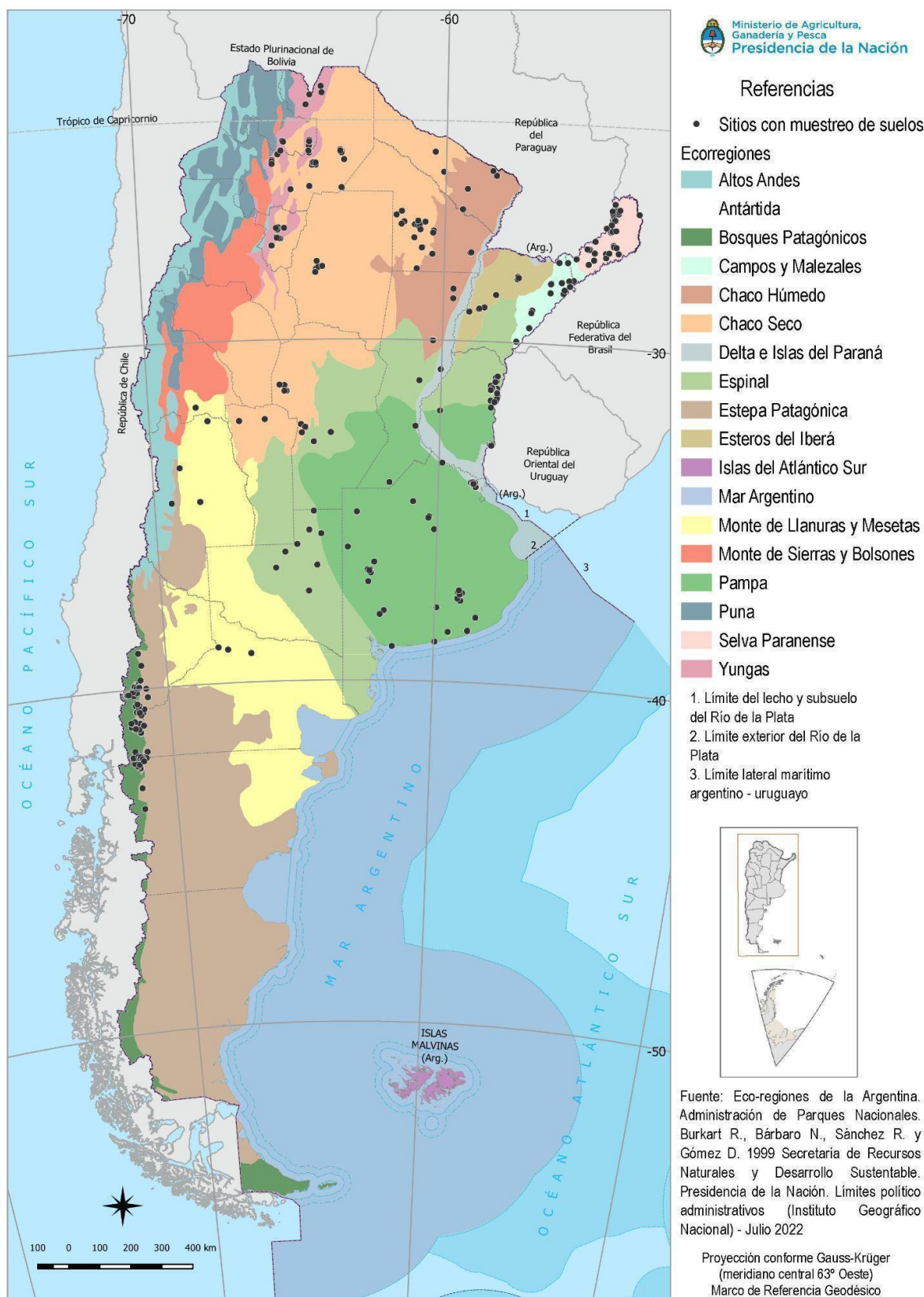


Figura 7.- Distribución de los sitios en donde se obtuvo información sobre la cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo en relación a las distintas Ecorregiones descriptas para la Argentina.

Más allá de las diferencias entre usos del suelo en cada ecorregión, las características ambientales determinan la máxima cantidad de C que sus suelos pueden almacenar. Así, los usos del suelo con menor impacto de manejo muestran valores de COS más cercanos

a esa capacidad máxima que los sitios sometidos a usos más impactados (Giorgiou et al. 2022). También se ha observado que en aquellas regiones en donde naturalmente son capaces de almacenar más COS, el cambio de uso de suelo puede generar pérdidas mientras que ocurre lo contrario (ganancias de COS) en sitios más pobres (e.g. Berthong et al. 2012; Hong et al. 2020; Hübner et al. 2021). En este marco conceptual, se esperaría que la introducción de las forestaciones incrementa el COS en aquellas ecorregiones con valores bajos de COS (al menos el COS analizado en las líneas base) y ocurran pérdidas en las ecorregiones más ricas en COS previo a la forestación. Los resultados obtenidos avalan parcialmente esta hipótesis ya que se observa que el COS de las plantaciones igualan o superan al valor de la línea base o referencia de la vegetación natural en valores intermedios, entre los 40 y 65 Mg/ha, y muestran menores valores en las ecorregiones de mayor COS (Figura 8A). Por fuera de estos valores, los resultados indican que el valor de COS promedio de las forestaciones es similar o menor que el de la Línea Base (Figura 8A). Por el contrario, el uso de la tierra alternativo y productivos (cultivos y pastizales con altos niveles de manejo) muestra similares valores que los estimados en sus respectivas línea base cuando estas tienen valores inferiores a 50 Mg/ha, siendo menores en aquellas ecorregiones con mayores cantidades de COS (Figura 8A).

A la vez, las plantaciones con *Pinus* spp. mostraron valores similares a sus respectivas Líneas Base o cambios positivos en las reservas de COS en casi todos los ambientes considerados (Figura 8B). Mientras tanto, los *Eucalyptus* spp. mostraron que no afecta la cantidad de COS hasta valores de alrededor de 70 Mg/ha de COS de la Línea Base, mostrando menores valores de COS al superar dicho valor (Figura 8B). De esta manera, se observa que las forestaciones no generan el mismo impacto sobre la COS que lo hacen los usos alternativos. Estos resultados nos permiten mencionar que, en términos generales, la introducción de forestaciones tendría un impacto nulo o positivo sobre las reservas de COS en la mayor parte de las ecorregiones, excepto aquellas con altos valores de COS y en los sitios plantados con *Eucalyptus* spp. Estos resultados generales indican la necesidad de indagar más profundamente el efecto de las clases de uso de la tierra sobre el COS. Mientras tanto, el uso alternativo de los cultivos tendería a generar pérdidas de COS en un mayor rango de situaciones.

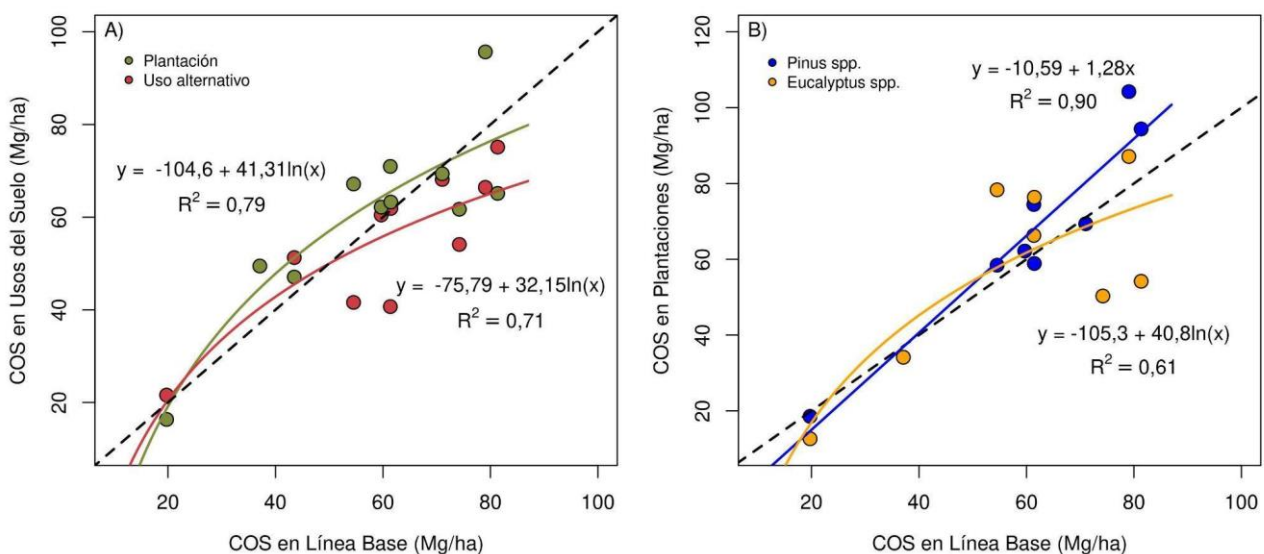


Figura 8.- Relación entre la cantidad de COS promedio en los suelos de la Línea Base de todas las Ecorregiones y el COS promedio de las Plantaciones y Uso Alternativo (A) y del COS de la Línea Base en relación con las clases *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. del Uso de la tierra Plantaciones (B).

8.3.2.- Análisis por ecorregión y por clase de Uso de la Tierra

8.3.2.1.- *Selva Paranaense*: Esta ecorregión muestra uno de los valores de COS de la línea base más altos (aprox. 71 Mg/ha). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el COS comparando los usos del suelo (Tabla 6) y las clases de uso (Tabla 7). El análisis estadístico discriminando por clase de uso de la tierra solo puede realizarse si se posee un número de repeticiones pertinente para cada clase. Así, mientras que en el valor promedio de uso de la tierra se incluyeron todos los sitios, al analizar las diferencias entre usos del suelo solamente se pudieron analizar las siguientes clases: bosque nativo para la línea base, *P. taeda* para las plantaciones forestales, y en el caso del uso alternativo, solamente se evaluaron cultivos leñosos (yerba mate). Es decir, no fue posible analizar otras clases de uso de la tierra porque no se contó con el número de muestras necesarios para poder ser incluido (por ejemplo, en la base de datos se pueden encontrar tres casos de Pino híbrido, cuyos valores ingresan al análisis dentro del conjunto de datos que forman la clase de uso Plantaciones, pero no se puede hacer de manera independiente). Por este motivo, solamente se grafican los valores de las clases de uso de la tierra (Figura 9). En promedio, esta ecorregión muestra valores de COS de 69,6 Mg/ha (Tabla 7). Estos resultados son acordes con lo detallado por Díaz Villa et al. (2022), quienes no encontraron diferencias en el COS entre bosque nativo preservado y bajo manejo, y plantaciones con *P. taeda*. Por el contrario, Ecclesia et al. (2012) destacan una menor cantidad de COS en las plantaciones con *P. taeda* y *P. elliotii* en relación con el Bosque nativo. Estas diferencias entre estudios pueden deberse a varios factores. En principio, el número de rotaciones previas, impacto de la preparación del suelo y el manejo de los residuos vegetales de la cosecha mostraron tener impacto sobre el COS, siendo las prácticas que aconsejan métodos menos agresivos y que permitan la regeneración natural de la vegetación las que menos modificaron dicho valor (Von Wallis et al. 2016). Por otro lado, también se observa un patrón asociado con la PMA. El cambio de COS al introducir forestaciones en una matriz de bosque natural es positivo en sitios con una PMA aproximadamente de 1400 mm/año y negativos a partir de dicho valor (Ecclesia et al. 2012). Finalmente, también hay un efecto negativo sobre el COS determinado por la pérdida de la cobertura vegetal y establecimiento de una nueva forestación. Así, luego de la cosecha forestal, y hasta una determinada edad de la forestación, se observa un desacople entre las pérdidas y entradas de C al suelo que generan una disminución del COS. De esta manera, el efecto negativo sobre el COS que se genera por la cosecha puede ampliarse si se realizan manejos del suelo y de los residuos vegetales no apropiados sumado al efecto de la PMA, que puede amplificar este efecto en los sitios con mayores niveles de precipitación. De manera general, Ecclesia et al. (2012) proponen que a partir de una determinada edad es posible observar un incremento de la COS que puede superar incluso a su línea base, a una edad que rondaría los 35 años superando los turnos de corta esperados (este es un aspecto discutido 8.4.1). En relación al cultivo de yerba mate, si bien los sistemas de cultivos asociados con pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) mostraron mayores valores de COS que el monocultivo, todos los sistemas fueron menores que el COS medido en el bosque nativo (Piccolo et al. 2008). Finalmente, como mencionamos previamente, si bien se tomaron muestras de suelo en otros cultivos, sería interesante incrementar el número de casos de diferentes clases de uso de la tierra para poder tener una idea más global del impacto de los distintos usos del suelo en esta región sobre el COS.

8.3.2.2.- *Yungas*: En esta ecorregión se estimaron diferencias significativas en el COS comparando las clases de uso de la tierra, siendo mayor en las plantaciones forestales y línea base, y menor en el uso alternativo productivo (Tabla 6; Figura 9). Es interesante recalcar que esta ecorregión mostró uno de los mayores valores promedio de COS de la línea base (aprox. 79 Mg/ha), por lo que la comprensión sobre el impacto de la actividad forestal cobra mayor relevancia. En términos generales, el COS del bosque nativo con

distinto nivel de manejo silvícola alcanzó entre un 30 y 40% del total de C del ecosistema, siendo similar al de las forestaciones con *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. sobremaduras (Manrique et al. 2020). Las forestaciones más jóvenes y con edades cercanas al turno de corta alcanzaron valores entre el 80 y 30%, respectivamente (Manrique et al. 2020). Estos valores ponen de manifiesto la importancia relativa del COS en términos de capacidad de mitigar los GEI. En este relevamiento, se analizaron 2 clases de línea base (bosque nativo y pastizal) y en las plantaciones forestales (*Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp.), y 3 clases de uso alternativo del suelo (cultivos anuales, leñosos y pasturas; Tabla 7). De manera lógica, si bien no mostraron diferencias significativas, el pastizal de la línea base mostró valores promedios de COS menores que los del bosque nativo (Tabla 7). El cultivo con *Pinus* spp. alcanzó los mismos valores promedio de cantidad de COS que el Bosque nativo de la línea base (93,3 Mg/ha). En contraposición, los cultivos anuales y las pasturas mostraron los menores valores promedio de COS (61,7 Mg/ha), mostrando valores intermedios las plantaciones con *Eucalyptus* spp., los pastizales de la línea base y los Cultivos leñosos de los usos alternativos (78,5 Mg/ha; Tabla 7, Figura 9). Estos resultados son acordes a los esperados, en donde el COS de las plantaciones con *Pinus* spp. muestra valores similares a la línea base. Por otro lado, las plantaciones con *Eucalyptus* spp. tampoco fueron significativamente distintas a la línea base, pero su promedio fue menor al COS de los bosques nativos. Como en otras ecorregiones, el COS del bosque nativo depende de la cobertura y manejo silvícola, pudiendo disminuir según el uso. Si bien Manrique et al. (2020) encuentra valores similares de COS más allá del manejo, en un bosque secundario deciduo sometido a desmonte se estimó un 27% menos que otro con mayor densidad y diversidad de especies (Ripley et al. 2010).

Tabla 7.- Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de la Selva Paranaense y de Yungas. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre clases dentro de cada ecorregión.

Ecorregión	Uso de la tierra	Clase	Selva Paranaense			Yungas			
			Media	DE	n	Media	DE	n	
Línea Base		Bosque Nativo	71,86	20,42	20	82,32	42,88	33	A
		Pastizal	--	--	--	63,65	16,57	7	AB
Plantaciones Forestales		<i>Pinus</i> spp	69,36	11,13	28	104,22	45,87	13	A
		<i>Eucalyptus</i> spp	--	--	--	87,12	35,14	13	AB
Usos alternativos		Cultivos anuales	--	--	--	43,81	29,78	16	B
		Cultivos Leñosos	55,81	10,98	11	84,64	13,82	9	AB
		Pastura	--	--	--	79,64	12,84	15	B
Grados libertad					28				68
Valor F					1,79				3,079
Valor p					0,18				0,01
Significancia					No significativo			Significativo	

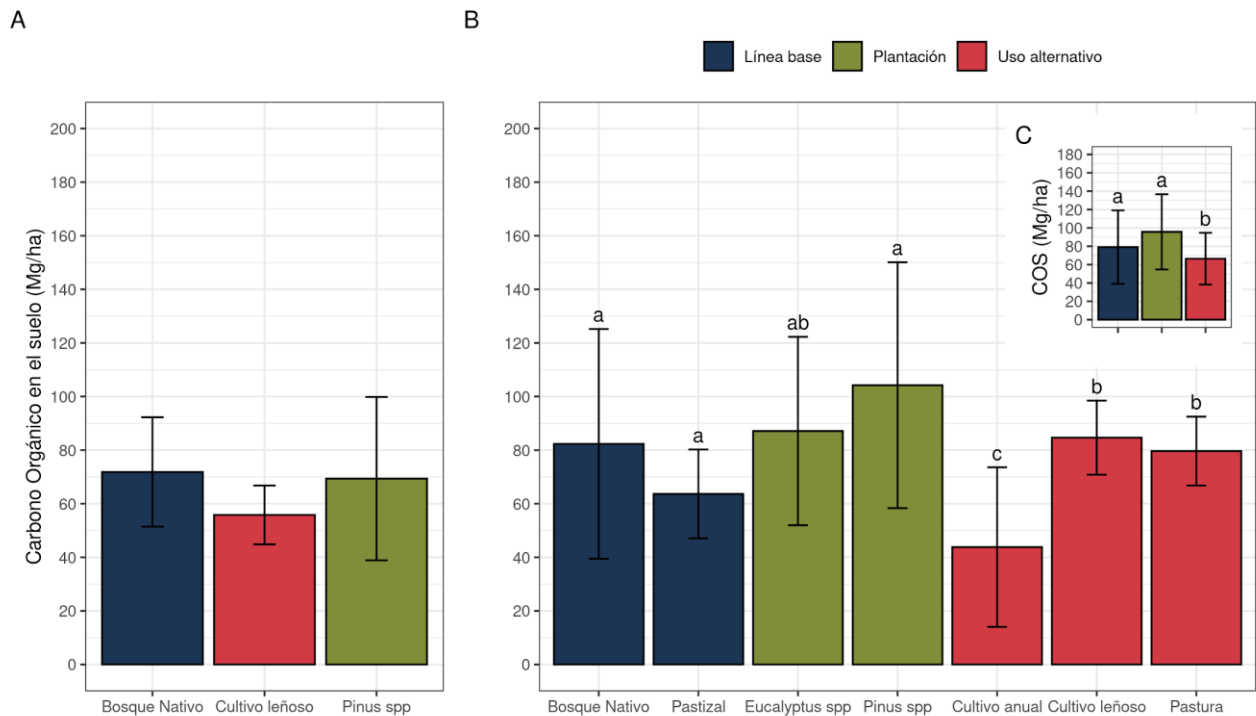


Figura 9.- Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Selva Paranaense (A) y Yungas (B y C). Los paneles A y B muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que el panel C los muestra por Uso de la tierra. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

8.3.2.3.- Esteros del Iberá: La cantidad de casos observados dentro de la ecorregión de los Esteros del Iberá fueron relativamente escasos (Tabla 8) que, si bien permitió hacer un análisis estadístico, el mismo mostró diferencias marginales ($p=0,056$). Por este motivo, los resultados deberían ser tomados con cautela o a modo de tendencia, hasta poder recabar más información. En esta ecorregión no se encontraron diferencias significativas entre usos del suelo (COS promedio de 19,2 Mg/ha; Tabla 7). Considerando esto, los pastizales antropizados y los de la línea base mostraron las mayores cantidades de COS (20,7 Mg/ha). Las plantaciones con *Pinus* spp. mostraron un valor intermedio (18,6 Mg/ha) mientras que fueron menores las realizadas con *Eucalyptus* spp. (12,6 Mg/ha, Tabla 8; Figura 10). Es importante resaltar que las forestaciones en este tipo de ambientes se realizan sobre los cordones arenosos, siendo esta la posible razón por la que se observan valores de COS bajos.

8.3.2.4.- Campos y Malezales: Para la ecorregión de Campos y Malezales no se encontraron diferencias significativas entre los usos del suelo (COS promedio de 62,2 Mg/ha; Tabla 6) ni entre las clases de los usos del suelo evaluados (Tabla 8; Figura 10). Estos resultados son interesantes ya que se compararon los resultados de las plantaciones forestales con pastizales con distintos niveles de uso, sin encontrar diferencias significativas. En este sentido, sería interesante aumentar el número de casos de estudio, sobre todo, en plantaciones de *Eucalyptus* spp.

Tabla 8.- Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en las ecorregiones de Esteros del Iberá y Campos y Malezales. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre clases dentro de cada Ecorregión

Ecorregión	Uso de la tierra	Clase	Esteros del Iberá			Campos y Malezales					
			Media	DE	n	Media	DE	n			
Línea Base	Pastizal		19,74	15,52	7	A	61,46	23,06	15		
Plantaciones Forestales	<i>Pinus</i> spp		18,55	9,65	5	AB	58,89	32,8	12		
	<i>Eucalyptus</i> spp		12,64	2,63	3	B	76,36	37,34	4		
Usos alternativos	Pastizal antropizado		21,59	12,55	7	A	57,11	22,52	10		
Grados libertad						12			22		
Valor F						3,69			0,92		
Valor p						0,056			0,45		
Significancia						Marginal			No significativo		

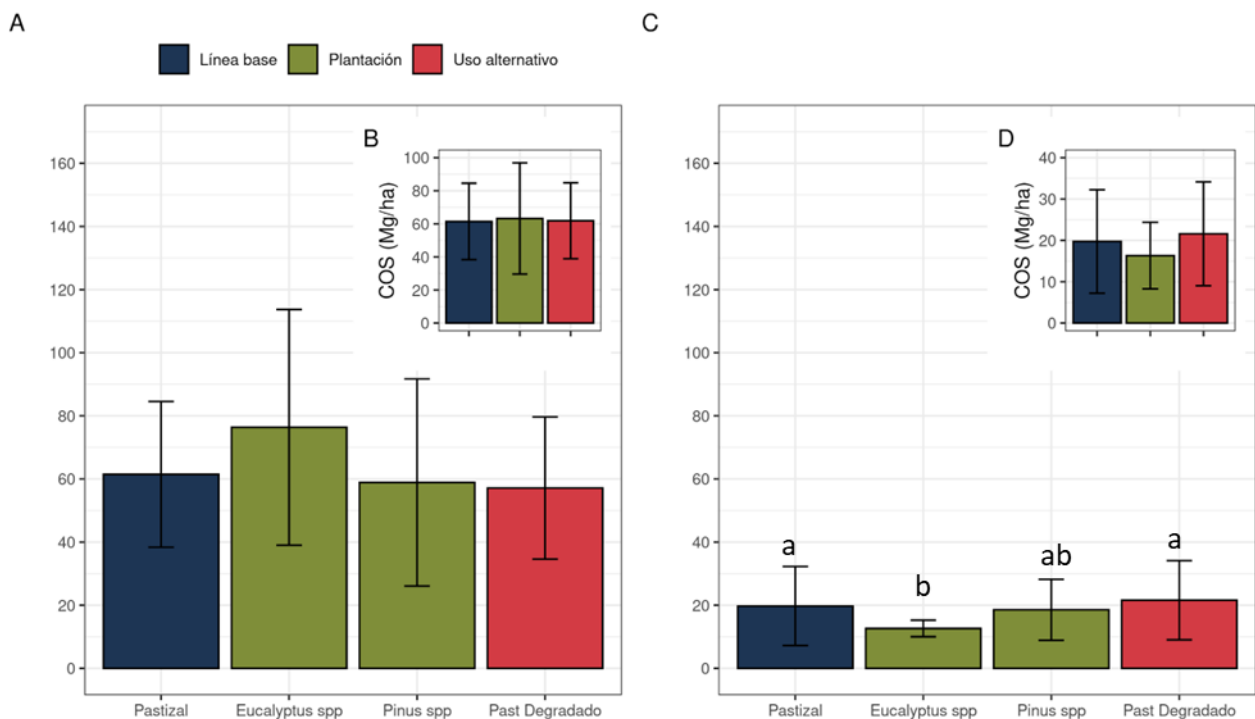


Figura 10.- Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Campos y Malezales (A y B) y de los Esteros del Iberá (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso del suelo mientras que los paneles B y D los muestra por Uso de la tierra. Letras distintas indican diferencias significativas (P=0,056).

8.3.2.5.- *Chaco Húmedo*: la mayor cantidad de COS se observó en la Línea base (promedio de aprox. 74 Mg/ha), seguido de las plantaciones forestales (aprox. 62 Mg/ha) y con un menor valor, el uso alternativo productivo (aprox. 54 Mg/ha; Tabla 6, Figura 11). De manera proporcional, el cambio de uso de la tierra genera una pérdida del 17% del COS en el caso de las plantaciones y del 27% en el caso de los usos alternativos. Los análisis estadísticos también pusieron en evidencia que existen diferencias entre las clases de uso, siendo mayor en la clase de Bosque nativo (78 Mg/ha), seguido por los usos del suelo de Pastizal y de Plantación con nativas (COS promedio de 69 Mg/ha; Tabla 9, Figura 10). Los menores valores de COS se obtuvieron en las clases de usos del suelo de plantaciones con *Eucalyptus* spp., cultivos anuales y pasturas (COS promedio de 52,5 Mg/ha; Tabla 9, Figura 11). Para el caso de las plantaciones con *Eucalyptus* spp., el reemplazo del bosque nativo o del pastizal representa una pérdida promedio del 35% o del 24%, respectivamente (Tabla 9). Estas pérdidas de COS serían similares cuando se reemplazan las líneas base por cultivos anuales, mostrando un menor impacto el establecimiento de pasturas (aunque sería recomendable aumentar el número de casos de estudio para establecer generalizaciones; Tabla 9).

8.3.2.6.- *Chaco Seco*: En esta ecorregión se ha obtenido una mayor cantidad de casos en las dos clases de la línea base y en la de usos alternativos, y muy pocos casos para las clases dentro de las plantaciones forestales (de 1 a 4 casos por clase; Tabla 9, Figura 11). Esto se debe a que se ha realizado un gran esfuerzo en la investigación, reflejado en la cantidad de publicaciones que atienden al impacto de la introducción de cultivos agrícolas o la cría de ganado en esta ecorregión. Este desbalance en el número de casos de estudio no permite realizar un análisis estadístico comparando las clases de uso de la tierra (e.g. el impacto sobre el COS de la introducción de un determinado género forestal). Sin embargo, es necesario resaltar que se analizaron las diferencias entre los valores promedios del Uso de la tierra siendo las mismas significativas, demostrando una menor cantidad de COS en el Uso alternativo del suelo (Tabla 6). Esta ecorregión tuvo un valor promedio de COS de 54,4 Mg/ha, siguiendo los usos de suelo el siguiente orden: Plantaciones forestales (promedio aprox. 67 Mg/ha) > Línea base (promedio aprox. 55 Mg/ha) > Usos alternativos (promedio aprox. 42 Mg/ha; Figura 11). En este relevamiento se han encontrado valores muy contrastantes de COS entre las clases de usos del suelo de la línea base, mostrando que los valores de las plantaciones son similares con una tendencia a ser mayores (Tabla 9). En este sentido, el grado de degradación del bosque nativo determina el COS, perdiendo entre el 40 y 88% del COS por el efecto negativo del sobrepastoreo o el cambio de uso de la tierra a cultivos (Abril et al. 2001; Conti et al. 2014). Por otro lado, al tener en cuenta el uso alternativo del suelo, los cambios en la cantidad de COS en sitios deforestados no difirieron según el tipo de cobertura herbácea (pastura o cultivos anuales) aunque sí la densidad de suelo (Osinaga et al. 2018). Esta ausencia de diferencia puede deberse al tiempo transcurrido desde la deforestación, sumado al efecto directo de la proporción de uso destinado a los distintos cultivos. Así, Villarino et al. (2017) nos muestra el efecto de ambas variables sobre el COS en suelo sometidos a la agricultura, mostrando que el tiempo bajo cultivo y el cultivo de soja con efectos negativos, y al maíz o a la biomasa aportada por la cobertura vegetal con un efecto positivo. Otros estudios muestran que sin bien hay pérdidas significativas en el contenido de C del suelo (%) en relación al estado de conservación del bosque, el almacenamiento total no varió por los aumentos en la densidad del suelo observados en los sitios menos conservados (Bonino, 2006). A manera de conclusión general, el reemplazo de bosque nativo por la agricultura conlleva a pérdidas de COS, efecto que no sería de tal magnitud (incluso se espera en promedio un aumento de COS) al incorporarse plantaciones forestales.

Tabla 9.- Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en las ecorregiones del Chaco Húmedo y Seco. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre clases dentro de cada Ecorregión. * No se pudo evaluar por desbalance en el número de observaciones.

Ecorregión		Chaco Húmedo			Chaco Seco			
		Media	DE	n		Media	DE	n
Línea Base	Bosque Nativo	77,98	14,91	13	A	57,91	37,4	37
	Pastizal	66,04	34,27	6	AB	38,86	17,15	8
Plantaciones Forestales	<i>Eucalyptus</i> spp	50,31	12,83	8	B	78,32		1
	<i>Pinus</i> spp	--	--	--		58,43	12,41	3
	Plantación con Nativas	71,84	24,79	9	AB	70,91	7,99	4
Usos alternativos	Cultivos anuales	47,75	12,59	11	B	44,14	13,28	22
	Arbustal	--	--	--		29,01	5,76	10
	Pastura	59,49	8,89	5	B	64,85	18,52	3
Grados libertad				23				
Valor F				6,36				
Valor p				<0,001				
Significancia				Significativo		*		

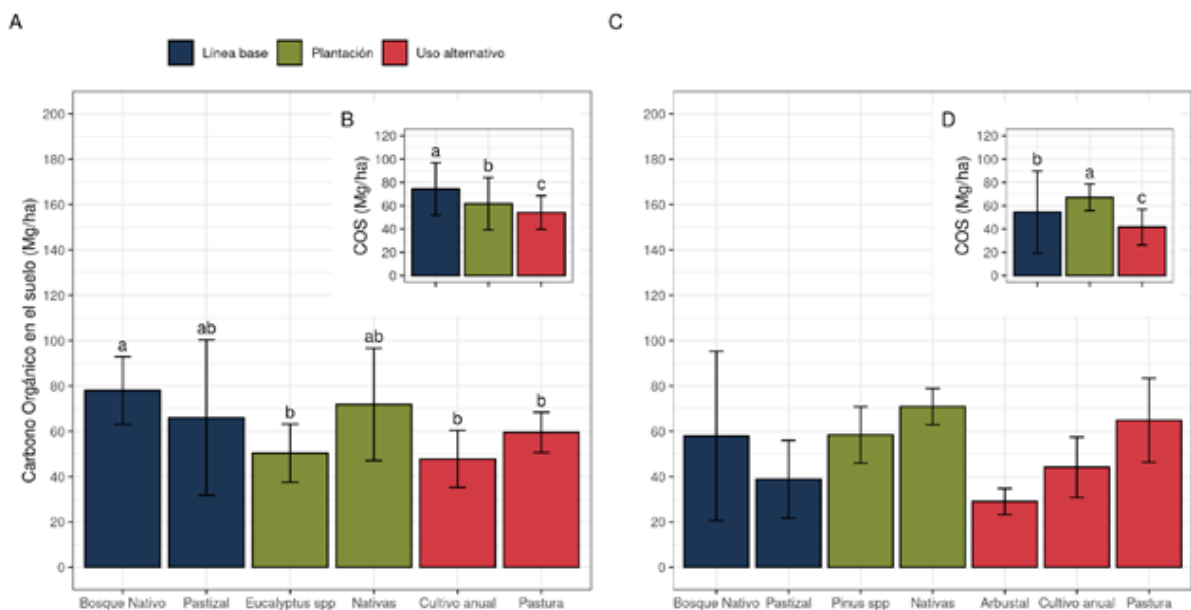


Figura 11.- Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Chaco Húmedo (A y B) y Chaco Seco (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que los B y D por Uso de la tierra. Letras distintas indican diferencias significativas (P<0,05).

8.3.2.7.- *Pampeana*: Para el caso de las ecorregiones Pampa y Delta del Paraná se destaca el contraste de resultados encontrados más allá de la cercanía geográfica entre ambas. Si bien en ninguna de las dos ecorregiones se observaron diferencias significativas entre Usos del suelo (Tabla 6), el valor promedio de COS fue de 73,9 y de 43,3 Mg/ha para la Ecorregión de la Pampa y Delta del Paraná, respectivamente, lo que pone en evidencia las variaciones ambientales. Para la ecorregión Pampeana, si bien la significancia muestra un valor marginal ($p= 0,055$), el Bosque nativo de Línea base mostró el mayor valor promedio de COS (95,0 Mg/ha; Tabla 10). Con valores intermedios, se destacan las clases de uso Pastizal (78,1 Mg/ha) y las plantaciones con *Pinus* spp. (94,4 Mg/ha; Tabla 10). Las plantaciones con *Eucalyptus* spp. y *Populus* spp. mostraron los menores valores de cantidad de COS junto al Uso alternativo de Cultivos anuales (COS promedio de 57 Mg/ha; Tabla 10, Figura 12). Estos resultados son congruentes con las observaciones de Berhongaray et al. (2013) quienes indican que, en promedio, el uso agrícola del suelo proveniente de bosque nativo generó pérdidas del 16% del COS en los primeros 50 cm de suelo. Estos resultados ponen de manifiesto lo resaltado en la Figura 8, en donde la introducción de plantaciones con *Pinus* spp. no generaría cambios negativos en el COS en relación con la línea base. Más allá del valor promedio, es posible encontrar ejemplos en donde la introducción de forestaciones con *P. radiata* en pastizales puede incrementar el COS. Así, la introducción en las sierras de Ventania y en la zona de dunas marítimas de forestaciones con *P. radiata* significó aumentar el doble o más de COS comparado con el de los pastizales de la región (Amiotti et al. 2014; Garay et al. 2015). En el caso de las dunas, se detalla además un mayor efecto en la zona media que en la cresta y en la base de la duna, lo que habla del efecto de variables ambientales sobre la magnitud que puede alcanzar este servicio ecosistémico (Amiotti et al. 2014). Este aspecto lo trataremos con más detalle en el punto 8.4.4 en donde analizamos el efecto de los factores ambientales y de manejo silvícola. Los estudios en donde analizan la dinámica de C en suelos pampeanos en donde se reemplazaron pastizales por forestaciones con *Eucalyptus* spp. encontraron que, en promedio, los suelos debajo de estas forestaciones mostraron un mayor COS (Berthong et al, 2012; Berhongaray et al. 2013), aunque también detallan una considerable interacción entre el balance hídrico del sitio y la edad de las forestaciones (Berthong et al. 2012). Sin embargo, más allá de esto, es importante resaltar que estos trabajos hacen hincapié sobre la necesidad de generar forestaciones de al menos 40 años en los sitios con más de 1500 mm de PMA para poder reestablecer valores positivos de COS en relación a la línea de base (Berthong et al. 2012). Esto, además de exceder los turnos de corta esperados, podría acarrear otros problemas relacionados con la redistribución de sales (Milione et al. 2020a). Estas observaciones ponen hincapié en la necesidad de realizar estudios más puntuales atendiendo cuestiones ambientales particulares (e.g. afloramientos rocosos, dunas, bajos, etc.) para desarrollar normas de manejo que atiendan la necesidad de producir madera en conjunto con maximizar la capacidad de almacenar COS:

8.3.2.8.- *Delta del Paraná*: Por el contrario, en la ecorregión de Delta del Paraná se encontraron diferencias altamente significativas entre los distintos usos del suelo, observándose que las forestaciones con *Populus* spp. y *Salix* spp. obtuvieron los mayores promedios de cantidad de COS (56,3 Mg/ha) seguidas por las plantaciones con *Eucalyptus* spp. que mostraron el menor valor absoluto (34,3 Mg/ha; Tabla 10). Los Pastizales de la Línea base mostraron un valor intermedio en relación a las plantaciones (COS promedio de 39,4 Mg/ha; Tabla 10, Figura 12). En esta ecorregión, ocurren episodios periódicos de inundaciones como producto de la fluctuación del nivel del Río de la Plata. Para evitar esto, se han erigido distintos tipos de protecciones que favorecen el drenaje o evitan la entrada del agua. Dadas las diferentes capacidades de tolerar anegamientos, las plantaciones de *Salix* spp. se realizan, en mayor grado, en suelos con altas posibilidades de inundación reservando los sitios más protegidos para el cultivo de *Populus* spp. Estos cambios

hidrológicos sumado al efecto de la vegetación generan una compactación de los primeros 10 cm pero una expansión a los 30-50 cm de profundidad de suelo en los sistemas indicados (Ceballos et al. 2013). Por esta razón, es importante tener en cuenta este efecto en el momento de determinar el impacto ambiental por el cambio de uso de la tierra. En este marco productivo, el C almacenado en el suelo entre los 10 y 25 cm fue 154% veces superior en la plantación de *Populus* spp. que en los pastizales inundables (Ceballos et al. 2013). Por el contrario, Vicari et al. (2010) encontró un mayor contenido de materia orgánica en los pastizales que en plantaciones de *Salix* spp., ambos en el mismo sistema inundable. Cabe resaltar que el COS de los pastizales difirió más de 6 veces dependiendo la especie herbácea.

Tabla 10. Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de Pampeana y Delta del Paraná. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre clases dentro de cada Ecorregión.

Ecorregión		Pampeana				Delta del Paraná			
		Media	DE	n	A	Media	DE	n	A
Línea Base	Bosque Nativo	95,03	71,44	9	A	--	--	--	
	Pastizal	78,09	45,11	38	AB	39,36	24,52	10	B
Plantaciones Forestales	<i>Eucalyptus</i> spp	54,19	33,05	53	B	34,15	19,76	7	C
	<i>Pinus</i> spp	94,38	55,13	25	AB	--	--	--	
	<i>Populus</i> spp	34,88	5,31	5	B	45,3	21,46	13	A
	<i>Salix</i> spp	--	--	--		67,34	36,92	9	A
Usos alternativos	Cultivos anuales	81,99	41,48	23	B	--	--	--	
	Grados libertad				103				13
	Valor F				2,25				16,56
	Valor p				0,055				<0,001
	Significancia				Marginal				Significativo

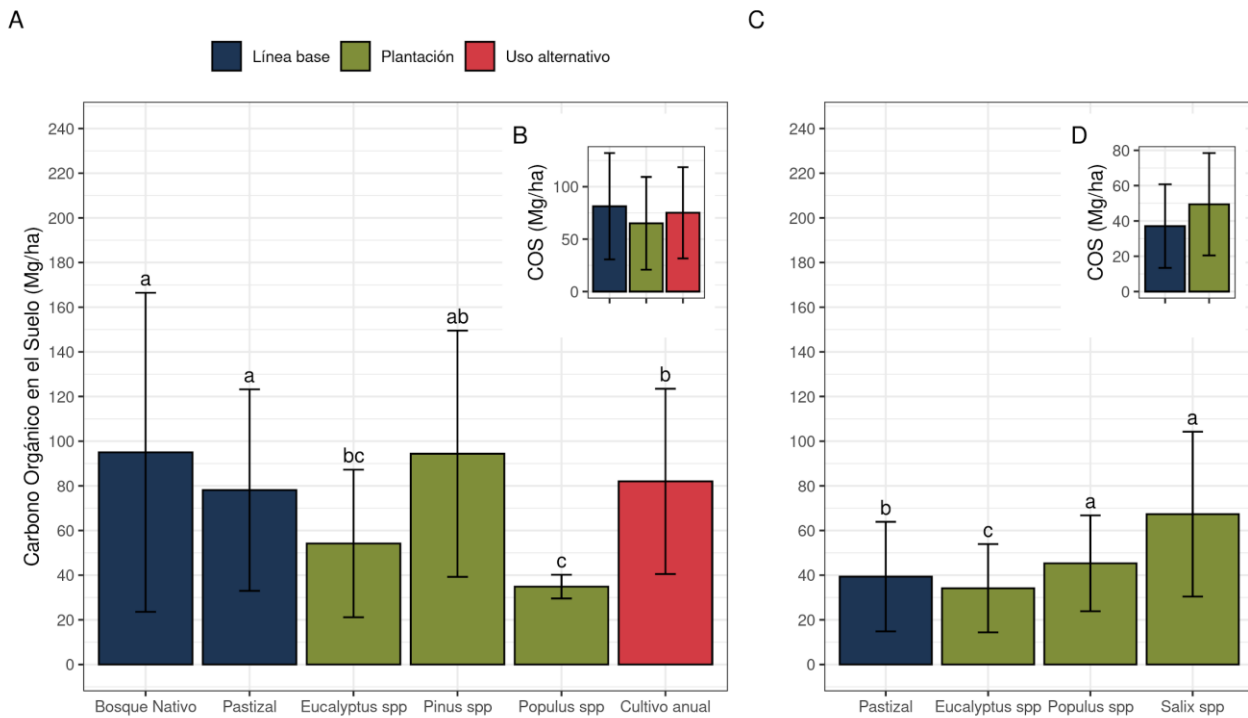


Figura 12.- Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Pampa (A y B) y Delta del Paraná (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que los B y D por Uso de la tierra. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

8.3.2.9.- Espinal: Si bien se observaron diferencias entre los usos del suelo de la ecorregión del Espinal (aunque con un valor de P marginal, $P = 0,08$; Tabla 6), no se observaron diferencias significativas entre las distintas clases de usos del suelo (Tabla 11). En promedio, esta ecorregión muestra valores de COS de 57,7 Mg/ha. Es interesante resaltar que el COS significó del 63 al 71% del total de C de los bosques de *P. caldenia* (González Roglich et al. 2014) y un 73% en el NO de Entre Ríos (Sabattini et al. 2021), lo que pone de manifiesto la necesidad de incrementar el nivel de conocimiento que se tiene sobre estos ecosistemas y sus distintos usos del suelo. Más allá de las diferencias absolutas entre los promedios, la alta variabilidad encontrada enmascaró las posibles diferencias estadísticas (Tabla 11, Figura 13). De manera similar a los bosques nativos chaqueños, el estado de conservación (densidad y cobertura arbórea) ejerce una fuerte influencia sobre el COS, duplicando los valores del bosque cerrado con respecto al estado de arbustal, y triplicándolo con respecto al pastizal (González Roglich et al. 2014). En el espinal de Entre Ríos, la posición en el paisaje y su interacción con la dinámica del agua y la vegetación determina marcados efectos sobre el COS (Sabattini et al. 2021), lo que exige ser cuidadosos a la hora de predecir el impacto de las forestaciones en esta parte de la ecorregión. Para bosques *P. caldenia* en similar estado de conservación, no se encontraron diferencias en el COS con plantaciones de *P. halepensis*, mostraron valores superiores al uso alternativo de cultivos anuales (Riestra et al. 2012). Estos autores también describen que el COS aumenta en relación al contenido de limo o de limo + arcillas del suelo y la cobertura vegetal (Riestra et al. 2012; González Roglich et al. 2014), incrementándose las diferencias de COS entre la cobertura leñosa con el cultivo en los suelos más finos (Riestra et al. 2012). Por otro lado, la cantidad total de C del ecosistema se relaciona linealmente con el limo y la

PMA, mostrando pendientes similares independientemente del estado de degradación del bosque nativo (González Roglich et al. 2014). Las diferencias se observan en la ordenada al origen, en donde el valor disminuye en relación al estado de conservación. Finalmente, la deforestación del bosque nativo y posterior uso de la tierra para cultivos determina pérdidas de COS, cuyo impacto dependerá si es un cultivo anual (e.g. soja o sorgo), pasturas o una rotación entre estos cultivos (Wilson et al. 2012).

8.3.2.10.- *Monte*: A pesar de que las diferencias entre los usos del suelo en la ecorregión del Monte no fueron significativas (COS promedio de 47,3 Mg/ha, Tabla 6), sí se encontraron diferencias entre las clases de uso de la tierra. La clase de la línea base denominada por el pastizal mostró los mayores valores de cantidad de COS, seguidos por el uso alternativo de cultivos leñosos y *Populus* spp., mostrando estos últimos un valor intermedio, siendo similar al sistema de bosque nativo (Tabla 11, Figura 13). Un aspecto importante a tener en cuenta es que, si bien las forestaciones se encuentran dentro de esta ecorregión, están situadas en los valles irrigados de Mendoza y Río Negro (Figura 7), por lo que la comparación con sistemas de la línea base pueden no ser estrictamente comparables, sobre todo con el bosque nativo. Posiblemente la mejor comparación se realice comparando el COS de las forestaciones con los cultivos leñosos. Bajo esta circunstancia, no se observan diferencias significativas entre sí, aunque los suelos debajo de forestaciones de *Populus* spp. muestran una tendencia a ser menores. Mirando la ecorregión como un todo, es necesario ser cautos con los valores encontrados, recomendándose un mayor esfuerzo de muestreos para poder aumentar la precisión del resultado obtenido.

Tabla 11.- Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la Ecorregión del Espinal y del Monte. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos. Las últimas cuatro filas son el resultado de modelos lineales generalizados mixtos aplicados para evaluar diferencias en el COS entre tipos de clases y uso de la tierra.

Ecorregión		Espinal			Monte			
		Media	DE	n	Media	DE	n	
Línea Base	Bosque Nativo	65,51	29,13	9	22,33	12,25	5	C
	Pastizal	--	--	--	78,78	21,05	3	A
Plantaciones Forestales	<i>Eucalyptus</i> spp	66,29	28,94	3	--	--	--	
	<i>Pinus</i> spp	74,45	45,43	4	--	--	--	
	<i>Populus</i> spp	--	--	--	47,07	14,22	6	BC
Usos alternativos	Cultivos anuales	45,65	29,32	7	--	--	--	
	Cultivos Leñosos	--	--	--	51,27	22,25	6	B
				11				9
Grados libertad								
Valor F				2,52				5,12
Valor p				0,11				0,025
Significancia				No significativo				Significativo

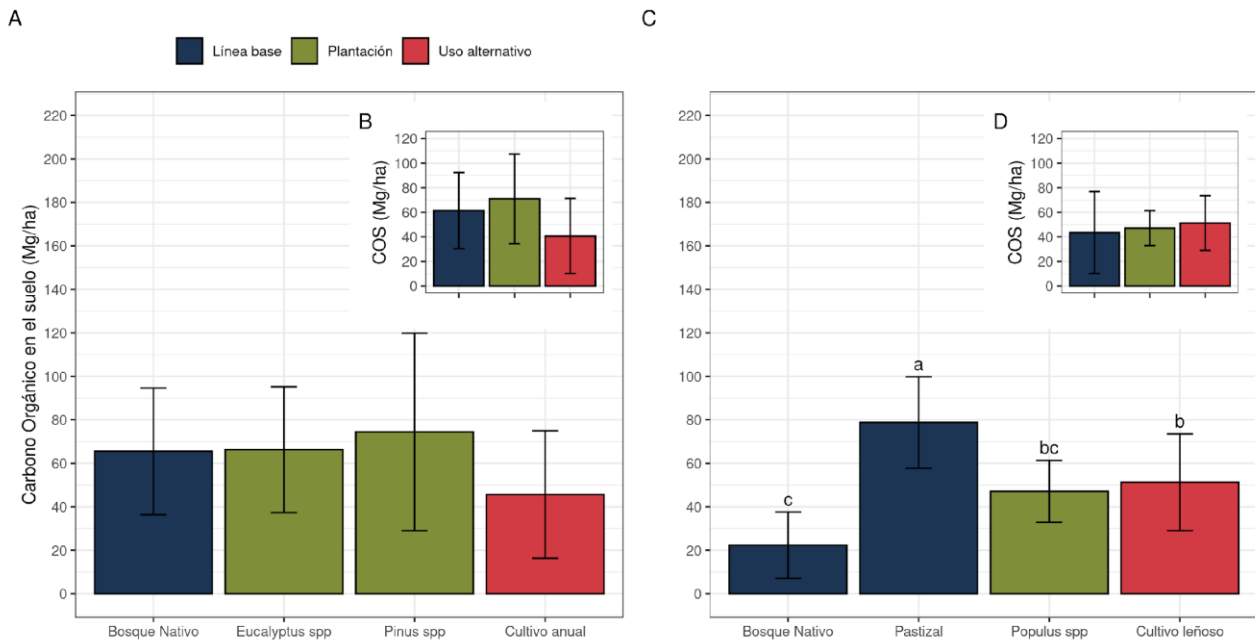


Figura 13.- Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión del Espinal (A y B) y de Monte (C y D). Los paneles A y C muestran los valores de COS por Clase de Uso de la tierra mientras que los B y D por Uso de la tierra. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

8.3.2.11.- Estepas y Bosques Patagónicos: En el caso de la región Patagónica, dado que las plantaciones forestales se distribuyen en la zona ecotonal entre la estepa y bosque nativo, existen datos de la línea base o referencia tanto con una cobertura leñosa como de pastizal natural. En este sentido, el COS promedio de los sitios de la clase Bosque Nativo (76,45 Mg/ha) y Pastizal (47,91 Mg/ha) muestran diferencias significativas, teniendo el mayor y menor valor, respectivamente (Tabla 12, Figura 14). A la vez, el COS de las plantaciones forestales de pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) muestra un valor intermedio (62,17 Mg/ha), aunque significativamente distinto. Dada las diferencias entre las dos clases de la Línea Base, no se detectaron diferencias significativas cuando se analizaron los promedios por uso de la tierra (Tabla 12, Figura 14). Desde el punto de vista forestal, no se introducen forestaciones en las zonas más anegables de los mallines, sitios que también presentan la mayor productividad y acumulación de MO y por lo tanto de C (de Koning et al. 2002). En este sentido, la comparación entre la línea base de pastizal se produce en zona de secano. Los resultados de este estudio difieren a las conclusiones arribadas en el trabajo de Koning et al. (2002) ya que estos autores encontraron mayor COS en los primeros 50 cm de suelo de bosques de ciprés de la cordillera que en el pastizal y en plantaciones de *P. ponderosa*, no mostrando diferencias significativas entre estos dos últimos. Es interesante resaltar del estudio de Koning et al. (2002) que el contenido de C en el suelo en bosques de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*, árbol nativo de estos bosques) mostró un incrementó con la edad del mismo, mientras que en las forestaciones con *P. ponderosa* se relacionó solamente con la biomasa. Es importante este tipo de acotación teniendo en cuenta los esfuerzos que se están realizando para realizar plantaciones comerciales con dicha especie nativa.

Tabla 12. Resumen descriptivo de los valores de cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo (Mg/ha) en diferentes tipos de usos del suelo en la ecorregión de Bosques y Estepa Patagónica. Se muestran los valores medios, máximos y mínimos para cada clase dentro de los tres tipos de uso de la tierra definidos. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre clases dentro de cada Ecorregión.

Ecorregión		Estepa y Bosque Patagónicos			
		Media	DE	N	
Línea Base	Bosque Nativo	76,45	34,37	40	A
	Pastizal	47,91	27,04	57	C
Plantaciones Forestales	<i>Pinus spp</i>	62,17	39,91	71	B
	Grados libertad				94
	Valor F				8,1
	Valor p				<0,0001
	Significancia				Significativo

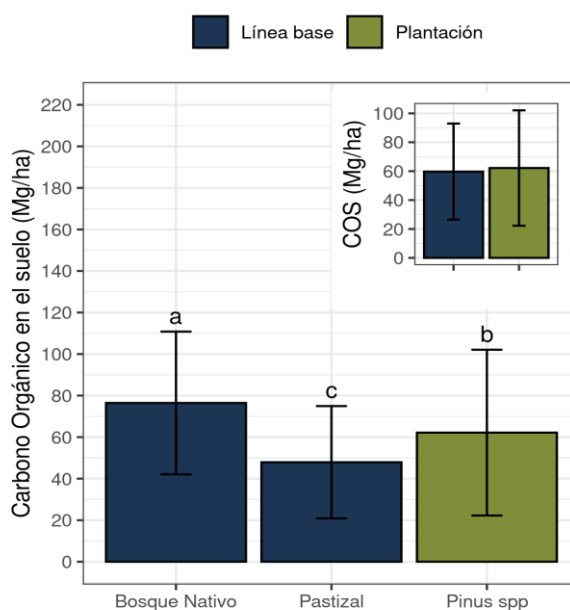


Figura 14.- Cantidad de COS (Mg/ha) en los primeros 30 cm del suelo para la Ecorregión de Estepa y Bosques Patagónicos clasificados por clases de Uso de la tierra. Las plantaciones forestales analizadas fueron todas realizadas con Pino ponderosa (*Pinus ponderosa*). El panel inserto muestra los valores promedio para la Línea Base y Plantaciones forestales. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0,05$).

En esta ecorregión es posible visualizar un patrón similar a lo descrito para otras regiones del mundo, en donde el COS aumenta cuando se introducen plantaciones en sitios con menores niveles de C previa a la forestación, y ocurre lo contrario en los sitios con mayores valores de COS (e.g. Hong et al. 2020). A la vez, en promedio, hay una ganancia de COS cuando se introducen forestaciones en sitios de pastizal y pérdidas cuando se introducen en zonas de bosques (Figura 15 A). Es interesante resaltar que estos patrones de diferencias de COS no se reflejan en el gradiente pluviométrico, sino que son productos de otros factores ambientales, como puede ser la productividad primaria neta anual o la composición mineralógica de las arcillas (de Koning et al. 2002). Otro factor interesante

para resaltar es que la hojarasca de *P. ponderosa* muestra una menor tasas de descomposición que la de la vegetación nativa que se contrapone con su mayor productividad, lo que conlleva a una mayor tasa de acumulación de detritos (Araujo et al. 2020).

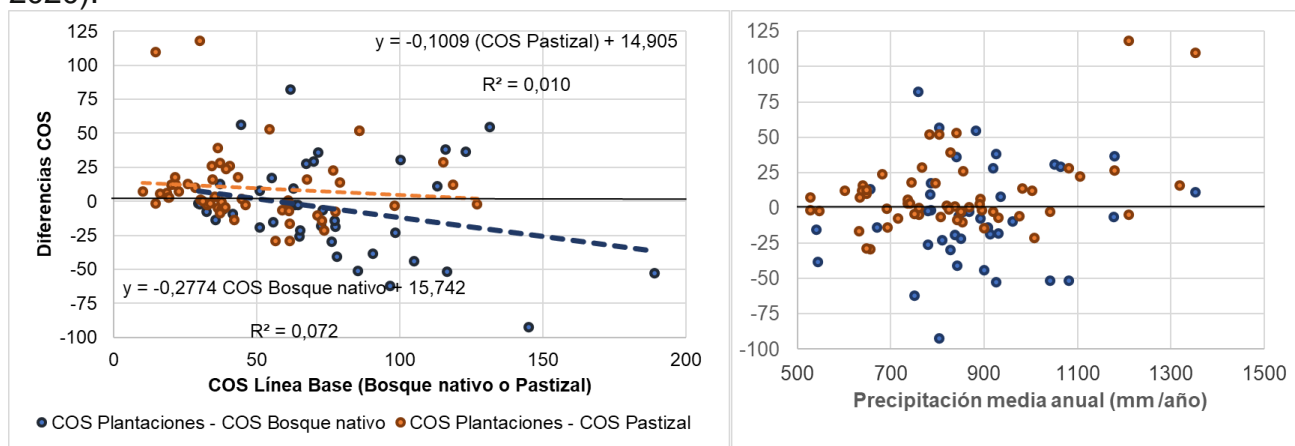


Figura 15.- Diferencias entre el COS de los primeros 30 cm de suelo de las Plantaciones forestales con el COS de las clases del Uso de la tierra Línea base en relación al COS de la situación vecina que representa la Línea base (A) y en relación a la Precipitación media anual del sitio (B).

8.4.- Efecto de factores biológicos y ambientales sobre el almacenamiento de C en suelos forestados por región forestal

Como se mencionó en la introducción, se han delimitado siete regiones forestales en el país las que se generaron por características ambientales que favorecen la producción forestal de ciertas especies y que se asocian con distintos grados de industrialización de la misma (punto 4.3). El análisis de los factores que delimitan los cambios del COS por región forestal se justifica por la presencia de la misma especie o genotipo que se establecen en un gradiente ambiental que a veces, cubre más de una ecorregión. De esa manera, es factible poder estimar la relación entre la magnitud del COS y las variables ambientales (climáticas y arcilla en suelo) y de manejo silvícola (Género y edad; Tabla 2). En este marco, se analizó el grado de asociación entre el COS y cada una de las variables ambientales de manera individual. Seguido a ello, se analizó el efecto del manejo silvícola (especie forestal cultivada y edad de la plantación) para finalizar con un análisis conteniendo todas las variables ambientales y de manejo para detectar en conjunto, cuáles de ellas son las que más peso tienen para explicar la variación de COS en toda la región forestal, independientemente de la clase de uso de Plantación.

8.4.1.- Región Mesopotámica

Esta región forestal cubre las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones. Allí se plantan, en mayor grado, *Pinus taeda* (en mayor medida en Misiones y al N de Corrientes) y *Eucalypts grandis* (la mayor superficie forestada se encuentra en Entre Ríos).

El primer análisis estadístico (modelo univariado) permite detectar cuáles de los factores ambientales muestran una mayor correlación lineal con el COS. Este análisis indicó que las variables relacionadas con la distribución de la precipitación anual (el coeficiente negativo indica que mientras menos variación anual tenga el sitio, mayor será la cantidad de COS) y la cantidad de precipitaciones en el mes más seco, o en el cuarto más seco o más frío (coeficientes positivos lo que indican que a mayor precipitación también será mayor el COS)

explican en mayor grado la variación de COS. Por otro lado, se destaca el contenido de arcilla del suelo con un r^2 relativamente alto (Tabla 13).

Tabla 13.- Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Mesopotamia (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))). En color se indican las variables cuya asociación fue significativa ($p < 0,05$), mientras que la gradación de verdes indica el grado de asociación, siendo las más oscuras las de mayor r^2 .

Predictor ambiental	Ordenada	DE ord	Pendiente	DE pend	LR	pVal	r^2
Temperatura Media Anual (TMA)	3,054	1,067	0,049	0,054	0,78	0,3772	0,01
Rango medio diario de temperatura	1,15	1,077	0,227	0,085	6,54	0,0105	0,07
Rango isotermal	1,61	0,843	0,047	0,016	8,29	0,004	0,08
Estacionalidad de temperatura (DE)	5,621	0,59	-0,039	0,014	8,15	0,0043	0,08
Temperatura Máxima del mes más cálido	10,262	2,763	-0,193	0,085	4,46	0,0348	0,04
Temperatura mínima del mes más frío	3,966	0,384	0,007	0,048	0,02	0,8842	0
Rango anual de temperatura (Max-min)	6,012	1,401	-0,081	0,057	2,17	0,1405	0,02
Temperatura media del cuarto más húmedo	5,821	0,789	-0,082	0,036	5,43	0,0198	0,05
Temperatura media del cuarto más seco	3,03	0,495	0,067	0,033	4,22	0,0399	0,04
Temperatura media del cuarto más cálido	7,103	1,895	-0,124	0,076	2,18	0,1401	0,02
Temperatura media del cuarto más frío	3,161	0,58	0,06	0,04	2,22	0,136	0,02
Precipitación anual	2,767	0,369	0,001	0	11,8	0,0006	0,12
Precipitación del mes más húmedo	2,444	0,494	0,01	0,003	10,45	0,0012	0,1
Precipitación del mes más seco	2,616	0,27	0,018	0,004	21,99	0,0001	0,21
Variación interanual de la precipitación	5,848	0,297	-0,089	0,014	31,99	0,0001	0,26
Precipitación del cuarto más húmedo	2,584	0,469	0,003	0,001	10,05	0,0015	0,1
Precipitación del cuarto más seco	2,772	0,264	0,005	0,001	19,92	0,0001	0,19
Precipitación del cuarto más cálido	2,926	0,384	0,003	0,001	8,08	0,0045	0,08
Precipitación del cuarto más frío	2,949	0,238	0,004	0,001	17,54	0,0001	0,17
Contenido de Arcilla en los primeros 30cm de suelo	3,061	0,141	0,031	0,004	35,93	0,0001	0,29

Por el contrario, no se observaron correlaciones significativas entre la variación del COS y las variables relacionadas con el manejo silvícola (género de especie plantada y edad de la forestación). Esto se condice con varias publicaciones que analizaron este aspecto en sitios particulares dentro de la región o en ambientes similares. Por ejemplo, no se encontró un efecto de la edad de *E. grandis* sobre el COS en plantaciones que llegaban a 10 años de edad localizadas en la provincia de Entre Ríos (Sandoval Lopez et al.2020; Lupi et al. 2021). La falta de relación de cambios de COS con la edad también se analizó en estudios llevados

adelante en Uruguay, en donde se evaluó el cambio de COS en plantaciones de 8 años de edad de *E. grandis* y *P. taeda* realizadas sobre pastizales (Hernández et al. 2016). Por el contrario, Ecclesia et al. (2012) encontraron una relación positiva entre el COS de las plantaciones y la edad, con una pendiente independiente de la PMA. Más allá del efecto de edad, la corta periódica determina cambios en los flujos de C que no permiten una acumulación de COS tal que alcance los valores observados en los bosques nativos (Zaninovich et al. 2020). Estos resultados son interesantes dado que los turnos de cortas indicados para la región rondan los 18-25 años para *P. taeda* y de 8 a 14 años para *E. grandis*. De esta manera, el análisis bibliográfico sugiere que debería realizarse una preparación del terreno que menos impacte sobre el COS (como por ejemplo concentrar el tratamiento sobre la línea de plantación solamente o mantener el manejo de rebrotes), acompañado de ciclos más largos de rotación de las forestaciones y un tratamiento adecuado de los residuos de cosecha (sin quema), lo que permitiría acumular mayor cantidad de COS antes de la cosecha (Sandoval Lopez et al.2020).

Al aplicar el análisis estadístico que permite seleccionar las variables ambientales y de manejo que explican en mayor grado la variación de COS (backward selection), se determinó que las variables con mayor peso están relacionadas con la Variación interanual de la precipitación y el contenido de arcilla del suelo en los primeros 30 cm (Figura 16). El modelo se expresa matemáticamente de la siguiente manera (valor del parámetro \pm DS):

$$\text{COS} = \text{exponencial} (5,0806 \pm 0,7528 - 0,00054 \pm 0,00035 (\text{estacionalidad de la PMA}) + 0,02609 \pm 0,00745 (\text{contenido de arcilla del suelo}))$$

Si bien el modelo explica una baja proporción de la variabilidad del COS ($R^2 = 0,34$), este modelo indica que el COS aumentará en relación al contenido de arcilla y en los sitios con una mayor homogeneidad de precipitaciones y con menores niveles de PMA (Figura 16). Estos resultados acuerdan con los resultados de Lupi et al. (2021) quienes describen una relación lineal y positiva entre la cantidad de C y el de arcilla del suelo, independientemente del uso.

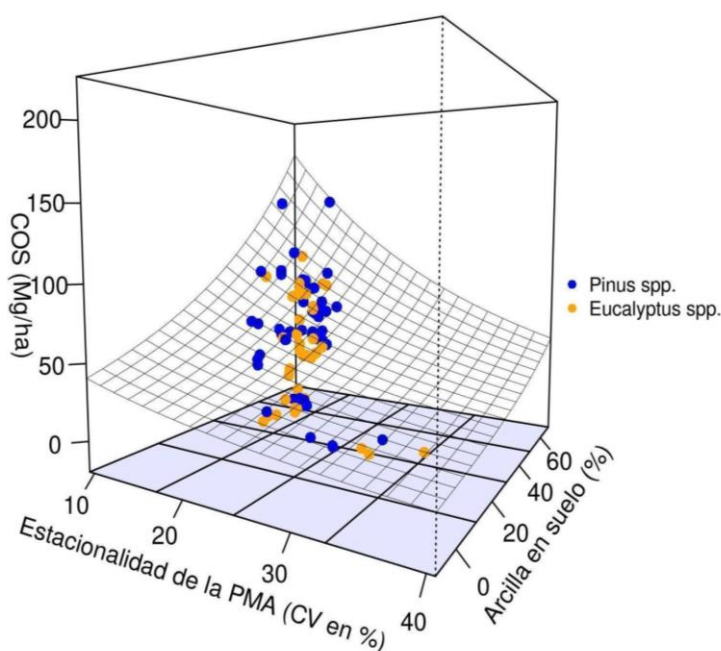


Figura 16.- Relación entre la cantidad de COS en los primeros 30 cm en relación con la estacionalidad de la PMA (CV en %; bio15 de Wordclim) y el contenido de arcilla del suelo.

8.4.2.- Región del NOA

Esta región forestal comprende tres ecorregiones, aunque la que más se destaca en términos de productividad forestal es la denominada Yungas. Esta es una región montañosa que se destaca por tener un balance hídrico positivo, aunque con gradientes de temperatura y precipitación muy marcados. En estos sitios se pueden encontrar selvas con una alta biodiversidad en la región media y baja de la montaña, pasando a pastizales en la parte superior. En este marco, las variables relacionadas con la temperatura fueron las que más se relacionaron con el COS, mostrando valores bastante altos de ajuste (r^2 entre 0,53 y 0,59 para valores medios y de 0,57 para temperaturas máximas y TMA; Tabla 14). Esta relación fue negativa tanto para los valores medios como máximos de ajuste. Aunque con menores ajustes (r^2 de entre 0,19 y 0,21), también se encontraron relaciones con las variables asociadas a las precipitaciones y al contenido de arcilla. Dado el gradiente altitudinal impuesto por las montañas se observan altos valores de correlación entre las variables, sobre todo en las que más valor predictivo mostraron. Incluso las precipitaciones se encuentran asociadas, de manera negativa, con la temperatura.

Tabla 14.- Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal del NOA (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))). En color se indican las variables cuya asociación fue significativa ($p < 0,05$), mientras que la gradación de verdes indica el grado de asociación, siendo las más oscuras las de mayor r^2 .

Predictor ambiental	Ordenada	DE ord	Pendiente	DE pend	LR	pVal	r^2
Temperatura Media Anual (TMA)	7,237	0,434	-0,156	0,025	34,36	0,0001	0,57
Rango medio diurno de temperatura	3,669	0,813	0,067	0,061	1,43	0,232	0,05
Rango isotermal	2,015	1,063	0,048	0,02	5,9	0,0152	0,19
Estacionalidad de temperatura (DE)	7,53	0,788	-0,075	0,02	13,74	0,0002	0,35
Temperatura Máxima del mes más cálido	8,519	0,656	-0,139	0,023	33,11	0,0001	0,57
Temperatura mínima del mes más frío	4,951	0,12	-0,115	0,027	16,27	0,0001	0,4
Rango anual de temperatura (Max-min)	5,585	1,517	-0,041	0,06	0,46	0,4985	0,02
Temperatura media del cuarto más húmedo	7,717	0,495	-0,147	0,022	37,19	0,0001	0,59
Temperatura media del cuarto más seco	6,094	0,37	-0,121	0,028	15,55	0,0001	0,39
Temperatura media del cuarto más cálido	7,455	0,468	-0,133	0,021	35,25	0,0001	0,58
Temperatura media del cuarto más frío	6,604	0,36	-0,174	0,03	29,39	0,0001	0,53
Precipitación anual	5,546	0,366	-0,001	0	6,03	0,0141	0,2
Precipitación del mes más húmedo	4,897	0,563	-0,002	0,003	0,33	0,5651	0,01
Precipitación del mes más seco	4,753	0,111	-0,024	0,009	6,07	0,0138	0,19
Variación interanual de la precipitación	3,407	0,405	0,013	0,005	7,35	0,0067	0,23
Precipitación del cuarto más húmedo	5,053	0,533	-0,001	0,001	0,71	0,3991	0,03
Precipitación del cuarto más seco	4,803	0,117	-0,008	0,003	7,96	0,0048	0,23

Precipitación del cuarto más cálido	4,855	0,519	-0,001	0,001	0,26	0,6074	0,01
Precipitación del cuarto más frío	4,801	0,122	-0,008	0,003	6,94	0,0084	0,21
Contenido de Arcilla en los primeros 30cm de suelo	3,431	0,405	0,064	0,023	7,29	0,0069	0,21

En relación con las variables de manejo silvícola, tanto la edad de la plantación como el género (*Eucalyptus* spp. vs. *Pinus* spp.) mostraron tener una relación significativa ($P < 0,001$). El resultado del análisis indicó que, si bien son modelos distintos para cada género, ambos mantienen una relación positiva y en el mismo sentido con la edad (Figura 17). Este aumento de COS con la edad es importante de determinar ya que permite balancear las pérdidas en los momentos iniciales de plantación. Un factor importante a tener en cuenta es que este modelo tiene como límite máximo de edad los 45 años para plantación con *Eucalyptus* spp. y de 35 años para las de *Pinus* spp.. Si bien los datos del relevamiento pudieron representarse mediante el uso de una ecuación exponencial, esto no quiere decir que las forestaciones continúen acumulando COS indefinidamente a mayores edades. En este sentido, se esperaría alcanzar un estado de equilibrio dinámico de COS máximo, momento que no se observa teniendo en cuenta el rango de edades recabadas en este informe. Manrique et al. (2020) describe que las plantaciones pueden equilibrar el C total del ecosistema en plantaciones mayores a los 40 años. Estas observaciones indican la necesidad de pensar tiempos de rotación más largos con el objetivo de acumular la mayor cantidad de reservas de C y así evitar las pérdidas que se estiman durante la cosecha y establecimiento de la nueva forestación.

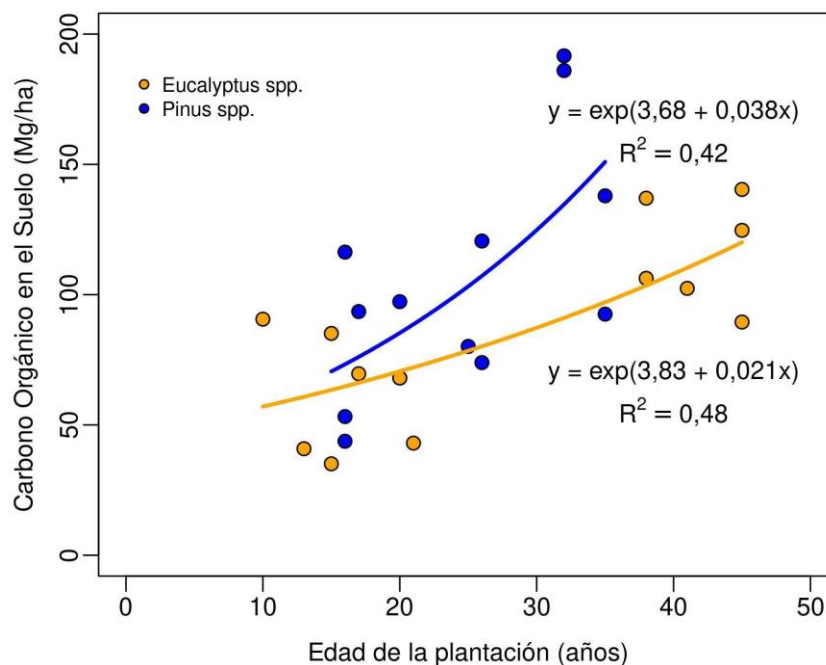


Figura 17.- Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y la edad de la forestación en plantaciones de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. en la región forestal del NOA.

El modelo obtenido teniendo en cuenta las variables ambientales y de manejo en conjunto (backward selection) alcanzó una alta capacidad de explicar la variación de COS regional ($r^2= 0,72$; $p < 0,001$). Las variables seleccionadas fueron TMA (mm) y la variación interanual de la precipitación (%); ambas con pendientes negativas, y el contenido de arcilla del suelo (%). En la Figura 18 se muestran dichas relaciones. Es importante tener en cuenta que dichas relaciones no son las mismas que la del modelo univariado, sino que reflejan el resultado de la relación entre dos variables sumados al efecto de las variables que conforman el modelo. La expresión matemática es la siguiente (parámetro \pm DS):

$$\text{COS} = \text{exponencial} (7,7985 \pm 0,8106 - 0,1944 \pm 0,309 (\text{TMA}) - 0,011 \pm 0,0047 (\text{variación interanual de la precipitación}) + 0,060 \pm 0,0175 (\text{contenido de arcilla}))$$

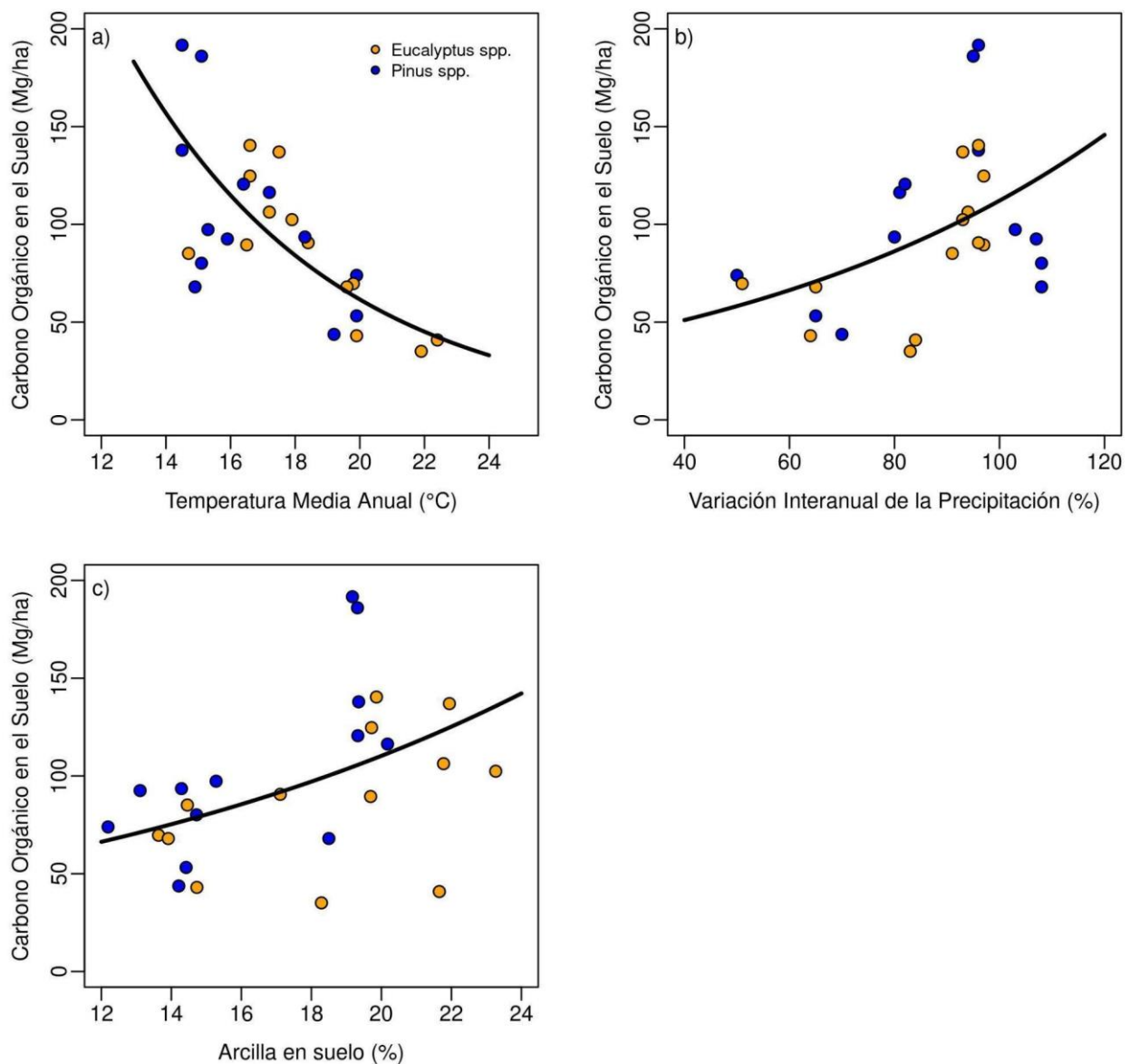


Figura 18.- Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y las variables que conforman el modelo combinado (backward selection procedure) de plantaciones de *Pinus spp.* y *Eucalyptus spp.* en la región forestal del NOA.

8.4.3.- Región Centro Norte

Esta región comprende una vasta superficie en donde se pueden observar tanto zonas de llanuras como algunas estribaciones montañosas. Incluye las provincias de Chaco, Santiago del Estero, Formosa y Córdoba. Desde el punto de vista ambiental, dentro de esta región confluyen las ecorregiones denominadas Chaco seco, Chaco húmedo y, parcialmente, el Espinal. Son escasos los bosques cultivados con especies exóticas y actualmente se presenta un fuerte apoyo a la plantación con el género *Prosopis* spp.

Desde un punto de vista ambiental, ninguna de las variables analizadas de manera independiente mostró tener una correlación con la variación de COS mayor que 0,14 (Tabla 15). En este sentido, si bien el contenido de arcilla mostró una de las mayores relaciones, el nivel de significancia fue levemente mayor al valor umbral ($p=0,0568$).

Tabla 15.- Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal Centro Norte (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))). No se obtuvieron relaciones significativas.

Predictor ambiental	Ordenada	DE ord	Pendiente	DE pend	LR	pVal	r ²
Temperatura Media Anual (TMA)	3,716	0,538	0,021	0,026	0,69	0,4057	0,03
Rango medio diurno de temperatura	5,156	0,751	-0,075	0,056	2,09	0,1483	0,07
Rango isotermal	4,401	1,538	-0,005	0,03	0,03	0,8662	0
Estacionalidad de temperatura (DE)	4,865	0,721	-0,017	0,017	1,09	0,2975	0,04
Temperatura Máxima del mes más cálido	4,138	1,004	0	0,03	0	0,9902	0
Temperatura mínima del mes más frío	3,993	0,171	0,021	0,021	1,02	0,3137	0,04
Rango anual de temperatura (Max-min)	5,099	0,759	-0,037	0,029	1,87	0,172	0,07
Temperatura media del cuarto más húmedo	3,68	0,716	0,018	0,028	0,45	0,5028	0,02
Temperatura media del cuarto más seco	3,847	0,34	0,02	0,023	0,86	0,3531	0,03
Temperatura media del cuarto más cálido	3,632	0,781	0,02	0,03	0,46	0,4963	0,02
Temperatura media del cuarto más frío	3,851	0,342	0,02	0,023	0,83	0,3616	0,03
Precipitación anual	3,95	0,277	0	0	0,63	0,4282	0,02
Precipitación del mes más húmedo	3,765	0,515	0,003	0,004	0,61	0,4353	0,02
Precipitación del mes más seco	4,065	0,134	0,004	0,006	0,57	0,4521	0,02
Variación interanual de la precipitación	4,175	0,266	0	0,005	0,01	0,9199	0
Precipitación del cuarto más húmedo	3,653	0,473	0,001	0,001	1,27	0,2595	0,05
Precipitación del cuarto más seco	4,063	0,14	0,001	0,002	0,52	0,4714	0,02
Precipitación del cuarto más cálido	3,681	0,488	0,001	0,001	1,04	0,3082	0,04

Precipitación del cuarto más frío	4,025	0,142	0,002	0,002	1,02	0,3114	0,04
Contenido de Arcilla en los primeros 30cm de suelo	4,598	0,246	-0,02	0,011	3,63	0,0568	0,14

En análisis teniendo en cuenta las variables de manejo silvícola indicó que hay diferencias entre el COS de las plantaciones con especies nativas en relación a las exóticas, reflejando lo encontrado en la Tabla 10. No se encontró un efecto de la edad sobre la variación de COS.

8.4.4.- Región Pampeana

Esta región comprende las llanuras gramíneas de las Provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba. En el caso de Buenos Aires, en su porción sur aparecen las estribaciones de las sierras de Tandilia y Ventania, que se destacan sobre el paisaje plano predominante de la región. De manera similar a lo comentado en la región Centro Norte (8.4.3), las plantaciones con *Pinus* spp. se encuentran en los faldeos de las sierras mientras que las de *Eucalyptus* spp., de forma mayoritaria, están inmersos en una matriz de uso de la tierra agrícola-ganadera.

El análisis univariado no indicó la predominancia de algún factor ambiental en particular (Tabla 16). La temperatura media anual (en forma negativa), la precipitación media en el mes más seco y el contenido de arcilla del suelo (ambas relacionadas en forma positiva con el COS) fueron las variables que mostraron una mayor correlación con el COS. En este sentido, se podría decir que los lugares con menores demandas atmosféricas o con una mayor disponibilidad de agua en el período más seco, junto a suelos más arcillosos, favorecerían la acumulación de COS (Tabla 17). Resultados similares fueron descriptos por Álvarez y Lavado (1998) quienes encontraron una relación negativa entre el contenido de C del suelo (g C/kg suelo) y la TMA pero solo en un rango acotado de PMA. Es interesante resaltar que estos autores evaluaron sistemas con coberturas vegetales que no eran forestaciones.

Tabla 16.- Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Mesopotamia (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))). En color se indican las variables cuya asociación fue significativa ($p < 0,05$), mientras que la gradación de verdes indica el grado de asociación, siendo las más oscuras las de mayor r^2 .

Predictor ambiental	Ordenada	DE ord	Pendiente	DE pend	LR	pVal	r^2
Temperatura Media Anual (TMA)	7,904	0,786	-0,244	0,053	24,49	0,0001	0,28
Rango medio diurno de temperatura	5,779	0,997	-0,106	0,074	2,16	0,1417	0,03
Rango isotermal	-4,384	2,948	0,185	0,063	7,2	0,0073	0,11
Estacionalidad de temperatura (DE)	7,417	0,953	-0,059	0,018	10,86	0,001	0,16
Temperatura Máxima del mes más cálido	9,233	1,439	-0,161	0,047	13,94	0,0002	0,2
Temperatura mínima del mes más frío	4,632	0,192	-0,121	0,076	2,16	0,1416	0,03
Rango anual de temperatura (Max-min)	6,735	1,07	-0,085	0,038	5,42	0,0199	0,08
Temperatura media del cuarto más húmedo	6,451	0,988	-0,104	0,049	4,06	0,0439	0,06

Temperatura media del cuarto más seco	6,028	0,538	-0,205	0,064	11,37	0,0007	0,14
Temperatura media del cuarto más cálido	8,701	0,965	-0,205	0,045	23,76	0,0001	0,3
Temperatura media del cuarto más frío	6,209	0,541	-0,229	0,065	13,85	0,0002	0,17
Precipitación anual	3,588	0,611	0,001	0,001	1,64	0,2003	0,03
Precipitación del mes más húmedo	5,583	0,542	-0,013	0,005	4,58	0,0323	0,07
Precipitación del mes más seco	3,579	0,22	0,024	0,007	15,08	0,0001	0,21
Variación interanual de la precipitación	5,133	0,249	-0,022	0,007	13,42	0,0002	0,18
Precipitación del cuarto más húmedo	4,953	0,607	-0,002	0,002	0,77	0,3794	0,01
Precipitación del cuarto más seco	3,644	0,233	0,007	0,002	11,3	0,0008	0,16
Precipitación del cuarto más cálido	4,345	0,606	0	0,002	0	0,9771	0
Precipitación del cuarto más frío	3,662	0,229	0,007	0,002	10,99	0,0009	0,16
Contenido de Arcilla en los primeros 30cm de suelo	3,208	0,273	0,054	0,013	19,13	0,0001	0,26

Las variables relacionadas con el manejo silvícola mostraron una excelente correlación ($r^2=0,98$). Es interesante observar que, por un lado, la condición inicial de COS del sitio en donde se plantan ambos géneros es muy distinto (hay aproximadamente tres veces más COS en los sitios donde se planta *Pinus* spp. que en los sitios en donde se plantan *Eucalyptus* spp.), mientras que, por otro lado, el COS aumenta con la edad solamente en el caso de *Eucalyptus* spp. (Figura 19). Las diferencias iniciales de COS están directamente relacionadas con los ambientes en donde se introdujeron las forestaciones: faldeos orientales de las Sierras de Córdoba en el caso de los *Pinus* spp. y planicies para los *Eucalyptus* spp. lo que supone algunos cambios en la vegetación original sumado al efecto del terreno, siendo menos intensivo la preparación en la zona de sierras. En cuanto a la relación con la edad, es interesante observar patrones tan disímiles. Mientras que en plantaciones de *Eucalyptus* spp. se comprobó una relación positiva entre la edad y el COS, no se encontró diferencias para las plantaciones con *Pinus* spp. (Figura 19). Una posible explicación puede estar dada por los distintos manejos silviculturales sumado a aspectos intrínsecos de los géneros. En general, las especies de *Eucalyptus* spp. manifiestan el fenómeno de auto-poda, es decir, pierden sus ramas cuando las condiciones lumínicas no permiten el desarrollo de hojas verdes. Este fenómeno genera que aun en plantaciones sin manejo, la cobertura vertical de copas no supere, en promedio, el 60% (Milione et al. 2020a). Por el contrario, las especies de *Pinus* spp. no muestran este fenómeno, pudiendo retener una importante biomasa de ramas muertas que generan mayores porcentajes de cobertura de copas (hasta un 80%, Milione et al. 2020b). Estas características del cultivo determinan una diferencia importante en la cantidad de radiación solar que llega al suelo y que permite tanto la degradación de la materia orgánica como la aparición de otros estratos vegetales que aportan al COS. Así, Ferrerio Domínguez et al. (2022) evaluaron la evolución del contenido de C de los suelos en sistemas silvopastoriles con *P. radiata* en España, encontrando una relación lineal y negativa entre el C y la cobertura arbórea (e.g. menor COS a mayores niveles de cobertura forestal). A esto se le suma que las tasas de degradación de la hojarasca de los *Pinus* spp. suelen ser bajas (e.g. en *P. ponderosa* que

demonstró ser menor que las de hojas de especies nativas del pastizal y bosques patagónicos) (Araujo et al. 2020). En relación con las plantaciones de *Pinus* spp. que muestran valores de COS menores a 50 Mg/ha, estos son sitios ubicados en zona de suelos arenosos de las Provincias de Buenos Aires y La Pampa, en comparación con los otros sitios que se ubican en zonas serranas. Estas diferencias de sitio también se manifiestan cuando se analizan los efectos combinados de las variables ambientales, cuyo modelo indica que los sitios con menor cantidad de arcilla poseen menores reservas de COS (Figura 20). Más allá de que se los pueda separar en dos conjuntos separados, la respuesta del COS a la edad de plantación muestra pendientes positivas o neutras, pero nunca de la magnitud de los *Eucalyptus* spp.. Para este género se observa un aumento sostenido hasta alcanzar valores de COS cercanos a los 100 MG /ha a edades aproximadas a los 30 años (Figura 19). A partir de dicha edad y hasta los 80 años que fue la plantación de mayor edad en donde se obtuvo un dato y cuya edad supera ampliamente a un emprendimiento comercial, el valor de COS se mantendría relativamente estable. Otros autores describen de manera lineal la relación entre COS y la edad de las plantaciones, mostrando un comportamiento que muestran distintas ordenadas al origen pero la misma pendiente (rectas paralelas) según la PMA (e.g. Berthong et al. 2012). En este marco, este estudio pone en evidencia la necesidad de manejar las plantaciones con *Pinus* spp. bajo un esquema de baja densidad que permita la producción conjunta con un estrato herbáceo (e.g. sistemas silvopastoriles) y al mismo tiempo, evitar el impacto negativo sobre el COS.

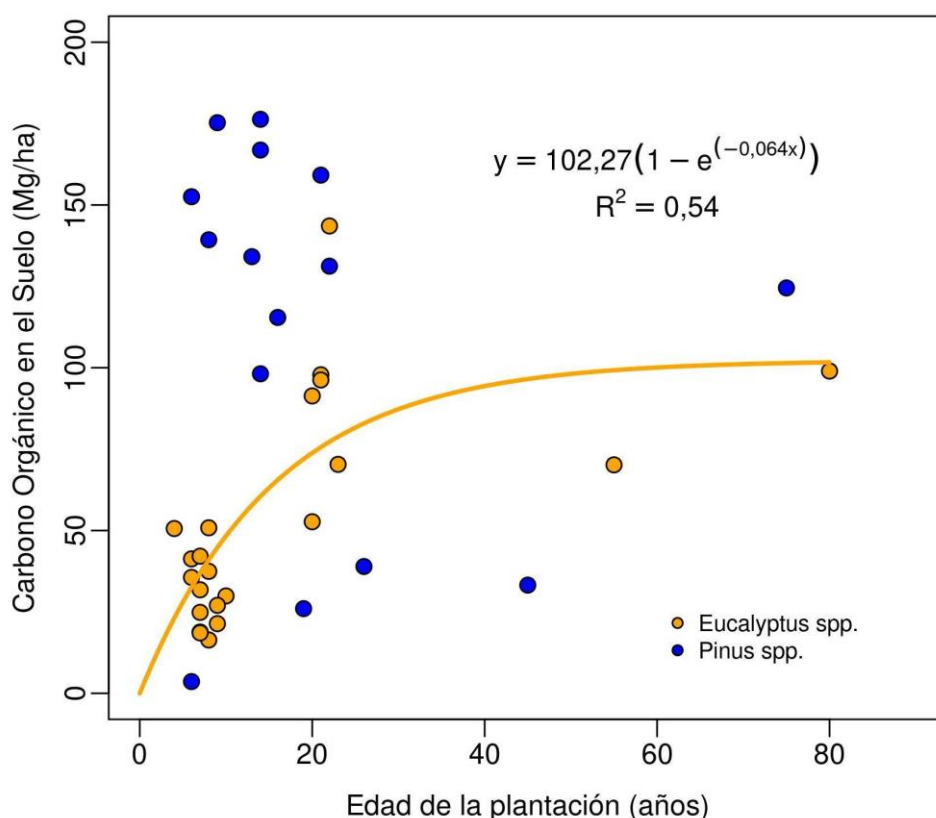


Figura 19.- Relación entre la cantidad de COS en los primeros 30 cm de suelo y la edad de la forestación en plantaciones de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. en la región forestal Pampeana. La ecuación refleja la relación entre el COS y la edad de las plantaciones con *Eucalyptus* spp.

Es interesante el modelo obtenido teniendo en cuenta las variables ambientales y de manejo silvícola en conjunto (backward selection), el cual muestra una alta capacidad de

explicar la variación de COS regional ($r^2= 0,83$; $p< 0,001$). Las variables que se destacan son la temperatura media anual (TMA) y el contenido de arcilla, en un sentido negativo y positivo, respectivamente (Figura 20).

$$\text{COS} = \text{exponencial} (8,7541 \pm 1,6127 - 0,3959 \pm 0,0789 (\text{TMA}) + 0,04938 \pm 0,01664 (\text{contenido de arcilla}))$$

Este modelo indica que en los sitios más templados y con suelos más arcillosos se encontrarían aquellos con mayor COS, independientemente del Género forestal (Figura 20).

Si bien la especie *P. halepensis* no fue incorporada al modelo, el COS en suelos forestados al NO de La Pampa mostraron una relación positiva con el contenido de limo + arcilla en los suelos (Riestra et al. 2012).

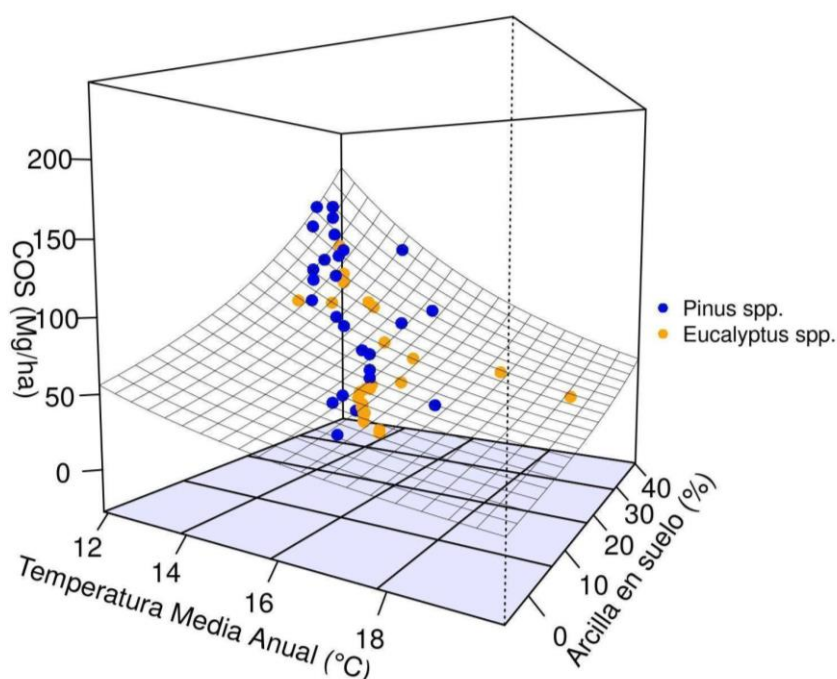


Figura 20.- Relación entre la cantidad de COS en los primeros 30 cm en relación con la Temperatura media anual (bio01 de Wordclim) y el contenido de arcilla del suelo.

8.4.5.- Región del Delta del Paraná

Esta región forestal, que ocupa el mismo espacio geográfico que la ecorregión, se caracteriza por tener un clima morigerado por la alta presencia de agua. Esto mismo se refleja en los análisis ambientales, en donde no se encontraron relaciones entre el ambiente y el COS. Sí se determinó un fuerte impacto relacionado con el manejo silvícola, en donde la selección de la clase de forestación es muy importante. Los modelos resultantes tienen en cuenta la clase forestal (*Eucalyptus* spp., *Salix* spp. y *Populus* spp.) e indican que el COS se incrementa con la edad (Figura 21). Es importante resaltar que los modelos seleccionados tienen un rango acotado de edades en los cuales aplican. Esto significa que no es posible de utilizar estos modelos para plantaciones de mayor edad que las utilizadas

ya que, de manera lógica, se esperaría alcanzar un estado de equilibrio dinámico máximo de COS. Este fenómeno no se ha observado con la información ya que las forestaciones relevadas alcanzaron las edades de 21 y 30 años para *Populus spp.* y *Eucalyptus spp.*, respectivamente. El número de casos de plantaciones con *Populus spp.* y *Eucalyptus spp.* permitió ajustar ecuaciones individuales para cada género. Si bien se observa una fuerte tendencia a incrementarse el COS con la edad el *Salix spp.* la variación de los puntos no permitió ajustar un modelo significativo que permita modelar dicha relación. Más allá de los resultados logrados, es importante incrementar el número de muestras para poder realizar una predicción más robusta del COS en base a la edad y género.

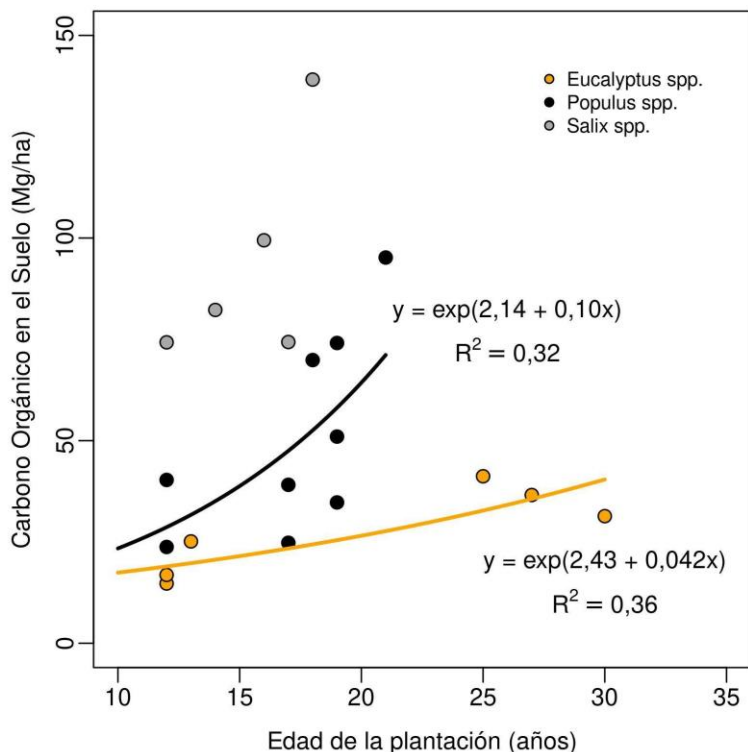


Figura 21.- Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y la edad de la forestación en plantaciones de *Populus spp.*, *Salix spp.* y *Eucalyptus spp.* en la región forestal de Delta del Paraná.

8.4.6.- Región de Cuyo y Alto Valle del Río Negro

Esta región forestal se caracteriza por el cultivo de *Populus spp.*, principalmente, en los valles irrigados inmersos en la ecorregión del monte. Si bien se cuentan con relativamente pocos valores y dispersos en el espacio (3 datos de Río Negro, 2 de Mendoza y 1 de San Juan) el análisis univariado indicó una fuerte relación del COS con la Variación interanual de la precipitación ($r^2 = 0,54$) y con el contenido de arcilla ($r^2 = 0,72$; Tabla 17).

Tabla 17.- Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Cuyo y Alto Valle del Río Negro (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x)). En color se indican las variables cuya asociación fue significativa ($p < 0,05$), mientras que la gradación de verdes indica el grado de asociación, siendo las más oscuras las de mayor r^2 .

Predictor ambiental	Ordenada	DE ord	Pendiente	DE pend	LR	pVal	r^2
Temperatura Media Anual (TMA)	4,659	0,855	-0,057	0,06	0,67	0,4113	0,14
Rango medio diurno de temperatura	0,045	3,489	0,237	0,217	1,27	0,2594	0,23
Rango isotermal	-0,431	2,399	0,085	0,048	2,62	0,1053	0,4
Estacionalidad de temperatura (DE)	6,034	1,873	-0,039	0,033	1,03	0,3094	0,2
Temperatura Máxima del mes más cálido	5,043	1,635	-0,039	0,053	0,41	0,5227	0,09
Temperatura mínima del mes más frío	3,798	0,157	-0,051	0,08	0,36	0,5483	0,08
Rango anual de temperatura (Max-min)	5,949	3,896	-0,066	0,123	0,22	0,6364	0,05
Temperatura media del cuarto más húmedo	4,004	0,38	-0,01	0,022	0,15	0,6961	0,03
Temperatura media del cuarto más seco	3,728	0,414	0,008	0,027	0,1	0,7478	0,02
Temperatura media del cuarto más cálido	4,88	1,054	-0,049	0,049	0,72	0,397	0,15
Temperatura media del cuarto más frío	4,27	0,54	-0,062	0,076	0,49	0,4834	0,1
Precipitación anual	3,625	0,364	0,001	0,001	0,38	0,5374	0,08
Precipitación del mes más húmedo	3,8	0,379	0,001	0,01	0,02	0,8886	0
Precipitación del mes más seco	3,529	0,31	0,029	0,025	0,89	0,3464	0,18
Variación interanual de la precipitación	4,402	0,274	-0,016	0,007	4,25	0,0393	0,54
Precipitación del cuarto más húmedo	3,784	0,331	0,001	0,003	0,05	0,8274	0,01
Precipitación del cuarto más seco	3,466	0,343	0,009	0,008	1,07	0,3013	0,22
Precipitación del cuarto más cálido	3,689	0,355	0,002	0,005	0,28	0,5941	0,06
Precipitación del cuarto más frío	3,832	0,222	0	0,003	0,01	0,9186	0
Contenido de Arcilla en los primeros 30cm de suelo	5,67	0,576	-0,13	0,04	9,49	0,0021	0,72

8.4.7.- Patagonia Andina

El ecotono estepa-bosque en el NO de la Patagonia (provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut) muestra un gradiente muy fuerte de precipitación en el sentido este-oeste y otro de menor magnitud en cuanto a la temperatura, dado por la altura sobre el nivel del mar y la latitud. La principal especie implantada es el *Pinus ponderosa*, especie que muestra una alta capacidad de tolerar este gradiente ambiental. De las variables ambientales, las de

mayor peso estuvieron relacionadas con la precipitación, tanto anual como en la cantidad de lluvias en el período más frío y húmedo (todas en sentido positivo) y con el contenido de arcilla en el suelo (con una relación negativa). También se destaca la variable que se refiere a la variación anual de temperatura (estacionalidad de la temperatura) con una relación negativa (Tabla 18). Esta relación positiva del COS se obtuvo con la precipitación anual también fue descrita por diversos autores para distintos usos del suelo de la región (De Koning et al. 2002; Gaitán et al. 2019; Araujo et al. 2020). En particular para Patagonia, Gaitán et al. (2019) menciona que el COS de los sistemas naturales se relacionó negativamente con la temperatura máxima, variable que no mostró relación matemática con los datos de las forestaciones. De Koning et al. (2002) destacan también que el COS de las forestaciones con *P. ponderosa* se correlacionó con la biomasa aérea de las forestaciones, elemento no tenido en cuenta aquí, pero relacionado con la disponibilidad de agua, tal como lo analizan Martínez Meier et al. (2015). Finalmente, Broken et al. (2004) detalla un efecto significativo y combinado de las precipitaciones y del Al extractable con pirofosfato en los sitios con PMA mayores a los 1000 mm/año. De esta manera, tanto la temperatura máxima como las precipitaciones tendrían un efecto indirecto sobre la COS ya que estarían afectando la productividad primaria de la cobertura vegetal.

El contenido de arcillas en el suelo se correlacionó, si bien de una manera muy débil, en forma negativa con la PMA, tal como también lo observó De Koning et al. (2002). Así, los sitios de menor contenido de arcilla estarían situados en los lugares más húmedos del gradiente pluviométrico.

En el caso del modelo relacionado con el manejo silvícola, al ser una sola especie, se testeó el efecto de la edad sobre la variación de COS. La correlación entre ambas variables no fue significativa, tal como también lo describe De Koning et al. (2002) y González Polo et al. (2019).

Tabla 18.- Relación entre las variables ambientales y el COS en la región forestal de Patagonia (COS = exponencial (ordenada + pendiente (x))). En color se indican las variables cuya asociación fue significativa ($p < 0,05$), mientras que la gradación de verdes indica el grado de asociación, siendo las más oscuras las de mayor r^2 .

Predictor ambiental	Ordenada	DE ord	Pendiente	DE pend	LR	pVal	r^2
Temperatura Media Anual (TMA)	3,788	0,803	0,04	0,094	0,19	0,6595	0
Rango medio diurno de temperatura	4,777	1,769	-0,052	0,142	0,12	0,7319	0
Rango isotermal	-1,375	2,706	0,106	0,052	3,34	0,0677	0,05
Estacionalidad de temperatura (DE)	11,957	2,16	-0,182	0,05	14,97	0,0001	0,22
Temperatura Máxima del mes más cálido	4,522	1,66	-0,017	0,074	0,05	0,8149	0
Temperatura mínima del mes más frío	4,277	0,141	0,11	0,087	1,72	0,1902	0,03
Rango anual de temperatura (Max-min)	10,216	2,915	-0,256	0,122	4,83	0,028	0,08
Temperatura media del cuarto más húmedo	3,983	0,298	0,042	0,083	0,27	0,6016	0
Temperatura media del cuarto más seco	4,238	1,087	-0,008	0,078	0,01	0,9213	0
Temperatura media del cuarto más cálido	4,6	1,298	-0,033	0,092	0,14	0,7108	0
Temperatura media del	3,796	0,279	0,11	0,09	1,66	0,1977	0,03

cuarto más frío							
Precipitación anual	2,808	0,319	0,002	0	17,49	0,0001	0,25
Precipitación del mes más húmedo	2,829	0,315	0,009	0,002	17,34	0,0001	0,24
Precipitación del mes más seco	3,335	0,245	0,035	0,011	10,55	0,0012	0,16
Variación interanual de la precipitación	6,726	0,939	-0,042	0,015	6,45	0,0111	0,1
Precipitación del cuarto más húmedo	2,645	0,366	0,004	0,001	17,1	0,0001	0,24
Precipitación del cuarto más seco	3,187	0,255	0,011	0,003	13,61	0,0002	0,2
Precipitación del cuarto más cálido	3,182	0,257	0,011	0,003	13,6	0,0002	0,2
Precipitación del cuarto más frío	2,756	0,345	0,004	0,001	16,56	0,0001	0,24
Contenido de Arcilla en los primeros 30cm de suelo	5,14	0,275	-0,08	0,02	15,33	0,0001	0,21

Cuando se analizó el efecto combinado de las variables ambientales se determinó que el COS en esta región disminuye en aquellos sitios que muestran una mayor estacionalidad y rango anual de la temperatura, siendo también afectado negativamente por el contenido de arcilla del suelo. Este modelo explicó en un 42% la variación de COS. En la Figura 22 se muestran dichas relaciones. Es importante tener en cuenta que dichas relaciones no son las mismas que la del modelo univariado, sino que reflejan el resultado de la relación entre dos variables sumados al efecto de las variables que conforman el modelo. La expresión matemática es la siguiente (parámetro \pm DS):

$$\text{COS} = \text{exponencial} (1,5273 \pm 3,8042 - 0,2596 \pm 0,786 (\text{Estacionalidad de la Temperatura}) - 0,6466 \pm 0,1925 (\text{Rango anual de la Temperatura}) - 0,0537 \pm 0,0238 (\text{Contenido de arcilla del suelo}))$$

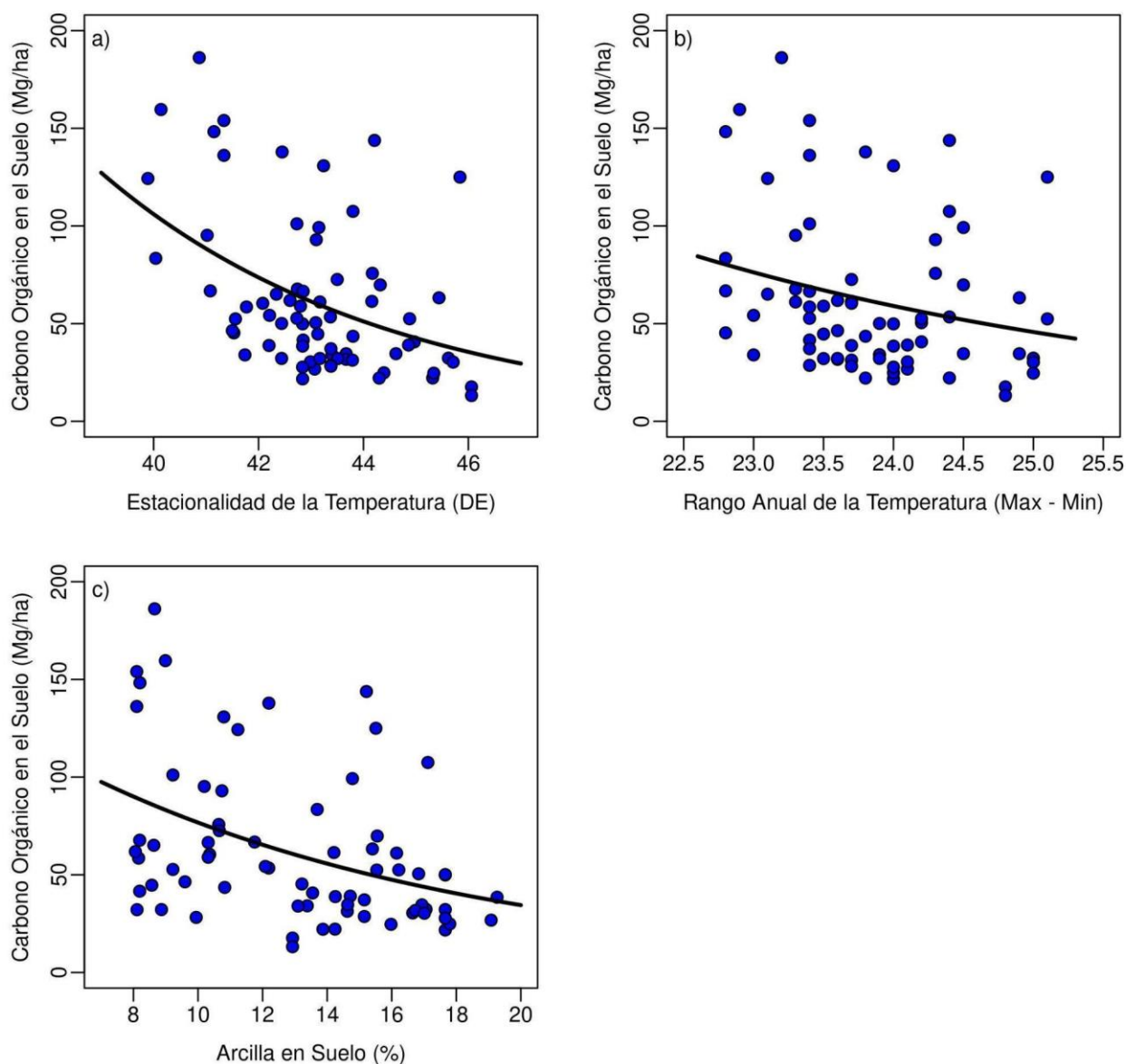


Figura 22.- Relación entre el COS en los primeros 30 cm de suelo y las variables que conforman el modelo combinado (backward selection procedure) de plantaciones de *Pinus ponderosa* en la región forestal de la Patagonia.

8.5.- Efecto de las rotaciones forestales sobre el COS

Uno de los aspectos considerados en la toma de datos de campos era el número de rotaciones con plantaciones forestales que había tenido el sitio. Del total de datos relevados, se obtuvieron 65, 15, 6 casos en donde las forestaciones se correspondieron con la primera, segunda y tercera rotación (Tabla 19). Los análisis estadísticos indicaron diferencias significativas en las plantaciones con *Populus* spp. A pesar de tener pocas repeticiones es interesante la baja dispersión de los datos entre las distintas forestaciones relevadas. En el caso de las plantaciones con *P. taeda*, la ausencia de diferencias significativas de COS entre rotaciones, además de observarse una alta dispersión de los datos de los casos la segunda rotación, podría deberse a que sería posible alcanzar un estado de equilibrio de COS en la primera rotación, siempre que se eviten grandes pérdidas en el momento de la preparación del terreno (Alves Ibarra et al. 2022). En contraste, se observó un efecto general de una disminución de COS en los primeros 30 cm de suelo en plantaciones de *E. grandis* en la provincia de Entre Ríos (Sandoval López et al. 2020). Estos

autores mencionan una pérdida de entre el 45 y el 53% en suelos con un contenido de 50% arena en la primer y tercera rotación, y ganancias o pérdidas de hasta un 23% en suelos con un contenido de arena de 75-95%. Esto indica un fuerte condicionamiento del suelo con relación a la capacidad máxima de almacenar C, ya que en los sitios con mayor proporción de arena el COS alcanzó valores de 21,5 Mg/ha contra 79,4 Mg/ha en los sitios con un contenido de arena de entre 50 y 60%. Los casos relevados no apoyan estos resultados, al menos hasta la segunda rotación de *E grandis* (Tabla 19). En este sentido, sería conveniente incorporar datos de casos puntuales de sitios que tengan varias rotaciones forestales para poder generalizar o caracterizar el impacto de estas prácticas de cultivos sucesivas sobre el COS.

Tabla 19.- Promedio de COS (\pm DS; Mg/ha) y cantidad de repeticiones (n) en los primeros 30 cm de suelo por especie forestal en las distintas rotaciones. Letras distintas indican diferencias significativas del COS entre rotaciones.

Especie	Promedio COS (\pm DS; n)		
	1° rotación	2° rotación	3° rotación
<i>P. taeda</i>	72,6 (27,8; 12)	92,2 (74,1; 3)	--
<i>P. patula</i>	171,9 (29,5; 3)	97,3 (--; 1)	--
<i>P. elliotii</i>	58,1 (43,4; 8)	47,5 (--; 1)	--
<i>E. grandis</i>	54,2 (39,1; 13)	55,3 (27,6; 7)	93,1 (--; 1)
<i>E. dunnii</i>	76,8 (54,4; 5)	45,2 (--; 1)	--
<i>Populus</i> spp.	46,7 (13; 7) a	--	72 (3; 2) b
<i>Salix</i> spp.	--	86,7 (17,8; 2)	98,6 (35,3; 3)

9.- CONCLUSIONES

Si bien a nivel nacional se presenta una amplia dispersión de datos, es posible mencionar que:

- Se observa una tendencia a que la cantidad promedio de COS varíe en el sentido: forestaciones > línea base > uso alternativo.
- Se observa que, dentro de la línea base, el valor promedio mayor en la cantidad de COS se encuentra en los bosques nativos en comparación a los pastizales, aunque la diferencia entre ambas clases alcanza solamente los 10 Mg/ha.
- En el caso de las plantaciones forestales, se observa una gradación de mayor a menor cantidad promedio de COS en el sentido: *Pinus* spp. y plantación con nativas > *Eucalyptus* spp. y *Salix* spp. > *Populus* spp.
- En el uso alternativo productivo se observa una mayor gradiente entre clases (de 30 a 70 Mg/ha), siguiendo el orden: pasturas > cultivos leñosos > cultivos anuales > pastizal > arbustal.

Las características ambientales determinaron la máxima cantidad de C que sus suelos pueden almacenar. La introducción de las forestaciones incrementa el COS en aquellas ecorregiones con valores bajos de COS (al menos el COS analizado en las líneas base) y ocurren pérdidas en las ecorregiones más ricas en COS previo a la forestación.

En términos generales, la introducción de forestaciones tendría un impacto nulo o positivo sobre las reservas de COS en la mayor parte de las ecorregiones, excepto aquellas con altos valores de COS y en los sitios plantados con *Eucalyptus* spp.

Las plantaciones con *Pinus* spp. mostraron cambios positivos en el COS en casi todos los ambientes considerados, mientras que los *Eucalyptus* spp. mostraron que no afecta la cantidad de COS hasta valores de alrededor de 70 Mg/ha de COS respecto a la Línea Base, mostrando menores valores de COS al superar dicho valor.

El uso alternativo de los cultivos tendería a generar pérdidas de COS en un mayor rango de situaciones.

A nivel de Ecorregión podemos indicar que:

Selva Paranaense muestra uno de los valores de COS de la línea base más altos (aprox. 71 Mg/ha). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el COS comparando los usos del suelo y las clases de uso.

En *Yungas* se encontraron diferencias significativas en el COS comparando las clases de uso de la tierra, siendo mayor en las plantaciones forestales y línea base, y menor en el uso alternativo productivo. Esta ecorregión mostró uno de los mayores valores promedio de COS de la línea base (aprox. 79 Mg/ha). Si bien no mostraron diferencias significativas, el pastizal de la línea base mostró valores promedios de COS menores que los del bosque nativo. El cultivo con *Pinus* spp. alcanzó los mismos valores promedio de cantidad de COS que el bosque nativo como la línea base (93,3 Mg/ha). Los cultivos anuales y las pasturas mostraron los menores valores promedio de COS (61,7 Mg/ha), mostrando valores intermedios las plantaciones con *Eucalyptus* spp., los pastizales de la línea base y los cultivos leñosos como usos alternativos (78,5 Mg/ha).

Los *Esteros del Iberá* contó con una cantidad de casos observados escasos. Por este motivo, los resultados deberían ser tomados con cautela o a modo de tendencia. En promedio, los pastizales antropizados y los de la línea base mostraron las mayores cantidades de COS de 20,7 Mg/ha, las plantaciones con *Pinus* spp. 18,6 Mg/ha, mientras las de *Eucalyptus* spp. fue de 12,6 Mg/ha. La textura gruesa de los suelos de estos ambientes (cordones arenosos) pueden explicar los bajos valores de COS.

Campos y Malezales no manifestaron diferencias significativas entre los usos del suelo, y el COS promedio fue de 62,2 Mg/ha, sin diferencias entre las clases de los usos del suelo evaluados.

En el *Chaco Húmedo* la mayor cantidad de COS se observó en la línea base (aprox. 74 Mg/ha), seguido de las plantaciones forestales (aprox. 62 Mg/ha) y con un menor valor, el uso alternativo productivo (aprox. 54 Mg/ha). Existe evidencia de diferencias entre las clases de uso, siendo mayor en la clase de Bosque nativo (78 Mg/ha), seguido por los usos del suelo de Pastizal y de Plantación con nativas (COS promedio de 69 Mg/ha). Los menores valores de COS se obtuvieron en las clases de usos del suelo de plantaciones con *Eucalyptus* spp., cultivos anuales y pasturas (52,5 Mg/ha).

En el *Chaco Seco* el desbalance en el número de casos de estudio no permite realizar un análisis estadístico comparando las clases de uso de la tierra para evaluar por ej. el impacto sobre el COS de la introducción de un determinado género forestal). Al analizar los valores promedios del Uso de la tierra se encontró un valor significativamente más bajo en el Uso

alternativo. El valor fue de 54,4 Mg C/ha, siguiendo los usos de suelo el siguiente orden: Plantaciones forestales (67 Mg/ha) > Línea base (55 Mg/ha) > Usos alternativos (42 Mg/ha).

En el caso de *Pampeana* (Pampa y Delta del Paraná), el valor promedio de COS fue de 73,9 y de 43,3 Mg/ha para la Ecorregión de la Pampa y Delta del Paraná. Para la ecorregión Pampeana, el Bosque nativo de Línea base mostró el mayor valor promedio de COS (95,0 Mg/ha), con valores intermedios en el Pastizal (78,1 Mg/ha) y las plantaciones con *Pinus* spp. (94,4 Mg/ha). Las plantaciones con *Eucalyptus* spp. y *Populus* spp. mostraron los menores valores de cantidad de COS junto al Uso alternativo de Cultivos anuales (57 Mg/ha).

En *Delta del Paraná* se encontraron diferencias altamente significativas entre los distintos usos del suelo. Las forestaciones con *Populus* spp. y *Salix* spp. obtuvieron los mayores promedios de COS (56,3 Mg/ha) seguidas por las plantaciones con *Eucalyptus* spp. (34,3 Mg/ha). Los Pastizales de la línea base mostraron un valor intermedio en relación a las plantaciones (39,4 Mg/ha).

En *Espinal* se observaron diferencias entre los usos del suelo, pero no se observaron diferencias significativas entre las distintas clases de usos del suelo. En promedio, esta ecorregión muestra valores de COS de 57,7 Mg/ha.

Para el caso de la región *Monte* las diferencias entre los usos del suelo no fueron significativas (promedio 47,3 Mg/ha), aunque si lo fueron entre las clases de uso de la tierra. La clase pastizal de la línea base mostró los mayores valores de cantidad de COS (78,9 Mg/ha), seguidos por el uso alternativo de cultivos leñosos (51,3 Mg/ha) y *Populus* spp. (47,1 Mg/ha), mostrando estos últimos un valor intermedio, siendo similar al sistema de bosque nativo (22,3 Mg/ha).

Finalmente, en *Estepas y Bosques Patagónicos* el COS promedio de los sitios de la clase Bosque Nativo (76,4 Mg/ha) y Pastizal (47,9 Mg/ha) fueron significativamente diferentes. A la vez, el COS de las plantaciones forestales de pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) muestra un valor intermedio (62,2 Mg/ha). Dada las diferencias entre las dos clases de la Línea Base, no se detectaron diferencias por uso de la tierra. Se observó que el COS aumenta cuando se introducen plantaciones en sitios con menores niveles de C previa a la forestación, y ocurre lo contrario en los sitios con mayores valores de COS.

En cada región forestal, al analizar los factores (biológicos y ambientales) que influyen en la capacidad de almacenamiento de C se pudo observar que:

En *Región Mesopotámica*, las variables ambientales y de manejo que explican en mayor grado la variación de COS se corresponden con las que están relacionadas con la Variación interanual de la precipitación y el contenido de arcilla del suelo en los primeros 30 cm.

En la *Región NOA*, el modelo que alcanzó una alta capacidad de explicar la variación de COS regional incluyó las variables temperatura media anual (TMA, mm) y la variación interanual de la precipitación (%) y el contenido de arcilla del suelo (%).

En la *Región Centro Norte*, desde un punto de vista ambiental, ninguna de las variables analizadas de manera independiente mostró tener una alta correlación con la variación de COS.

En *Región Pampeana*, el modelo obtenido muestra una alta capacidad de explicar la

variación de COS regional. Las variables que se destacan son la TMA y el contenido de arcilla. Los sitios más templados y con suelos más arcillosos se encontrarían aquellos con mayor COS, independientemente del género de la especie forestal plantada.

En la *Región del Delta del Paraná* no se encontraron relaciones entre el ambiente y el COS. Se determinó un fuerte impacto relacionado con el manejo forestal, en donde la selección de la clase de forestación es muy importante. El modelo resultante, teniendo en cuenta la clase forestal (*Eucalyptus* spp., *Salix* spp. y *Populus* spp.), indica que el COS se incrementa con la edad pero que cada clase forestal muestra distintos valores. Si bien se observa una fuerte tendencia a incrementarse el COS con la edad el *Salix* spp., la variación de los puntos no permitió ajustar un modelo significativo que permita modelar dicha relación.

En la *Región de Cuyo y Alto Valle del Río Negro*, si bien se cuentan con relativamente pocos valores y dispersos en el espacio el análisis indicó una fuerte relación del COS con la variación interanual de la precipitación y con el contenido de arcilla.

En *Patagonia Andina* se determinó que el COS en esta región disminuye en aquellos sitios que muestran una mayor estacionalidad y rango anual de la temperatura, siendo también afectado negativamente por el contenido de arcilla del suelo.

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de reforzar la intensidad de muestreo para obtener una base de datos más robusta y poder establecer conclusiones más claras en algunas regiones. Además, se observa la necesidad de cuantificar a nivel de sitio variables accesorias que explican el contenido de COS, como la textura.

Se recomienda, a partir de esta información y experiencia de trabajo colaborativo, establecer una estrategia de monitoreo que permita cuantificar el estado y la evolución de las reservas de COS en suelos con plantaciones forestales a escala nacional. Definir un esquema de monitoreo del COS del suelo se torna indispensable para diseñar, evaluar y promover estrategias o políticas de secuestro de C atendiendo tanto a las posibles respuestas productivas como así también, cumpliendo con los objetivos de reducción de emisiones de GEI a nivel nacional. Se recomienda hacer foco en las plantaciones forestales haciendo coincidir los muestreos de suelos con las campañas de mediciones de parcelas de inventario forestal, tomando como base una frecuencia de 1 dato cada 10 años. Se deberían priorizar los muestreos en suelos forestales en las regiones o cuencas en donde hay poca base de datos (por ejemplo, región chaqueña y delta del Paraná) para, en segundo lugar, establecer sitios testigos en todas las regiones buscando establecer esta evolución de los suelos forestales.

10.- BIBLIOGRAFIA

- Abril A, Bucher EH. 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Applied Soil Ecology* 16: 243–249
- Álvarez R, Lavado RS. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83: 127– 141.
- Alves Ibarra M, Acordi Zanatta J, Dieckow J, Glück Rachwal MF, Ribeiro RH, Cardoso DJ, Ramalho B, Stahl J. 2022. Changes in soil carbon and nitrogen stocks after conversion of subtropical natural forest to loblolly pine plantations. *European Journal of Forest Research* (2022) 141:31–42. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01424-6>
- Amiotti NM, Zalba P, Ares A, Rossi JM. 2013. Coniferous afforestation increases soil carbon in maritime sand dunes, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59:2, 289-304, DOI: [10.1080/03650340.2011.627326](https://doi.org/10.1080/03650340.2011.627326)
- Araujo PL, Austin AT. 2020. Exotic pine forestation shifts carbon accumulation to litter detritus and wood along a broad precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management* 460: 117902.
- Bárcena TG, Kiær LP, Vesterdal L, Stefánsdóttir HM, Gundersen P, Sigurdsson BD. 2014. Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis. *Global Change Biology* 20: 2393-2405. <https://doi.org/10.1111/gcb.12576>
- Barton, K. (2020). MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.43.1. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>
- Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1).
- Berhongaray G, Álvarez R, De Paepe J, Caride C, Cantet R. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192: 97–110.
- Berthrong ST, Jobbágy EG, Jackson RB. 2010. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. *Ecological Applications* 19: 2228–2241
- Berthrong ST, Piñeiro G, Jobbágy EG, Jackson RB. 2012. Soil C and N changes with afforestation of grasslands across gradients of precipitation and plantation age. *Ecological Applications* 22:76–86. <http://dx.doi.org/10.1890/10-2210.1>
- Blake GR, Hartge KH. 1986 Bulk Density Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineral Method. Ed. by A. Klute, 363-382.
- Bolker BM, Brooks ME, Clark CJ, Geange SW, Poulsen JR, Stevens MHH, White J-SS. 2009. Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution* 24: 127–135.
- Bonino EE. 2006. Changes in carbon pools associated with a land-use gradient in the Dry Chaco, Argentina. *Forest Ecology and Management* 223 : 183–189
- Bohn HB, Mcneal , O'Connor G. 1993. Química del suelo. Limusa. México, D. F. ISBN: 968-18-4431-9
- Broquen P, Candan F, Lobartini JC, Girardin JL. 2004. Relaciones entre el carbono orgánico y propiedades edáficas y del sitio en suelos derivados de cenizas volcánicas, sudoeste de Neuquén (Argentina). *Ciencia del Suelo* 22: 73-82.
- Burkart R., Bárbaro N., Sánchez R. y Gómez D. 1999. Eco-regiones de la Argentina. Administración de Parques Nacionales. Secretaria de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Presidencia de la Nación.
- Buschiazzo DE, Estelrich HD, Aimar SB, Viglizzo E, Babinec FJ. 2004. Soil texture and tree coverage influence on organic matter. *J. Range Manage.*, 57: 511-516.
- Calzada y Treboux 2019. <https://www.bcr.com.ar/es/print/pdf/node/75425>; junio 2022
- Ceballos DS, Frangi J, Jobbágy EG. 2013. Soil volume and carbon storage shifts in drained and afforested wetlands of the Paraná River Delta. *Biogeochemistry* (2013) 112:359–372. DOI 10.1007/s10533-012-9731-2
- Conti G, Pérez-Harguindeguy N, Quétier F, Gorné LD, Jaureguiberry P, Bertone GA, Enrico L, Cuchietti A, Díaz S. 2014. Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 197: 68–76
- De Koning F, Olschewski R, Veldkamp E, Benítez P, Laclau P, López M, de Urquiza M, Schlichter T. 2002. Evaluation of the CO2 sequestration potential of afforestation projects and secondary forests in two different climate zones of South America. *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)*. ISBN 3-9801067-15-3. 187 pp.
- Delignette-Muller ML. 2015. Fitdistrplus: An R Package for Distribution Fitting Methods. *Journal of Statistical Software*, 64, 1–34. <https://doi.org/10.18637/jss.v064.i04>
- Deng L, Zhu GY, Tang ZS, Shanggun ZP. 2016. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. *Global Ecological Conserv* 5:127–138
- Díaz Villa MVE, Cristiano PM, De Diego MS, Rodríguez SA, Efron ST, Bucci SJ, Scholz F, Goldstein G. 2022. Do selective logging and pine plantations in humid subtropical forests affect aboveground primary productivity as well as carbon and nutrients transfer to soil? *Forest Ecology and Management* 503 (2022) 119736
- Duarte Guardia S, Peri P, Amelung W, Thomas E, Borchard5 N, Baldi G, Cowie A, Ladd B. 2020. Biophysical

- and socioeconomic factors influencing soil carbon stocks: a global assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (2020) 25:1129–1148
- Eclesia RP, Jobbágy EG, Jackson RB, Biganzoli F, Piñeiro G. 2012. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. *Global Change Biology* 18, 3237–3251, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x
- FAO. 2020 a. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- FAO. 2020 b. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. <http://www.fao.org/3/cb0509en/CB0509EN.pdf>
- Ferreiro-Domínguez N, Rodríguez-Rigueiro FJ, Rigueiro-Rodríguez A, González-Hernández MP, Mosquera-Losada MR. 2022. Climate Change and Silvopasture: The Potential of the Tree and Weather to Modify Soil Carbon Balance. *Sustainability* 14, 4270. <https://doi.org/10.3390/su14074270>
- Follett RF, Stewart CE, Pruessner EG, Kimble JM. 2012. Effects of climate change on soil carbon and nitrogen storage in the US Great Plains *Journal of Soil and Water Conservation* 67: 331-342; DOI: <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.331>
- Fox J, Weisberg S. 2019. An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Gaitán JJ, Maestre FT, Bran DE, Buono GG, Dougill AJ, García Martínez G, Ferrante D, Guuroh RT, Linstädter A, Massara V, Thomas AD, Oliva GE. 2019. Biotic and Abiotic Drivers of Topsoil Organic Carbon Concentration in Drylands Have Similar Effects at Regional and Global Scales. *Ecosystems* <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00348-y>
- Galarco SP, Ramilo DI. 2019. Plantaciones forestales en Argentina. Fundamentos técnicos y metodologías para la realización de forestaciones en diferentes regiones. Editorial de la UNLP, La Plata. ISBN 978-950-34-1898-7. 377pp.
- Garay MM, Amiotti NM, Zalba p. 2015. Potencial riesgo de polución biológica asociado a la introducción de *Pinus radiata* en tierras de pastizales. *ΦYTON* 84: 280-287
- Georgiou K, Jackson R.B., Vindušková O., Abramoff R.Z., Ahlström A, Feng W, Harden JW, Pellegrini FA, Polley HW, Soong JL, Riley WJ, Torn MS. 2022. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications* 13:3797. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31540-9>
- González Roglich M, Swenson JF, Jobbágy EG, Jackson RB. 2014. Shifting carbon pools along a plant cover gradient in woody encroached savannas of central Argentina. *Forest Ecology and Management* 331: 71–78.
- Gonzalez-Polo M, Bahamonde HA, Peri PL, Mazzarino MJ, Fariña C, Caballé G. 2019. Soil microbial processes in a pine silvopastoral system in NW Patagonia. *Agroforestry Systems* 93:255–266. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0210-1>
- Guo LB, Gifford RM. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8: 345-360,
- Hernández J, del Pino A, Vance ED, Califra A, Del Giorgio F, Martínez L, González-Barríos P. 2016. Eucalyptus and Pinus stand density effects on soil carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 368 (2016) 28–38
- Hiederer R, Köchy M. 2011. Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database. EUR 25225 EN. Publications Office of the European Union. 79.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1965–1978.
- Homann PS, Kapchinske JS, Boyce A (2007) Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA. *Biogeochemistry* 85, 303-316
- Hong S, Yin G, Piao S, Dybzinski R, Cong N, Li X, Wang K, Peñuelas J, Zeng H, Chen A. 2020. Divergent responses of soil organic carbon to Afforestation. *Nature Sustainability* <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0557-y>
- Hübner R, Kühnel A, Lu J, Dettmann H, Wang W, Wiesmeier M. 2021. Soil carbon sequestration by agroforestry systems in China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 315: 107437
- Jobbágy EG, Jackson RB. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10: 423–436.
- Kuznetsova A, Brockhoff PB, Christensen RHB. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13).
- Laganière J, Angers DA, Paré D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology* (2010) 16, 439–453,
- Liu ZP, Shao MA, Wang YQ. 2011. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 142:184–194. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.002>
- Lupi A, Steinbach HS, Ciarlo E, Romaniuk R, Cosentino VRN, Rimski-Korsakov H, Álvarez CR. 2021. Organic carbon stored in soils under different land uses and soil textures in southeast Argentinean Mesopotamia. *Geoderma Regional* 27: e00435.

- Mann LK 1986. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Sci.* 142, 279–288.
- Manrique SM, Franco J. 2020. Tree cover increase mitigation strategy: implications of the “replacement approach” in carbon storage of a subtropical ecosystem. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. <https://doi.org/10.1007/s11027-020-09930-5>
- Martínez Meier A, Fernández ME, Dalla Salda G, Gyenge J, Licata J, Rozenberg P. 2015. Ecophysiological basis of wood formation in ponderosa pine: linking water flux patterns with wood microdensity variables. *Forest Ecology and Management* 346: 31–40. DOI 10.1016/j.foreco.2015.02.021.
- Matus FJ. 2021. Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis. *Nature* 11:6438. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84821-6>
- MAYDS. 2021. Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).
- Milione G M, Mujica CR, Domínguez Daguer D, Bea SA, Fernández ME, Gyenge JE. 2020 a. Influence of soil texture, climate and vegetation cover on secondary soil salinization in pampas plains, South America. *CERNE* 26 :212-221.
- Milione GM, Mujica CR, Bea SA, Dominguez Daguer, D, Gyenge, J. 2020 b. Forestación en pastizales: el rol de las especies y el manejo forestal sobre el proceso de salinización secundaria de suelos RIA. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 46: 73-80.
- Ministerio de Hacienda de la Nación 2019. Informes de cadena de valor. Forestal, papel y muebles - Marzo 2019. Elaborado con la información disponible a Enero de 2019 AÑO 4, N°14, ISSN 2525-0221 <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-forestal-industrial/inventarios/tablero.php>
- Nakagawa S, Schielzeth H. 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133–142.
- Osinaga NA, Álvarez CR, Taboada MA. 2018. Effect of deforestation and subsequent land use management on soil carbon stocks in the South American Chaco. *SOIL*, 4, 251–257. <https://doi.org/10.5194/soil-4-251-2018>
- Piccolo GA, Andriulo AE, Mary B. 2008. Changes in soil organic matter under different land management in Misiones province (Argentina). *Sci. Agric.* 65:290-297.
- Peri PL, Martínez Pastur G, Schlichter TM. 2021. Uso sostenible del bosque: Aportes desde la Silvicultura Argentina. 1a edición especial - Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 889 p. ISBN 978-987-46815-4-6
- Pinheiro JC, Bates D. 2000. *Mixed-Effects models in S and S-Plus*. Springer Verlag.
- Post WM, Kwon KC. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 6, 317–327.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Riestra D, Noellemeier E, Quiroga A. 2012. Soil texture and forest species condition the effect of afforestation on soil quality parameters. *Soil Sci* 177: 279-287. DOI: 0.1097/SS.0b013e318245d0fe
- Ripley SW, Krzic M, Bradfield GE, Bomke AA. 2010. Land-use impacts on selected soil properties of the Yungas/Chaco transition forest of Jujuy province, northwestern Argentina: A preliminary study. *Can. J. Soil Sci.* 90:679–683.
- Sabattini JA, Sabattini RA, Cian JC, Sabattini IA. 2021. Carbon stock in subtropical native forests in a south american protected area. *Nature Conservation Research*. 6: 66–79. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2021.027>
- Sandoval López DM, Arturi MF, Goya JF, Pérez CA, Frangi JL. 2020. Eucalyptus grandis plantations: effects of management on soil carbon, nutrient contents and yields. *Journal of Forest Research* 31:601–611. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0850-z>
- Santos, D.J., Wilson, M.G. y Ostinelli, M.M. (Eds.) (2017). *Metodología de muestreo de suelos y ensayos a campo: protocolos básicos comunes* (2da. edición). Ediciones INTA
- Schlesinger WH. 1997. *Biogeochemistry, an analysis of global change*. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Searle SR, Speed FM, Milliken GA. 1980. Population Marginal Means in the Linear Model: An alternative to Least Squares Means. *The American Statistician*, 34(4), 216–221.
- Shi J, Cui L. 2010. Soil carbon change and its affecting factors following afforestation in China. *Landscape and Urban Planning* 98: 75–85.
- Shi X-Z, Wang H-J, Wang D-D, Yu D-Y. 2010. Optimal spatial scale determining the response of soil organic carbon to climate change using soil database of China. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD. 21-23.
- Vicari R, Kandus P, Pralongo P, Burghi M. 2011. Carbon budget alteration due to landcover–landuse change in wetlands: the case of afforestation in the Lower Delta of the Paraná River marshes (Argentina). *Water and Environment Journal* 25: 378–386. doi:10.1111/j.1747-6593.2010.00233.x
- Villarino SH, Studdert GA, Baldassini P, Cendoya MG, Ciuffoli L, Mastrángelo M, Piñeiro G. 2017. Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina. *Science of the Total Environment* 575: 1056–1065. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.175>
- Von Wallis A, Martiarena R, Pahr N, Taboada MA. 2016. Stock de carbono y condición física de un kandiudult

- bajo distintos Manejos forestales en la provincia de Misiones. *Ciencias del Suelo* 34: 253-261.
- Wilson M, Paz-Ferreiro J. 2012. Effects of Soil-Use Intensity on Selected Properties of Mollisols in Entre Ríos, Argentina, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 43:1-2, 71-80, DOI: 10.1080/00103624.2012.631417
- Zaninovich SC, Gatti MG. 2020. Carbon stock densities of semi-deciduous Atlantic forest and pine plantations in Argentina. *Science of the Total Environment* 747: 141085
- Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith GM. 2009. *Mixed effects model and extensions in ecology with R*. New York, NY: Springer Science+Business Media LLC.

Secretaría de Agricultura,
Ganadería y Pesca



Ministerio de Economía
Argentina