



**LAS QUEMAS PRESCRIPTAS Y OTRAS
TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE RESIDUOS
DE PODAS Y RALEOS DE FORESTACIONES
EN PATAGONIA: Efectos sobre la dinámica y
balance del carbono forestal en función del
gradiente de precipitación**

Mailen Ivana Concha

Director: Dr. Guillermo E. Defossé

Codirectora: Ing. Maria Marcela Godoy

Tesina presentada al Departamento de Ingeniería Forestal,

Facultad de Ingeniería,

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

Requerimiento parcial para el otorgamiento del título de Ingeniero Forestal

Esquel, Diciembre de 2024

Ingeniería Forestal

Ingeniería Forestal

Trabajo Final de Mailen Ivana Concha

Presentado en Diciembre de 2024

Título del trabajo: LAS QUEMAS PRESCRIPTAS Y OTRAS TÉCNICAS DE REDUCCIÓN DE RESIDUOS DE PODAS Y RALEOS DE FORESTACIONES EN PATAGONIA: Efectos sobre la dinámica y balance del carbono forestal en función del gradiente de precipitación

Aprobada por los profesores guía:

Dr. Guillermo E. Defossé (Director)

Ing. Maria Marcela Godoy (Codirectora)

Nota obtenida por el Trabajo Final y su defensa:

Acepto que mi Trabajo Final sea parte de la colección de las bibliotecas de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y que esta universidad permita consultar mi Trabajo Final a cualquier lector. También afirmo que el contenido de mi Trabajo Final es de mi autoría.

Mailen Ivana Concha

RESUMEN

En el ecotono bosque-estepa patagónica en Argentina, se han establecido forestaciones de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. ex. Laws.), en un gradiente ambiental que varía desde los 350 mm (xérico), los 800 mm (mésico), y hasta los 1050 mm (húmedo) anuales de precipitación, y en altitudes que varían desde los 400 hasta los 1200 m.s.n.m., por fuera del bosque nativo. La mayoría de estas forestaciones han alcanzado edades que necesitan prácticas silvícolas, como podas y raleos, para lograr rodales saludables y productivos y en los que se disminuya sustancialmente el riesgo de incendios. Estas prácticas, aparte de algunas trozas maderables que producen los raleos, generan residuos, que por razones económicas no se tratan en el sitio, lo que dificulta el crecimiento del sotobosque y aumenta el riesgo de incendios. El objetivo de este proyecto fue determinar, en cinco sitios representativos de este gradiente, el efecto que tienen las quemas prescritas en la dinámica de carbono, especialmente el tiempo en que el rodal intervenido recupera, en biomasa forestal, el CO₂ emitido mediante estas prácticas.

Los resultados indican que el tiempo de recupero del C emitido durante las quemas varió entre 4 y 9 años y esto dependió del sitio, la edad del rodal y la intensidad de intervención. Con respecto a la incidencia del gradiente ambiental de precipitación en el crecimiento de los rodales, no parece claro que haya una relación directa entre >precipitación >crecimiento de los anillos. Es probable que otros factores propios de la dinámica cada rodal (como competencia con otras especies, ubicación y cantidad de cenizas volcánicas en el perfil del suelo, evapotranspiración a nivel de sitio, edad de cada rodal, y otros), aparte del propio gradiente de precipitación, puedan haber afectado de manera diferente el crecimiento de cada rodal. Lo que es claro, es que todos los rodales recuperan el carbono perdido durante la quema entre 4 y 9 años posteriores a la misma, lo que ofrece sin dudas beneficios tangibles como la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa del rodal, una disminución del riesgo de incendios y un crecimiento más previsible hasta el turno de corta. Las quemas prescriptas en rodales de pinos en Patagonia, bien planificadas y ejecutadas, brindan beneficios ecológicos, productivos y ambientales que es necesario ponderar.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
INTRODUCCION	6
ESTADO DEL ARTE.....	9
OBJETIVOS	10
Objetivo general.....	10
Objetivos específicos	10
DESARROLLO	11
METODOLOGIA	13
• Determinación de edad de los rodales y crecimiento mediante análisis de tarugos.....	13
• Estimación de captura de carbono y tiempo de recupero de C emitido	14
• Estimaciones y comparaciones con proyecto previo.....	15
• Metodología para determinación de la biomasa remanente (posterior a la poda y raleo)15	
• Determinación de las emisiones de CO ₂ y otros GEIs.....	16
RESULTADOS.....	17
DISCUSION Y CONCLUSIONES	23
BIBLIOGRAFIA.....	25
ANEXO I . Tablas de estimación de captura de C.....	28

AGRADECIMIENTOS

A mi ángel guía, mi Loli que siempre me cuida y me acompaña, me acompañó en los primeros años, pero el tiempo muchas veces es tirano, no pude decírselo en persona, pero... ¡Llegué Abu! Donde estés, sé que estarás muy feliz y orgullosa de tu nieta ingeniera...

A mis padres Marianela y Sergio por la posibilidad de estudiar, por su apoyo, su tiempo y amor. A mi hermana Diana que siempre estuvo acompañándome en las buenas y en las malas aún más, ayudándome en todo, enviándome cajitas de estudiante sorpresa que me armaban con mis abuelos y como psicóloga ja ja! gracias por tanto! Los amo y valoro todo el cariño y el esfuerzo que hicieron para que hoy esté acá.

A mis abuelos, mis 4 pilares de ejemplo de perseverancia, superación, trabajo, amor, Loli, Pancho, Valentina y Huencho. Gracias por tanto, los amo! A mis tíos y tías que me siguieron los pasos...

A Esteban, compañero de vida, aventuras, viajes, alegrías, tristezas, siempre ahí, solo gracias...

A mi director y codirectora, Guillermo y Marcela, excelentes personas y profesionales, gracias por todos estos años de enseñanza, aprendizaje, profesionalismo y dedicación, mis mentores en este tema tan apasionante como lo son los incendios forestales. Gracias por creer en mí, formarme y permitirme crecer...

A Marina Caselli, por tantas consultas sobre los estadísticos! ¡Gracias!

A los chicos de Bosques, Gustavo Roo, Tomás Ortiz y Rubén Manfredi por facilitarme información de los sitios en estudio...

A Abel Nievas y Leandro Casas que desde el ámbito laboral me acompañaban y me alentaban a terminar...

A mis amigas, Laurita, Paula y Audrey, personas maravillosas que encontré en el camino, las que bancaron los “no puedo ami, tengo que estudiar” ... gracias!

A Gaby y Jorge, por el acompañamiento desde el día 1, cuando ingresaba con todos los miedos e incertidumbre y ellos estaban ahí para salvar lo que sea! ¡Gracias!

A mis docentes y a todos los que formaron parte de este proceso maravilloso,

¡Gracias a todos!

INTRODUCCION

En la región de ecotono entre el bosque y la estepa patagónica en Argentina, existen alrededor de, 109.237 ha de coníferas implantadas, de las cuales el 63% están en la provincia de Neuquén, el 32% en Chubut y 5% en Río Negro (CIEFAP-UCAR 2017, Figura 1). En la actualidad y hasta 2024, se estima que en la provincia de Chubut se han sumado unas 2000 ha de forestaciones a la estimación antes mencionada (Secretaría de Bosques, Chubut).

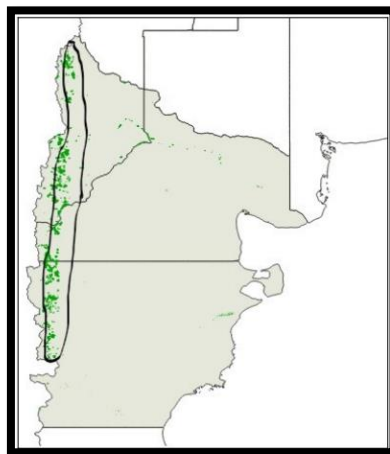


Figura 1. Plantaciones forestales en las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut en Patagonia en color verde. Áreas aptas para el establecimiento de coníferas en negro. Mapa de tesis de doctorado de M.M.Rago sobre efectos del manejo silvícola y del ambiente lumínico sobre la vegetación de *P. ponderosa* en Patagonia.

Entre las ventajas de las forestaciones con coníferas exóticas en esta región se encuentran, en primer lugar, su gran crecimiento relativo, muchas veces superior al que las mismas presentan en sus lugares de origen en el oeste de Norte América (Urzúa 1991, Gonda y Lomagno 1995, Gonda 1998). En segundo lugar, otra de las ventajas se basa en la posibilidad de lograr una alta adicionalidad en el almacenamiento de carbono en la biomasa de las forestaciones, ya que la línea de base (el carbono contenido en la biomasa y suelo de estos pastizales-arbustales donde se realizan esas forestaciones), se estima como muy baja (Loguercio et al. 2004, Defossé et al. 2011). Este bajo carbono acumulado en la línea base se debe no sólo a las características intrínsecas de la estepa, sino también a los procesos de degradación (sobrepastoreo), que ocurrieron en ella durante gran parte del siglo pasado (Soriano 1956a, b, Defossé y Robberecht 1987, Ares et al. 1990, Defossé et al. 1997). En tercer lugar, los suelos sobre los cuales se proyectan y realizan las forestaciones (denominados Andosoles) poseen un subsuelo en el que se encuentran entremezcladas distintas proporciones de ceniza volcánica rica en nutrientes, y con una alta capacidad de retención de agua, llamadas alófanos (Colmet Daage et al. 1995, Buduba 2006, Buduba et al. 2017). En general, la concentración de estos alófanos va aumentando en profundidad, hasta horizontes a los cuales las raíces de las especies nativas generalmente no llegan, pero sí lo hacen las de las coníferas implantadas. Esta cualidad beneficia el crecimiento y desarrollo de estas coníferas, ya que el agua de lluvias y aquella proveniente del derretimiento de la nieve caída y acumulada durante el otoño, invierno, y primavera, va percolando desde la superficie del suelo hacia horizontes más profundos,

almacenándose en ese alófono y convirtiéndose en agua disponible para estas coníferas durante la sequía estival, permitiéndoles alcanzar altas tasas anuales de crecimiento (Colmet Daage et al. 1995, Gonda 1998, Buduba 2006, Buduba et al. 2017).

Estas ventajas, sin embargo, podrían llegar a desaparecer si las condiciones en que se desarrollan las forestaciones no incluyen los tratamientos silvícolas adecuados, que les permitan lograr rodales sanos y productivos al turno de corta final, y en los que a través del tiempo se disminuya al mínimo el riesgo de incendios. Estos tratamientos comprenden las podas, los raleos, y toda práctica que permita no sólo reducir la densidad de los rodales implantados (se implantan alrededor de 1100-1200 plantines por ha para terminar a turno de corta con 250 -300 árboles por ha (Gonda, 2001), sino también el material combustible que queda bajo sus doseles luego de realizados. La ejecución de estos tratamientos permitiría también reducir el riesgo de incendios catastróficos y disminuir el efecto que el sombreado de doseles densos podría tener sobre la supervivencia y diversidad de las especies del sotobosque. Un estudio sobre la diversidad de macroartrópodos epígeos evidenció que la implantación de pinos en un ambiente de pastizal degradado modifica las condiciones ambientales y ese efecto se traduce en cambios en la composición de especies entre los ensambles de diversos taxa (La Manna *et al.* 2018). El impacto en las plantaciones jóvenes si bien no implica modificaciones sustanciales en cuanto a la riqueza específica, se traduce en una mayor diversidad de carábidos y tenebriónidos en el corto plazo (plantaciones jóvenes). En el largo plazo (plantación madura) con el no manejo, se observa una disminución significativa de la abundancia y riqueza de especies, debido principalmente a las condiciones de manejo silvícola de las mismas (La Manna *et al.* 2018).

Los bosques emiten carbono (C) a la atmósfera mediante la quema de su biomasa (incendios y quemas prescritas) y luego lo recapturan (también de la atmósfera) mediante la fotosíntesis de la vegetación que vuelve a crecer (Narayan et al. 2007, Balshi et al. 2009, Bertolin et al. 2015, Defossé et al. 2020) (figura N°2). La estimación del balance entre las emisiones y la absorción de C y otros gases permite monitorear e inventariar sus dinámicas a nivel de rodal, paisaje, o región (Defossé et al. 2011). De esta manera, se puede determinar en el tiempo si un ecosistema boscoso está contribuyendo al incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (fundamentalmente C), si ese balance tiende a la neutralidad (ni ganancias ni pérdidas), o si, por el contrario, está almacenando carbono en sus estructuras y en el suelo.

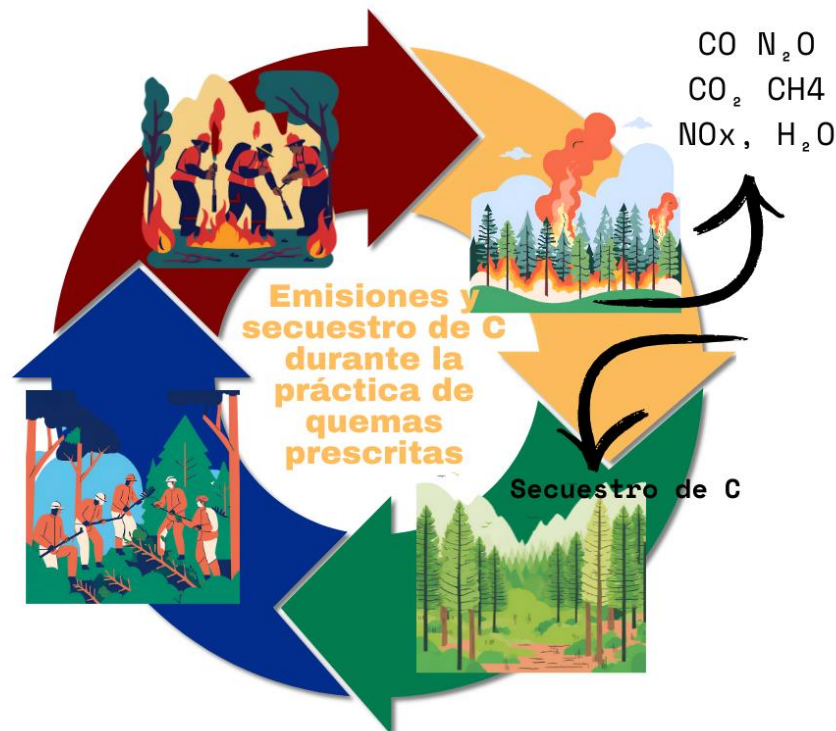


Figura 2. Ciclo de las emisiones durante las prácticas de quemas prescritas. Luego del manejo silvícola, la eliminación de los residuos emite GEI a la atmósfera que luego serán recapturados a través del C producto del proceso de fotosíntesis.

De acuerdo con varios estudios, se reconoce que el principal agente de cambio climático es producido por el aumento, en la atmósfera, de una serie de gases como CO_2 , CH_4 , NO_x y vapor de agua, entre otros (Masera *et al.*, 1995; De Jong 1997; Villalobos 1999; SEMARNAT/PNUMA 2006), los cuales a su vez incrementan el efecto invernadero de la atmósfera. El cambio climático está aumentando el riesgo de incendios forestales en biomas templados, con un secado más extremo del paisaje combinado con eventos climáticos extremos que conducen a una mayor ocurrencia de incendios destructivos con mayor severidad e intensidad impactando en los ecosistemas (Andela *et al.* 2017; IPCC 2019).

Se estima que, en el corto plazo, las actividades relacionadas con el uso del suelo, el cambio de uso de la tierra, y las actividades agrícolas y forestales realizadas de manera sustentable, pueden jugar un rol importante en la reducción y/o mitigación del CO_2 atmosférico (FAO 1999; Watson 2001; Cruz Sánchez *et al.* 2021).

La reducción de las emisiones de GEI mediante el manejo de quemas prescritas en los ecosistemas de sabana tropical está bien establecida (Cook *et al.* 2016). Por otro lado, en los bosques templados, las quemas prescritas se aplican de forma rutinaria para reducir el riesgo de incendios forestales, mejorar las condiciones del suelo superficial mediante la rápida incorporación de nutrientes, promover la diversidad y también sirven para proteger vidas y propiedades (McCaw 2013). Surge entonces la pregunta de si las quemas prescritas se pueden utilizar para mitigar las emisiones de GEI, reducir costos de tratamientos silvícolas y maximizar el carbono total del ecosistema, a medida que el cambio climático aumenta la frecuencia de los incendios forestales (Liang *et al.* 2017).

Una medida de la eficiencia potencial de las actividades que se realicen con el objetivo de reducir el CO₂ atmosférico relacionadas con el uso de la tierra, dependerá en gran medida de la capacidad para estimar de manera correcta, las cantidades de carbono almacenadas por diversas estructuras (biomasa y suelos), fundamentalmente mediante el proceso de fotosíntesis, y las emisiones de CO₂ y otros gases hacia la atmósfera, generados mayoritariamente por los incendios forestales, o más lentamente por los procesos de descomposición forestal (FAO 2003). La generación de conocimientos destinados a una correcta estimación del balance entre emisiones y almacenamiento de C es fundamental, no solo para diseñar estrategias de manejo que permitan almacenar este carbono en ecosistemas forestales y agroforestales, sino que su objetivo mayor se basa colaborar de manera simple y eficiente, a la reducción y mitigación de las emisiones de CO₂ y otros gases causados por diversas actividades antrópicas.

ESTADO DEL ARTE

La estimación y el seguimiento de la trayectoria del carbono en los ecosistemas forestales son de fundamental interés. Los bosques y los suelos en los que ellos se desarrollan son los mayores almacenes para el CO₂ atmosférico en los ecosistemas terrestres y juegan un rol significativo en la compensación de las emisiones de CO₂ mediante su conversión a madera a través de la fotosíntesis y su almacenamiento prolongado. La respuesta de la vegetación forestal al fuego ha sido intensamente investigada en la Patagonia (Veblen *et al.* 1999, Urretavizcaya y Defossé 2004, Urretavizcaya *et al.* 2006, Urretavizcaya *et al.* 2013). Las emisiones de carbono debido a incendios, por otra parte, han sido determinadas en algunos bosques nativos patagónicos (Bertolín *et al.* 2015; Defossé *et al.* 2021). Sin embargo, las emisiones de CO₂ y otros GEI provenientes de quemas prescriptas en forestaciones, especialmente en la región central de la Patagonia, no han sido estudiadas previamente.

Los bosques representan el 31% de la superficie terrestre mundial (FAO; 2018) y almacena 861-66 Pg de C, 42% en biomasa viva aérea y subterránea, 44% en el suelo (hasta 1 m de profundidad), 8% en madera muerta y 6% en hojarasca (Cacerola *et al.* 2011). Un número considerable de estudios han estimado las emisiones de C provenientes de incendios forestales que ocurren en diferentes ecosistemas forestales. La mayoría de ellos mostraron que pueden ocurrir grandes variaciones de un año a otro y entre diferentes tipos de bosques. (Wiedinmyer y Neff 2007; Schultz *et al.* 2008; van der werf *et al.* 2010; Wiedinmyer *et al.* 2011). No obstante, los estudios sobre la velocidad a la que los diferentes ecosistemas forestales recuperan el C perdido por los incendios forestales son menos numerosos (Kashian *et al.* 2006; Harrison *et al.* 2018).

El primer estudio (Defossé *et al.* 2011), en forestaciones de pinos en Patagonia, simuló el potencial de la quema prescrita para reducir las emisiones de GEI en comparación con el esquema de manejo tradicional. Esta simulación incluyó la probabilidad de ocurrencia promedio anual de incendios forestales según las estadísticas de incendios forestales disponibles. El otro estudio (Bertolín *et al.* 2015) se basó en estimaciones de emisiones de incendios y absorción de C en bosques nativos de lenga (*Nothofagus pumilio* Poepp. & Endl. Krasser), en masas forestales quemadas en diferentes fechas y con diferente

estructura forestal y cantidad de biomasa antes del incendio. Los resultados de este estudio (Bertolin *et al.* 2015) mostraron que las condiciones ambientales y del hábitat en etapas posteriores al incendio parecieran tener una mayor influencia en la recuperación de C del bosque que los efectos primarios producidos por cada incendio.

En un estudio realizado por Zhang *et al.* en 2010, se encontró que el manejo intensivo de bosques de pino ponderosa en EE. UU., que incluyó manejo de la vegetación y la aplicación de fertilizantes, tuvo un impacto significativo en la captura de carbono y la resistencia a disturbios como los incendios forestales. Estos tratamientos incrementaron la captura de carbono en un 400% y redujeron la mortalidad posterior por incendios en un 50% en comparación con bosques de mayor densidad. Además, se observó que los escarabajos de la corteza causaron una mortalidad significativamente mayor en los bosques de control con mayores densidades. En ese estudio, un modelo identificado como 3-PG4, sugiere que los bosques manejados podrían ser menos vulnerables a los efectos del calentamiento global en términos de captura de carbono. Estos resultados respaldan la idea de que un manejo forestal más activo e intenso podría ser una herramienta valiosa para aumentar el secuestro y almacenamiento de carbono en estos ecosistemas.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo primario de este trabajo fue determinar los efectos de quemas prescriptas en la dinámica del C en 5 rodales de pino. En dichos rodales, que están distribuidos en lugares con distintas calidades de sitio y distintos regímenes de precipitaciones, en un gradiente Este – Oeste al noroeste de la provincia de Chubut, se utilizaron las quemas prescriptas y otras técnicas para la reducción de residuos de podas y raleos y una posterior extracción de tarugos para evaluar y reconstruir la curva de crecimiento luego de las prácticas. La generación de nueva información aplicada a las situaciones de las forestaciones de Patagonia servirá para planificar el manejo de rodales para maximizar su productividad, reducir el riesgo de incendios con comportamientos extremos y almacenar C en sus estructuras, contribuyendo así a mitigar los efectos de las emisiones de CO₂, y sus efectos sobre el cambio climático global.

Objetivos específicos

- Evaluar desde el punto de vista ambiental (emisiones/secuestro de CO₂), los efectos de las quemas prescriptas.
- Estimar el tiempo que tarda cada rodal en recuperar en biomasa el C emitido durante esas prácticas
- Evaluar la viabilidad de implementar esquemas de manejo adaptativo que permitan optimizar el secuestro de carbono y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Analizar la influencia de factores como la intensidad de la quema, las condiciones climáticas y las características del sitio en el tiempo de recuperación de la biomasa.

DESARROLLO

El estudio se realizó en la región andina de ecotono entre el bosque nativo y la estepa Patagónica. Hay tres sitios ubicados en las cercanías de la ciudad de Esquel, a lo largo de un gradiente de precipitación y otros dos sitios se ubicaron a 100 km y 150 km de dicha localidad. La elección de los sitios se debe a que en estos lugares se presentan forestaciones con la misma especie y similares rangos de edades (Figura 3).

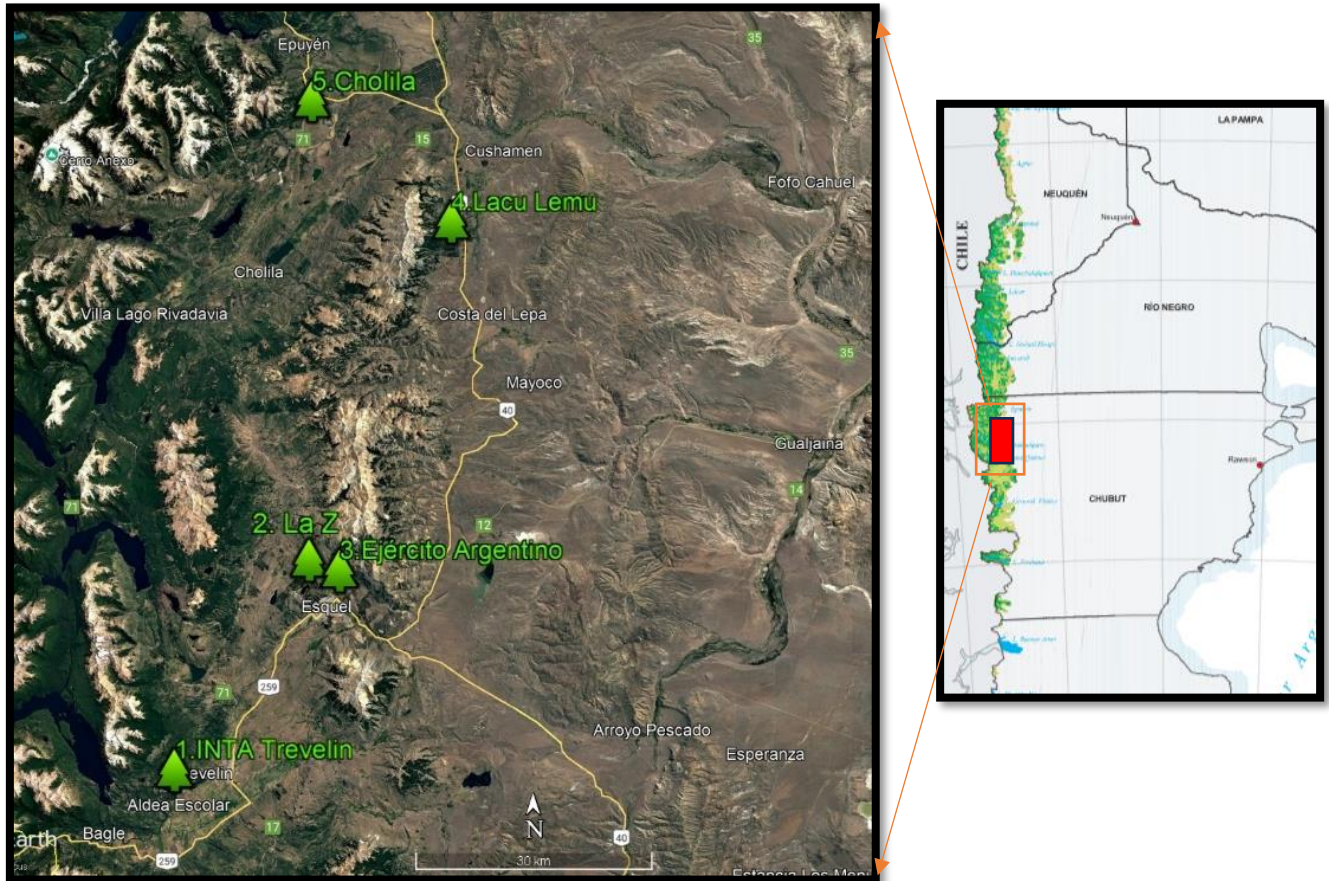


Figura 3. Sitios Seleccionados. Sitio 1: INTA. Sitio 2: La Zeta. Sitio 3: Ejército. Sitio 4: Estancia Lacu Lemu. Sitio 5: Cholila - Establecimiento Rago. Fuente mapa: Mapa extractado del Atlas de los Bosques Nativos Argentinos, de la Dirección de Bosques de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2004)

El clima en esta región es de tipo Mediterráneo, lo que implica un régimen en el cual las precipitaciones anuales, e independientemente de su magnitud, se concentran fundamentalmente durante la estación invernal, seguido por un período de sequía durante el fin de la primavera, el verano e inicios del otoño.

El primer sitio está ubicado en las forestaciones que el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) posee en Trevelin (Sitio 1, 1050 mm/año); el segundo, se ubica en las plantaciones municipales en los alrededores de la laguna La Zeta perteneciente al Municipio de Esquel (Sitio 2, 650 mm/año); el tercer lugar de estudio es en las plantaciones del Ejército Argentino, también en las cercanías de Esquel (Sitio 3, 470 mm/año); el cuarto sitio se encuentra a 100 km de la ciudad de Esquel, a la vera de la Ruta Nacional Nro. 40 y dentro del Establecimiento Lacu-Lemu (Sitio 4, 450 mm / año);

el quinto lugar, Campo Rago (Sitio 5, 630 mm / año), está ubicado a 150 km de Esquel, y a 20 km de la localidad de Cholila. A continuación, se presenta un cuadro resumen de los sitios:

Tabla 1. Cuadro resumen de los sitios intervenidos

Sitio	Lugar	Precipitación anual (mm/año)	Obs
1	INTA Trevelin	1050	
2	Laguna La Zeta	650	
3	Ejército Argentino	470	*
4	Lacu Lemu	630	Paraje Leleque
5	Forestación "Establecimiento Rago"	740	Sector cruce entre Epuén y Cholila

*En este sitio en particular se observa que la precipitación efectiva de la forestación podría ser significativamente mayor debido a la exposición y a la ubicación de la forestación a pie de ladera.

En cuanto a las características estructurales de los rodales, estos fueron raleados entre 3 y 5 años antes de la realización de los tratamientos (2014), y podados a una altura promedio de 3,5 m. En el sitio 1, la densidad remanente del rodal luego del raleo fue de 350 plantas /ha; en el sitio 2, de 425 plantas por ha, en el sitio 3, de 275 plantas /ha, en el sitio 4, de 633 plantas por ha y en el sitio 5, 662 plantas por hectárea. La disimilitud de estos valores de densidad hace que se deba considerar cuidadosamente las inferencias que se hagan sobre los resultados de los diferentes tratamientos.



Sitio 1. INTA Trevelin (Húmedo)



Sitio 2. La Zeta (Mésico)



Sitio 3. Plantación Ejército (Xérico)



Sitio 4. Estancia Lacu Lemu (Xérico)



Sitio 5. Establecimiento Rago (México)

METODOLOGIA

- Determinación de edad de los rodales y crecimiento mediante análisis de tarugos

Se extrajeron tarugos de muestra de 10 árboles de cada sitio con el barreno de Pressler con el objetivo de determinar con precisión, edad media de cada rodal y ancho de anillos (en mm). Con base en las medidas promedio del ancho de anillos, se construyeron curvas de crecimiento y acumulativas para cada rodal. Determinando el área por debajo de las curvas de crecimiento, se obtiene una estimación del crecimiento anual de biomasa de cada rodal hasta el momento de la extracción de los tarugos, y por sustracción, la biomasa acumulada hasta el momento en el que se realizaron las quemas. Estos datos también permiten las comparaciones con otras mediciones de biomasa que se realizaron previamente determinadas por método directo y ayudaron a estimar la dinámica de absorción de C y la cantidad de años necesarios para recuperar la biomasa perdida durante la quema prescrita. Para la medición del ancho de anillos se utilizó el programa de R

Con un complemento y metodología de código fuente ajustada específicamente para la lectura de anillos y análisis de incrementos de crecimiento en especies de pinos, se utilizó R software que es un entorno y lenguaje de programación diseñado para el análisis estadístico para la medición y estimación de ancho de anillos de las muestras.

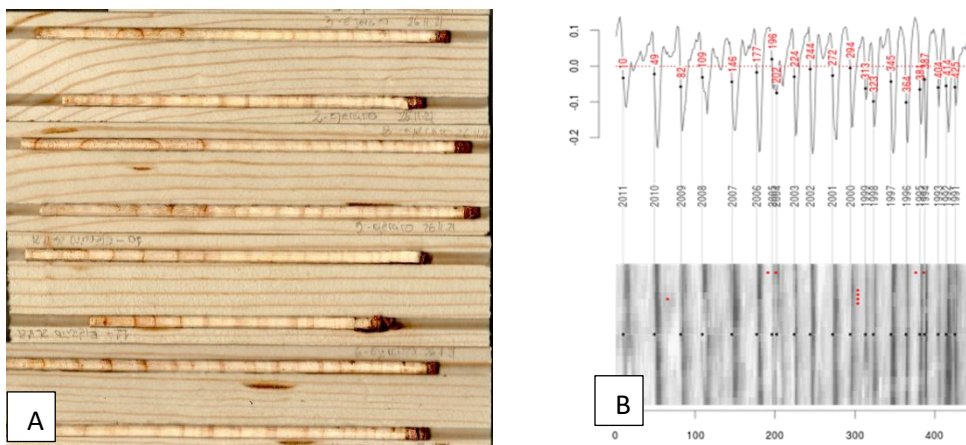


Figura 4. A. Acondicionado de tarugos para procesado con scanner. B. Resultados que brinda el procesado con el complemento measuRing de R.

Para la detección y control del ancho de los anillos de los árboles se utiliza el complemento measuRing (Figura N°4 B), con las imágenes de los tarugos escaneadas el complemento estima el ancho de anillos a través de la identificación de los bordes de los anillos en procesamiento de las reflectancias de las imágenes para producir matrices de grises y series temporales de valores de grises suavizados. Los datos de luminancia se representan gráficamente en imágenes segmentadas para poder realizar la identificación visual del borde de los anillos y el control de la detección automática, una vez verificados los bordes de anillos, el complemento te permite incluir o excluir y reclasificar los bordes de los anillos mediante un algoritmo de detección lineal. Este algoritmo detecta los bordes de los anillos según los valores extremos positivos o negativos en las series temporales suavizadas de valores de grises.

- Estimación de captura de carbono y tiempo de recupero de C emitido

Para calcular la captura de carbono se siguieron las directrices y bases del IPCC y se aplicaron datos dasométricos (DAP y H) de todas las parcelas, en las ecuaciones ajustadas para *Pinus ponderosa* que se detallan a continuación:

Biomasa de fuste (Bf), ramas (Br), acículas (Ba) (Loguercio *et al.* 2004):

$$Bf = 1,87487 + 0,01179 \times DAP^2 \times H$$

$$Br = 2,06084 + 0,05342 \times DAP^2 \times H$$

$$Ba = -1,4289 + 0,77748 \times DAP$$

$$**BT = Bf + Br + Ba**$$

Con estas ecuaciones se obtienen valores de biomasa total de cada planta donde luego se asume que aproximadamente el 50% de la biomasa seca de un árbol está compuesta de carbono (IPCC,2006). Por lo tanto, para obtener la cantidad de carbono capturado, se multiplica la biomasa por 0.5:

$$C_{capturado} = Biomasa \times 0,5$$

Ese valor de C capturado es llevado a tn/ ha-1 para estimar el stock de C del rodal al momento de la extracción de la muestra y para realizar las comparaciones con las estimaciones de las emisiones de GEI realizadas en un trabajo previo.

Luego, a partir del ancho de anillos y el incremento en crecimiento anual de los tarugos se realiza la estimación del tiempo que tardaría el rodal en recuperar en biomasa aquello emitido previamente, por lo que se realiza el procedimiento de cálculo de biomasa, pero a los años posteriores a la fecha de la quema, con diámetros y alturas estimados a partir

del incremento de crecimiento y un cálculo de altura por método de relaciones de DAP/H para cada sitio.

- **Estimaciones y comparaciones con proyecto previo**

Como se mencionó previamente, este estudio forma parte de un proyecto más amplio que evaluó diversas técnicas de manejo de residuos forestales en Patagonia. Entre 2014 y 2015, se implementaron técnicas de quemas prescriptas, triturado y una combinación de ambas en los 5 rodales antes mencionados. El objetivo de este trabajo fue comparar, tras ocho años, los datos estimados de biomasa y emisiones obtenidos mediante el análisis de tarugos y datos dasométricos, con el fin de evaluar el impacto a largo plazo del tratamiento de quemas y su contribución a la gestión de los residuos forestales, emisiones y tiempos de captura de C. Parte de esos resultados, estimaciones y metodología aplicada en el trabajo se detallan a continuación:

- Metodología para determinación de la biomasa remanente (posterior a la poda y raleo)

Para estimar la biomasa de ramas y acículas se tomaron muestras en 10 sub-parcelas cuadradas de 1 m² cada una, distribuidas al azar en cada sitio de estudio. El contenido de humedad de las muestras tomadas en cada sub-parcela se determinó mediante el peso del material fresco, obtenido en el campo inmediatamente luego de su recolección, y luego en laboratorio, donde se secó en estufa a una temperatura de 80°C hasta alcanzar peso constante. La biomasa remanente se caracterizó entonces separando el material recolectado según sus diámetros en tres clases: material fino (0-3 cm), medio (3-7 cm) y grueso (>7 cm). El estudio realizado arrojó los siguientes datos de biomasa remanente:

Tabla 2. Valores de biomasa remanente determinados para cada uno de los sitios (promedio ± un error estándar).

Sitio	Biomasa inicial (t/ha) medida como combustibles finos, medianos, y gruesos*, o de entre 1 y 10, de 100, y de 1000 h de tiempo de retardo**					
	Fino 1-10 h	Medio 100 h	Grueso 1000 h	Pastos	Arbustos	Total
1) INTA	21,39 ± 0,18	13,09 ± 0,14	1,3 ± 0,13	0	0	35,78 ± 0,13
2) La Zeta	25 ± 0,45	8,22 ± 0,22	2,93 ± 0,21	0	0	36,15 ± 0,7
3) Ejército	13,67 ± 0,15	21,09 ± 0,84	3,3 ± 0,18	0	0	38,06 ± 0,92
4) Lacu Lemu	14,03 ± 0,35	3,83 ± 0,08	0	0	7,12 ± 0,89	22,67 ± 1,01
5) Est. Rago	12,49 ± 0,29	0	0	6,7 ± 0,7	0	19,19 ± 0,51

*Combustible finos, entre 0 y 3 cm de diámetro; medianos, entre 3 y 7 cm, y gruesos > 7 cm de diámetro (Van Wagner 1974). ** Tiempo de retardo de acuerdo con el National Fire-Danger Rating System (Deming et al. 1977). Los valores reales en este sistema para combustibles de 1 h serían de un diámetro de entre 0 y 0.64 cm; los de 10 h de entre 0.64 y 2.54 cm; los de 100 h de entre 2.54 y 7.62 cm; y los de

1000 > 7.62 cm. Por ese motivo se los considera como equivalentes al fino, la suma de los de 1 y 10 h; los medios, a 100 h, y los gruesos, a 1000 h de tiempo de retardo.

En todos estos casos hay que tener en cuenta que la cantidad de biomasa remanente que queda en la superficie (residuos) estará en función de la densidad del rodal antes de la poda y el raleo y la densidad final posterior a éstos. Sin embargo, y sacando el raleo pre-comercial, las proporciones entre combustibles finos, medios, y gruesos para ser tratados con estos métodos de tratamientos de reducción parecieran guardar ciertas similitudes entre sitios, variando el peso de la biomasa total entre 60 y 70 % para los combustibles finos, entre 25 y 37 % para los medianos, y entre el 2 y el 9 % para los combustibles gruesos. Es interesante destacar que proporciones similares fueron medidas para residuos de podas y raleos a tratar con distintos métodos de reducción del combustible en diez bosques diferentes ubicados en el oeste de los EE. UU. (Knapp et al. 2008).

Por otro lado, la experiencia internacional indica que la biomasa residual que debería dejarse “in situ” luego de tratamientos de quema prescritas en plantaciones de pino, se sugiere se encuentre en un rango de entre 7 y 10 t/ha (De Ronde et al. 1990, Defossé et al. 2011). Esa cantidad no solo reduce al mínimo el riesgo de incendios incontrolables en caso de ocurrencia, sino que permite que las forestaciones tengan una adecuada provisión de nutrientes provenientes de la descomposición de esos residuos (Kunst y Rodríguez 1997, Fernández y Botelho 2004).

Vale aclarar que, en todos los sitios, el tratamiento de quema se realizó dentro de los parámetros definidos en la ventana de prescripción (HR del aire entre 20 y 40%, la temperatura ambiente entre 12 y 18 °C, y los vientos no superiores a los 12 km / h durante el horario de quema). La técnica usada fue de fuego en retroceso en franjas (Wright y Bailey 1982). Esta técnica implica que el frente de avance del fuego se desplaza en líneas consecutivas y paralelas hacia la dirección del viento dominante, esto permitió un avance más lento del frente de fuego y un mayor tiempo de residencia del mismo en cada parcela. En cuanto al comportamiento del fuego, éste varió en función del combustible que había en cada parcela y a su arreglo espacial.

- Determinación de las emisiones de CO₂ y otros GEIs

Para cuantificar los parámetros antes mencionados, se siguieron las directrices del IPCC (2006). La cantidad de GEI específico (x) liberado de la vegetación durante los incendios (Ex) se calcula siguiendo la metodología para estudiar los GEI (IPCC 2006, capítulo 2, Ec. 2.27):

$E_x = A * B * \epsilon * \delta * 10^{-3}$ (Mg GHG_x), donde:

A es el área total quemada (llevada a ha) determinada para cada tratamiento;

B es la biomasa aérea total quemada por unidad de área (t ha⁻¹);

ε es la fracción de la biomasa consumida durante la quema;

y **δ_x** es el factor de emisión para el GHG_x, y se define como el peso del gas x liberado por kg de biomasa (materia seca) quemada.

Las pérdidas de existencias de carbono, como una fracción del C orgánico total contenido en la biomasa y liberado por cada incendio (CI), se calculan de la siguiente manera (IPCC 2006, Capítulo 2, ecuación 2.14):

$CI = A * B * cf * \epsilon * (Mg C)$. Los parámetros **A**, **B**, **R** y ϵ son los mismos que en la ecuación anterior y **cf** es la fracción **C** de la biomasa aérea.

Los cálculos se llevan luego a toneladas de C por ha y su conversión a emisiones de CO₂.

Tabla 3. Resultados de cálculos de emisiones para cada tratamiento del estudio previo

Sitios / Tratamientos		Biomasa quemada t / ha ⁻¹	CO ₂ t / ha ⁻¹	CH ₄ t / ha ⁻¹	CO ₂ eq [CH ₄] t / ha ⁻¹	CO t / ha ⁻¹	N ₂ O t / ha ⁻¹	CO ₂ eq[N ₂ O] t / ha ⁻¹	NO _x t / ha ⁻¹
1. INTA	Control	0	0	0	0	0	0	0	0
	Triturado*	0	0,363	-	-	-	-	-	-
	Triturado + Quema**	5,9	4,84	0,021	0,55	0,31	0,0006	0,077	0,0018
	Quema prescripta	13,88	9,09	0,050	1,30	0,73	0,0014	0,182	0,0042
2. LA ZETA	Control	0	0	0	0	0	0	0	0
	Triturado*	0	0,363	-	-	-	-	-	-
	Triturado + Quema**	18,43	12,56	0,066	1,73	0,96	0,0018	0,24	0,0055
	Quema prescripta	22,05	14,24	0,08	2,07	1,15	0,0022	0,29	0,0060
3. EJÉRCITO	Control	0	0	0	0	0	0	0	0
	Triturado*	0	0,363	-	-	-	-	-	-
	Triturado + Quema**	19,06	12,992	0,068	1,8	0,99	0,0019	0,25	0,0057
	Quema prescripta	23,59	15,295	0,085	2,21	1,23	0,0024	0,31	0,007
4. LACU LEMU	Control	0	0	0	0	0	0	0	0
	Triturado*	0	0,363	-	-	-	-	-	-
	Triturado + Quema**	7,07	5,36	0,025	0,66	0,37	0,0007	0,092	0,0021
	Quema prescripta	10,56	7,07	0,038	0,99	0,55	0,0011	0,14	0,0032
5. Est. RAGO	Control	0	0	0	0	0	0	0	0
	Triturado*	0,4	0,363	-	-	-	-	-	-
	Triturado + Quema**	10,28	7,41	0,037	0,96	0,53	0,0010	0,135	0,0031
	Quema prescripta	11,0	7,28	0,040	1,03	0,57	0,0011	0,144	0,0033

RESULTADOS

Los sitios elegidos en este estudio, caracterizados como húmedos (sitio 1), méxicos (2 y 5), y xéricos (3 y 4), son representativos del gradiente ambiental de precipitaciones del ecotono bosque-estepa, donde se han realizado la mayoría de las forestaciones de la Patagonia hasta el presente (CIEFAP-UCAR 2017). Esta definición genérica de sitios “húmedos, méxicos y xéricos”, para este ecotono, no está limitada sólo por el gradiente

ambiental de precipitaciones, sino que incluye también aspectos climáticos, de suelo y vegetación.

En términos forestales y cuando a esta definición cualitativa le agregamos las “clases de sitio”, le estamos adicionando su potencial cuantitativo para la producción primaria de madera, definida de manera particular como “tipos de sitio” (Avery y Burkhart 1994). En este contexto, los rodales elegidos para este estudio corresponderían a calidades de sitio entre I y III, de acuerdo con lo definido por Loguercio *et al.* (2015), para forestaciones de pino ponderosa en la Patagonia. Dentro de estas calidades de sitio no sólo estarían los rodales analizados, sino que podrían representar cabalmente a las cerca de 57 mil ha clasificadas como de calidad de sitio I, las 492 mil clasificadas como de calidad de sitio II, y los casi 1,35 millones de ha clasificadas como como de calidad de sitio III, para la realización de forestaciones con esta especie (Loguercio *et al.* 2015).

En la siguiente tabla se resumen y detallan los momentos de los tratamientos y las densidades posteriores a los tratamientos, en las cuales basamos los cálculos y análisis del stock de C por hectárea:

Tabla 4. Resultados y datos luego de los tratamientos silvícolas y previo al análisis de los tarugos

Parcela		EDAD (2021)	Momento de PODA Y RALEO (año)	MOMENTO QUEMA (año)	Densidades luego de los tratamientos pl./ha
1	INTA	26	14	19	350
2	LA Z	28	17	22	425
3	EJERCITO	20	12	14	275
4	LACU LEMU	18	11	14	633
5	RAGO	19	11	14	662

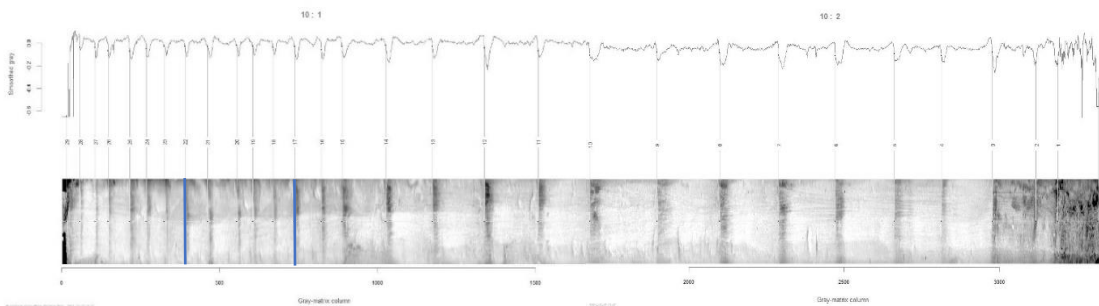
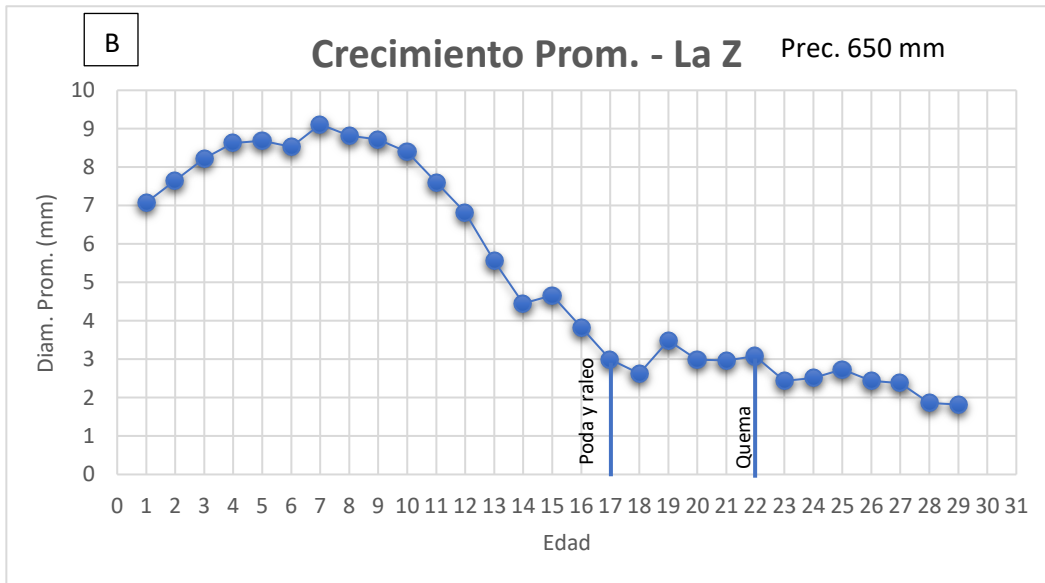
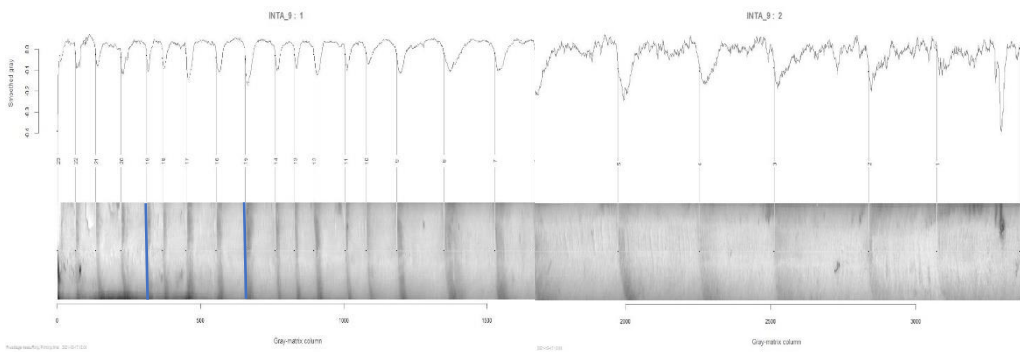
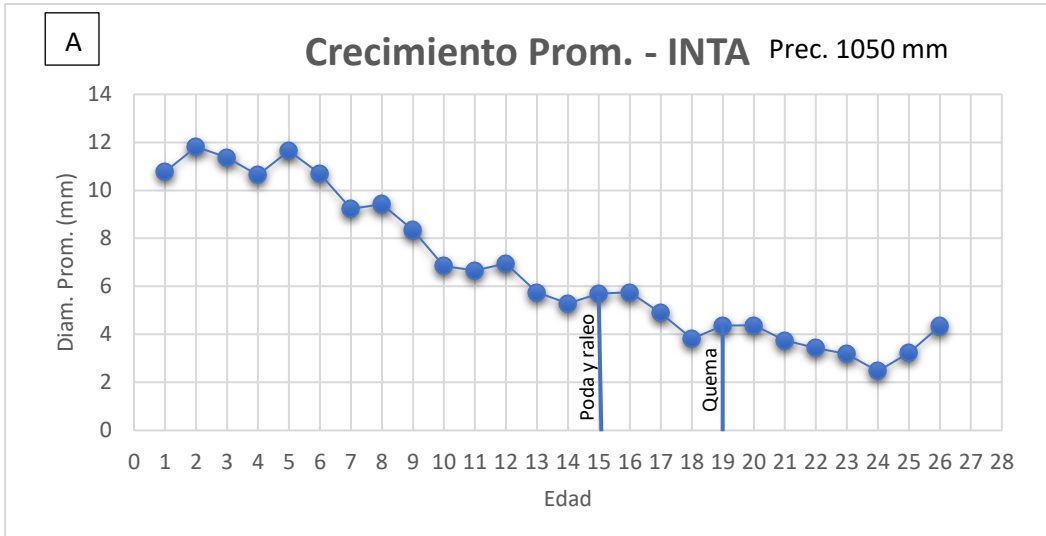
A pesar de las diferencias entre densidades, edades y calidades de sitio de las parcelas, nuestra estimación de valores entre 22 - 50 tn C/ ha-1 en árboles después de podas y raleos coincide bien con otras estimaciones de bosques y plantaciones de pino ponderosa donde se calcularon valores de C aéreo que rondaron los 52,6 tn/ ha-1 en una plantación en la Patagonia (Laclau, 2003), 62,6 kg C/ ha- 1 (Heath et al., 2003), y 66 –77 tn C/ ha-1 en un rodal de Arizona sin podas y raleos (Hart et al., 2006). Valores en el centro Oregon, por ejemplo, varían desde 6,3 tn C/ ha-1 en rodales de 20 años hasta 134,2 tn C/ha- 1 en rodales de 250 años.

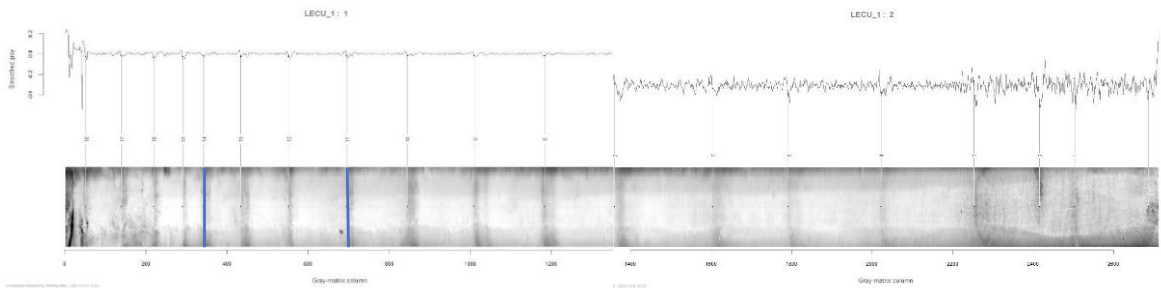
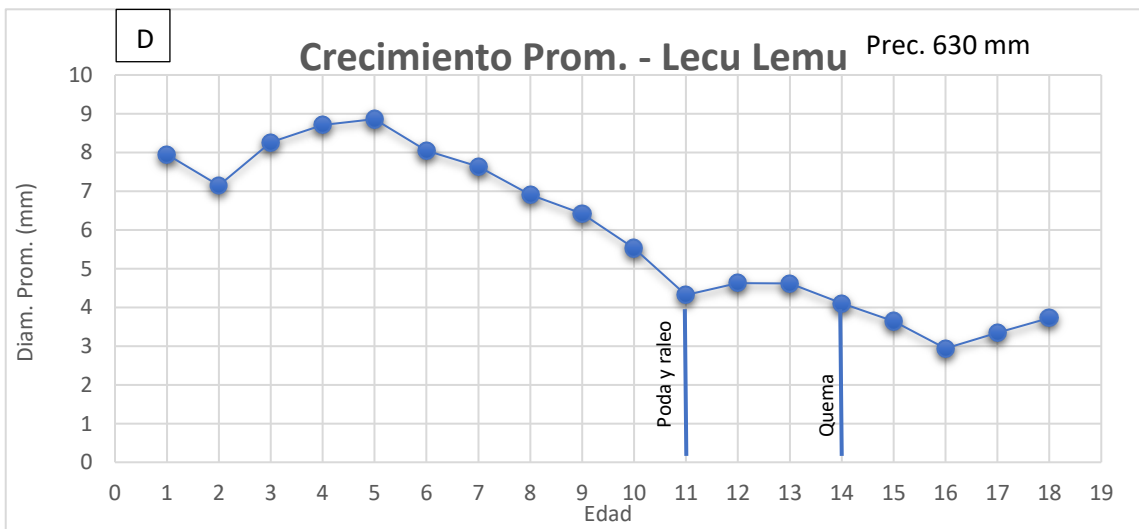
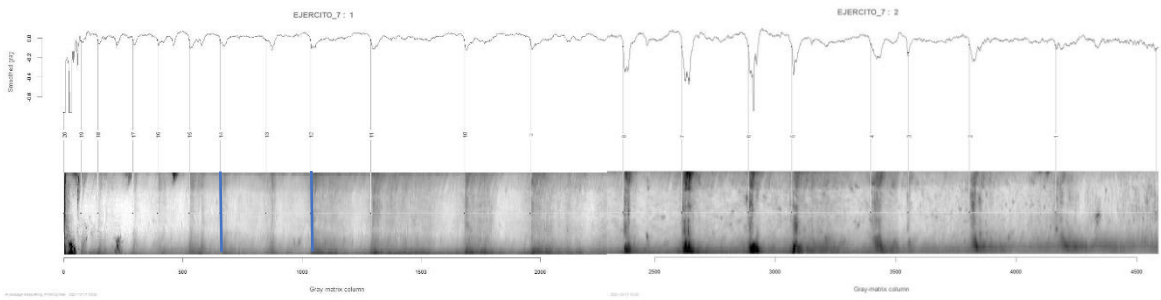
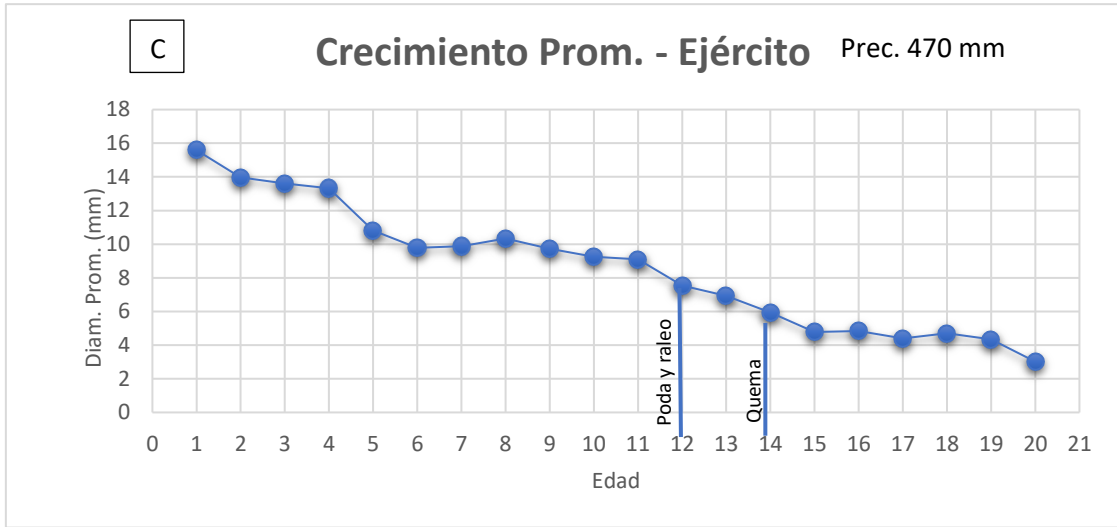
Tabla 5. Resultados de emisiones, biomasa y tiempo de recupero del C para los tratamientos de quema en los rodales.

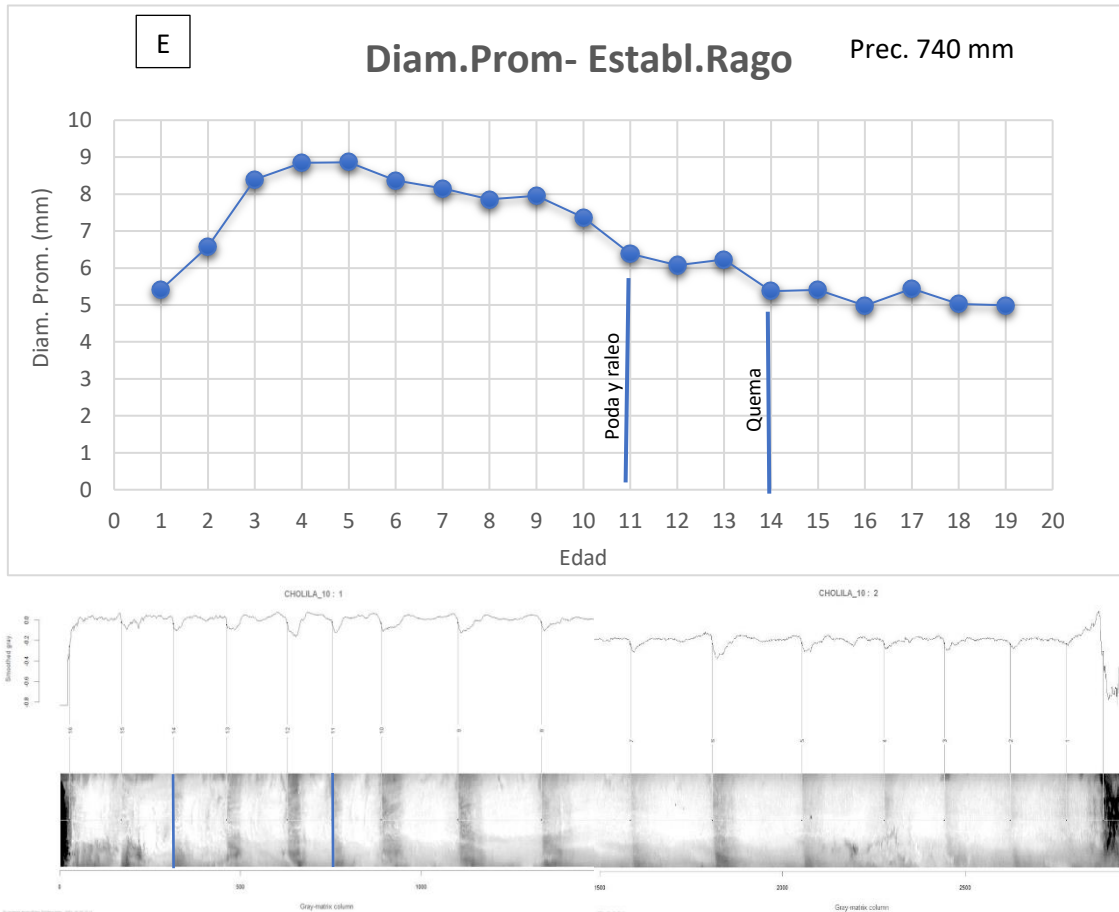
Parcela		tn C/ha-1 total (Hasta 2021),	Emisiones durante QP tn/ha-1	Biomasa remanente (luego de podas y raleos) tn/ha-1	Tiempo de recupero y fijación de C (Años)
1	INTA	58,31	11,36	35,78 ± 0,13	6
2	LA Z		17,84	36,15± 0,7	9
3	EJERCITO	39,49	19,14	38,06 ± 0.92	7
4	LACU LEMU	21,99	8,79	22,67 ± 1,01	6
5	RAGO	41,17	9,07	19,19 ± 0,51	4

En general y salvo en el caso del Establecimiento Rago (Sitio 5) las emisiones variaron en función de la biomasa de residuos disponible en cada sitio, y también se notó una tendencia a que las emisiones tendieron a incrementarse porcentualmente más en lugares más xéricos y menos en lugares más húmedos cuando las quemas se realizaron en las mismas fechas (casos de los Sitios 1, 2, y 3), al inicio de la primavera. La quema en el Sitio 5 se realizó ya entrada la primavera, cuando los combustibles tienden a secarse rápidamente, mientras que en el Sitio 4, xérico, la quema se realizó a principios del invierno, cuando hay mucha humedad en el suelo y el secado de los combustibles se dificulta.

A continuación, se presentan los gráficos de ancho de anillos y edad de los rodales acompañado (Figura 5) de un ejemplo del resultado del procesamiento de los tarugos con el complemento de measuRing







En el gráfico correspondiente al Sitio 1 del INTA (Figura 5A), se observa un aumento del ancho de anillos tras la implementación de prácticas silvícolas como la poda y el raleo. Esto evidencia el impacto inmediato de estas intervenciones en el rodal. Sin embargo, al comparar este sitio con Lacu Lemu (Figura 5 D), se notan diferencias significativas, no solo dadas por el sitio y las precipitaciones, sino que la poda y el raleo fueron realizados con mayor antelación, por lo que se observa un patrón de crecimiento más uniforme a pesar de las condiciones menos favorables, como un menor índice de precipitaciones. El criterio de realizar las practicas en el momento adecuado es favorable desde el punto de vista tecnológico de la madera, ya que garantiza una mayor homogeneidad en las propiedades del material.

En el caso del Sitio 1 del INTA, las intervenciones tardías han generado una mayor variabilidad en el ancho de los anillos debido a la competencia entre los árboles. Esto sugiere que el momento de aplicación de las prácticas silvícolas es crucial para regular el crecimiento radial.

Por otro lado, en el sitio correspondiente al Ejército, el crecimiento y el ancho de los anillos parecen estar influenciados por factores ambientales específicos. Este rodal se encuentra en un pie de ladera con exposición oeste, una zona que recibe importantes nevadas. Es probable que la precipitación efectiva en este sitio sea considerablemente mayor que la registrada por los datos meteorológicos, debido al aporte de agua proveniente del derretimiento de la nieve, que desciende por la ladera e infiltra el suelo.

Este fenómeno podría explicar tanto el mayor ancho de los anillos como el notable crecimiento de los rodales en este sitio, lo que resalta la importancia de las características micro ambientales en el desarrollo forestal.

Con respecto a la incidencia del gradiente ambiental de precipitación en el crecimiento de los rodales, no parece claro que haya una relación directa entre >precipitación >crecimiento de los anillos. Es probable que otros factores propios de la dinámica cada rodal (como competencia con otras especies, ubicación y cantidad de cenizas volcánicas en el perfil del suelo, evapotranspiración a nivel de sitio, edad de cada rodal, y otros), aparte del propio gradiente de precipitación, puedan haber afectado de manera diferente el crecimiento de cada rodal. Lo que es claro, es que todos los rodales recuperan el carbono perdido durante la quema entre 4 y 9 años posteriores a la misma, lo que ofrece sin dudas beneficios tangibles como la captura y almacenamiento de carbono en la biomasa del rodal, una disminución del riesgo de incendios y un crecimiento más previsible hasta el turno de corta. Las quemas prescriptas en rodales de pinos en Patagonia, bien planificadas y ejecutadas, brindan beneficios ecológicos, productivos y ambientales que es necesario ponderar.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Los bosques y los suelos que se encuentran debajo de ellos son un importante sumidero de CO₂ atmosférico y desempeñan un papel importante en la compensación de las emisiones de CO₂ al convertir el CO₂ en madera a través de la fotosíntesis y almacenarlo durante un período prolongado. Sin embargo, los incendios forestales contrarrestan el secuestro de carbono porque la pirólisis convierte el carbono orgánico en CO y CO₂, liberando décadas o siglos de carbono ligado a la atmósfera en forma de pulso, lo que exacerba el efecto de los gases de efecto invernadero. Con el calentamiento global, la probabilidad de incendios ha aumentado.

Se ha demostrado que la silvicultura es una herramienta importante para reducir el riesgo de incendios forestales y mejorar el secuestro de carbono a largo plazo y, a través de esto, mitigar el efecto del cambio climático. Llegamos a la conclusión de que, para gestionar los bosques en busca de carbono y la mitigación de los efectos de los incendios debemos prestar más atención al manejo y gestión del crecimiento de los árboles del dosel superior mediante estrategias económicas y ecológicamente viables, lo que brindará más oportunidades a los forestales para crear bosques resistentes a las perturbaciones y almacenar carbono durante más tiempo en un clima cambiante.

Aunque los tratamientos silviculturales no influyan en la probabilidad de ignición de incendios, sí cambian el comportamiento del fuego al eliminar la continuidad vertical de los combustibles en escalera, reducir la densidad de árboles y alterar la altura del dosel. Si bien en este estudio limitamos el alcance de este análisis del carbono forestal a las plantas que quedan en pie luego de los tratamientos, las quemas prescriptas y la ausencia de gestión, es importante mencionar que, dependiendo del uso final, los troncos extraídos de los raleos podrían producir compensaciones de carbono si se producen productos de madera de larga duración o podrían dar lugar a liberaciones netas de carbono durante los

próximos 100 años si se producen productos de madera de corta duración (Skog y Nicholson, 1998; Gower, 2003; Finkral y Evans, 2008). De manera similar, casi todos los residuos producidos a partir de la tala se contabilizaron como emisiones de carbono. Sin embargo, las plantas energéticas de biomasa pueden capturar y utilizar la energía de la quema de residuos, lo que proporciona un sustituto neutro en carbono para otros combustibles fósiles (Skog y Nicholson, 1998). Por lo tanto, dependiendo del destino de los troncos y los desechos, estas liberaciones de carbono podrían potencialmente volverse carbono neutrales.

En la actualidad, la forestación con pino ponderosa y otras coníferas en la Patagonia se produce a tasas mínimas, muy por debajo de su potencial agroecológico y económico. La creación de clústeres de producción forestal contribuiría fuertemente a la captura de carbono atmosférico. Además, el desarrollo económico facilitaría el aumento de las plantaciones en sitios de condición marginal, que ahora son admisibles bajo el mecanismo de Desarrollo del Protocolo de Kioto para acreditar la reducción de las emisiones de C.

Creemos finalmente que esta es una contribución al conocimiento sobre los efectos de las quemas prescriptas en la reducción de combustible que serán sin dudas útiles para el manejo de las forestaciones que se realizan en el ecotono bosque-estepa de la Patagonia. De esta manera intentamos contribuir al mejoramiento y desarrollo de técnicas silvícolas que favorezcan el equilibrio entre la conservación de la biodiversidad y la productividad en paisajes productivos forestales de la Patagonia. Los tratamientos de raleos y podas tienen como objetivo primordial maximizar la producción forestal a través de la manipulación de la densidad y estructura de los rodales. Estos tratamientos generan residuos que es necesario tratar para reducir la posibilidad incendios catastróficos. Independientemente del tratamiento de reducción usado y de sus costos, las estructuras forestales tratadas con cualquiera de ellos podrían considerarse como resilientes al fuego, o capaces de tolerar un incendio natural con una mínima pérdida de sus áreas basales (Agee and Skinner 2005; Vaillant et al. 2009).

BIBLIOGRAFIA

- Avery, T. E., Burkhardt, H. E. (1994). *Forest Measurements*. Fourth Edition. McGraw-Hill. 408 pp.
- Balshi MS, Mc Guire AD, Duffy P, Flannigan M, Kicklighter DW, Melillo J (2009) Vulnerability of carbon storage in North American boreal forests to wildfires during the 21st century. *Global Change Biology* 15, 1491–1510. doi:10.1111/J.1365-2486.2009.01877.X
- Bertolin ML, Urretavizcaya MF, Defosse´ GE (2015) Fire emissions and carbon uptake in severely burned lenga beech (*Nothofagus pumilio*) forest of Patagonia, Argentina. *Fire Ecology* 11, 32–54. doi:10.4996/FIREECOLOGY.1101032.
- Brown, S. (1997). *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer* (FAO Forestry Paper - 134).
- Cruz-Sánchez, Y., López-Teloxa LC, Gómez-Díaz, JD, Monterroso-Rivas, AI. (2021). Respiración del suelo en un bosque templado de México y su relación con el carbono orgánico. *Madera y Bosques* 27, 2. Doi: 10.21829/myb.2021.2722153
- Narayan C, Fernandes P, van Brusselen J, Schuck A (2007) Potential for CO₂ emissions mitigation in Europe through prescribed burning in the context of the Kyoto protocol. *Forest Ecology and Management* 251, 164–173. Doi:10.1016/J.FORECO.2007.06.042
- Defossé, GE, MM Godoy, ML Bertolin (2020). Carbon balance and fire emissions in Andean cypress (*Austrocedrus chilensis*) forests of Patagonia, Argentina. *International Journal of Wildland Fire* <https://doi.org/10.1071/WF19183>.
- Defosse´ GE, Loguercio G, Oddi FJ, Kraus PD (2011) Potential CO₂ emissions mitigation through forest prescribed burning: a case study in Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management* 261, 2243– 2254. doi:10.1016/J.FORECO.2010.11.021
- Holmes TP, Hugget RJ, Westerling AL (2008) Statistical Analysis of Large Wildfires. In ‘Economics of Forest Disturbance: Wildfires, Storms, and Invasive Species’, *Forestry Sciences series*, Vol. 79. (Eds TP Holmes, JP Prestemon, KL Abt) pp. 59–77. (Springer: Dordrecht, the Netherlands)
- Husch, B., Beers, T. W., & Kershaw, J. A. (2003). *Forest Mensuration*.
- Buduba C. G., G. E. Defossé, J. A. Irisarri. 2016. Effects of ponderosa pine afforestation on soil organic matter dynamics in semiarid rangeland steppes of western Patagonia, Argentina. *Agroforestry Systems* 91(5):895-900 (DOI: 10.1007/s10457-016-9963-6)
- USDA. <https://www.fs.usda.gov/managing-land/prescribed-fire>
- Defossé, G. E. 2018. Interacción suelo forestal – fuego. *Foro Internacional de Incendios Forestales en Latinoamérica*.

- IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- Laclau P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwestern Patagonia. *For. Ecol. Manage.* 180:317-333.
- La Manna L, Noli P, Cuerda F, Concha M, Tarabini M, Gómez F, Vogel B & Gomez C. 2018. Physical soil properties and epigeal macrofauna in *Pinus ponderosa* afforestations of Patagonia: keys for sustainable forest management. 21th World Congress of Soil Science. Río de Janeiro, Brasil, 12 al 17 de agosto de 2018.
- Loguercio G., J. Lencinas & S. Antequera 2004. “Bases estratégicas para proyectos de forestación en la Patagonia como Mecanismo para un Desarrollo Limpio. Estudio de caso en la Provincia del Chubut”. Informe Final Proyecto PIA 05/02. SAGPyA-CIEFAP. 72 p.
- Loguercio G. A. y A. Jovanovski (ex – aequo), J. C. Molina y P. Pantaenius, 2008. “Residuos de biomasa de forestaciones y aserraderos de la región andina de las Provincias de Neuquén y Chubut. Evaluación preliminar de oferta”. JICA-INTA-SayDS-CIEFAP. Publicación técnica del CIEFAP N° 34. ISSN 1514-2264. 79 pag.
- Wade, Dale D.; Lunsford, James D. 1989. A guide for prescribed fire in southern forests. Technical Publication R8-TP-11. Atlanta, GA: USDA Forest Service, Southern Region. 56 p.
- Fundación Pau Costa – Federación de Bomberos Voluntarios de la Provincia de Córdoba. Córdoba, 18 al 20 de octubre.
- Concha, M., M. Paz, A. Vásquez, M.M. Godoy, y G.E. Defossé. (2018). Quema prescrita bajo dosel de pino radiata en Trevelin, Patagonia Argentina: una práctica para el aprendizaje. Seminario Binacional “Incendios Forestales en el Fin del Mundo”, Organizado por UNPSJB-CIEFAP y Comité de Despachadores de Incendios de Chile. Esquel, Chubut 9 al 11 de octubre de 2018 (Presentación en poster).
- Lederer, N.S., M.M. Rago, M.M. Godoy, and G.E. Defossé. 2017. Biomass decomposition and upper soil nutrient dynamics as affected by different techniques of treating pruning and thinning residues of ponderosa pine afforestations located in an environmental gradient of Patagonia, Argentina. Presentación de Poster. 7th. International Fire Ecology and Management Congress. Orlando, Florida, 28 de noviembre al 2 de diciembre.
- AFE, IAWF, Tall Timber Res. Station, and The Nature Conservancy (2013). The Merits of Prescribed Fire Outweigh Potential Carbon Emission Effects. White Paper developed by Association for Fire Ecology, International Association of Wildland Fire, Tall Timbers Research Station, and The Nature Conservancy.

<https://static1.squarespace.com/static/5ea4a2778a22135afc733499/t/5eae01f38c966d21d66cb5d5/1588462076626/AFEs-Prescribed-Fire-Position-Paper-2013.pdf>

- Penman TD, Christie FJ, Andersen AN, Bradstock RA, Cary GJ, Henderson MK, Price O, Tran C, Wardle GM, Williams RJ, York A (2011) Prescribed burning: how can it work to conserve the things we value? *International Journal of Wildland Fire* 20, 721–733. doi:10.1071/ WF09131
- Rago, M. M., M. F. Urretavizcaya, G. E. Defossé (2022). Responses of native plants of the Patagonian steppe to reduced solar radiation caused by exotic coniferous plantations: a nursery approach. *European Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01523-y>
- Rago, M. M., M. F. Urretavizcaya, G. E. Defossé (2021). Relationships among forest structure, solar radiation, and plant community in ponderosa pine plantations in the Patagonian steppe. *Forest Ecology and Management*. DOI:10.1016/j.foreco.2021.119749.
- Rago, M. M., M. F. Urretavizcaya, I. A. Orellana, G. E. Defossé. (2020a). Strategies to persist in the community: Soil seed bank and above-ground vegetation in Patagonian pine plantations. *Applied Vegetation Science* 23:254–265. doi: 10.1111/avsc.12482
- Rago, M. M., M. F. Urretavizcaya, N. S. Lederer, G. E. Defossé. (2020b). Plant Community Response to Forest Fuel Management in Patagonian Pine Plantations. *Frontiers in Forests and Global Change*. doi: 10.3389/ffgc.2020.00055
- Urretavizcaya, M.F., G.E. Defossé y H.E. Gonda. 2006. Efectos a corto plazo del fuego en la cubierta vegetal y las condiciones del suelo en dos bosques de *Austrocedrus chilensis* (ciprés) en la Patagonia, Argentina. *Anales de Ciencias Forestales* 63: 63–71. doi: 10.1051/forest:2005098
- Veblen, T.T., A. Holz, J. Paritsis, E. Raffaele, T. Kitzberger y M. Blackhall. 2011. Adaptación al cambio ambiental global en la Patagonia: ¿qué papel desempeña la ecología de las perturbaciones? *Ecología Austral* 36: 891-903. doi: 10.1111/j.1442-9993.2010.02236.x
- Zhang, Jianwei; Powers, Robert F.; Skinner, Carl N. 2010. Gestionar o no gestionar: el papel de la silvicultura en el secuestro de carbono ante el espectro del cambio climático. En: Jain, Theresa B.; Graham, Russell T.; Sandquist, Jonathan. *Gestión integrada de las oportunidades de secuestro de carbono y utilización de biomasa en un clima cambiante: Actas del Taller Nacional de Silvicultura de 2009*; 15-18 de junio de 2009; Boise, ID. Actas RMRS-P-61. Fort Collins, CO: Departamento de Agricultura de los EE. UU., Servicio Forestal, Estación de Investigación de las Montañas Rocosas. págs. 95-110.

ANEXO I . Tablas de estimación de captura de C

SITIO										
INTA	N° árbol	DAP cm	Altura (m)	Biomasa fuste_kg	Biomasa ramas_kg	Biomasa acículas_kg	Biomasa total	captura de c en kg	kg C/ha	tn C/ha-1
	1	43,2	15,6	345,1	101,8	32,2	479,0	1665,96601	58308,8105	58,31
	2	33,5	16,75	223,5	62,0	24,6	310,1			
	3	33,7	15	202,7	62,7	24,8	290,2			
	4	41	16,9	336,8	91,9	30,4	459,1			
	5	30,6	16,5	184,0	52,1	22,4	258,5			
	6	34,6	16,5	234,8	66,0	25,5	326,2			
	7	36,9	17,02	275,1	74,8	27,3	377,2			
	8	34,2	16,47	229,0	64,5	25,2	318,7			
	9	32,7	15,75	200,4	59,2	24,0	283,6			
	10	31,2	13,11	152,3	54,1	22,8	229,2			
						SUMA BIOM	3331,9			
SITIO										
LA ZETA										
	Árbol n°	DAP cm	Altura (m)	Biomasa fuste_kg	Biomasa ramas_kg	Biomasa acículas_kg	Biomasa total	captura de c en kg	kg C/ha	tn C/ha-1
	1	35,5	15,4	230,7	69,4	26,2	326,2	1486,40097	63172,0414	63,17
	2	37	13,1	213,3	75,2	27,3	315,8			
	3	38	14,9	255,5	79,2	28,1	362,9			
	4	35	13,9	202,6	67,5	25,8	295,9			
	5	35	15,8	230,1	67,5	25,8	323,4			
	6	33,1	13,3	173,7	60,6	24,3	258,6			
	7	33,6	15,5	208,2	62,4	24,7	295,3			
	8	31,6	13,7	163,2	55,4	23,1	241,7			
	9	31,7	12,8	153,5	55,7	23,2	232,5			
	10	33,1	18,1	235,7	60,6	24,3	320,6			
						SUMA BIOM	2972,8			

SITIO										
Ejército	Árbol n°	DAP cm	Altura (m)	Biomasa fuste_kg	Biomasa ramas_kg	Biomasa acículas_kg	Biomasa total	captura de c en kg	kg C/ha	tn C/ha-1
	1	32,1	19,6	240,0	57,1	23,5	320,6	2085,59857	52139,9641	52,14
	2	31	17,8	203,6	53,4	22,7	279,6			
	3	33,3	18	237,2	61,3	24,5	323,0			
	4	43,4	19,2	428,3	102,7	32,3	563,2			
	5	37,9	16,3	277,9	78,8	28,0	384,8			
	6	37,5	18,3	305,3	77,2	27,7	410,2			
	7	40	15,6	296,2	87,5	29,7	413,4			
	8	35,4	17,6	261,9	69,0	26,1	357,0			
	9	42,9	17,5	381,6	100,4	31,9	513,9			
	10	37,6	17,3	290,2	77,6	27,8	395,6			
	11	29,3	13,71	140,6	47,9	21,4	209,9			
						SUMA BIOM	4171,2			

SITIO										
LACU LEMU										
	Árbol n°	DAP cm	Altura (m)	Biomasa fuste_kg	Biomasa ramas_kg	Biomasa acículas_kg	Biomasa total	captura de c en kg	kg C/ha	tn C/ha-1
	1	25,4	8,9	69,6	36,5	18,3	124,4	615,372238	38953,0627	38,95
	2	23,2	7,8	51,4	30,8	16,6	98,8			
	3	24,5	10,4	75,5	34,1	17,6	127,2			
	4	28,3	10,6	102,0	44,8	20,6	167,4			
	5	28,8	9,8	97,7	46,4	21,0	165,0			
	6	25	8,7	66,0	35,4	18,0	119,4			
	7	19,1	9,4	42,3	21,5	13,4	77,3			
	8	26,4	10,7	89,8	39,3	19,1	148,2			
	9	24,2	8,5	60,6	33,3	17,4	111,3			
	10	22	8,1	48,1	27,9	15,7	91,7			
						SUMA BIOM	1230,7			

SITIO										
Rago	N° árbol	DAP cm	Altura (m)	Biomasa fuste_kg	Biomasa ramas_kg	Biomasa acículas_kg	Biomasa total	captura de c en kg	kg C/ha	tn C/ha-1
	1	31,4	11	129,7	54,7	23,0	207,5	898,705629	59494,3126	59,49
	2	33,8	11,6	158,1	63,1	24,8	246,1			
	3	33,7	10,8	146,5	62,7	24,8	234,0			
	4	28,3	10,4	100,1	44,8	20,6	165,5			
	5	26,2	9,8	81,2	38,7	18,9	138,9			
	6	26	9,8	80,0	38,2	18,8	136,9			
	7	25,5	10,6	83,1	36,8	18,4	138,3			
	8	30	12,6	135,6	50,1	21,9	207,6			
	9	25,4	10,4	81,0	36,5	18,3	135,8			
	10	29,5	11,2	116,8	48,5	21,5	186,8			
						SUMA BIOM	1797,4			