

Plantación de especies forestales nativas en matorrales de Patagonia norte: respuesta a la apertura inicial de dosel en sitios contrastantes

Planting native forest species in northern Patagonian woodlands: response to canopy opening in contrasting sites

Marcos E Nacif ^{a,b*}, Matías G Goldenberg ^{a,b}, Facundo J Oddi ^{a,b},
Mario J Pastorino ^c, Alejandro G Aparicio ^c, Lucas A Garibaldi ^{a,b}

^aUniversidad Nacional de Río Negro. Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural, Bariloche, Río Negro, Argentina, tel.: 54 294 4597347.

* Autor de correspondencia: ^b Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural, Bariloche, Argentina, mnacif@unrn.edu.ar

^c Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Bariloche, IFAB (INTA – CONICET), Bariloche, Argentina.

SUMMARY

Enriching forests with native trees used for their high-value timber could allow productivity and biodiversity conservation goals to be achieved together. In certain Patagonian forests (*e.g.* low forests composed by resprouting species), this requires an analysis of the degree of canopy opening that guarantees planting success. We evaluated the influence of canopy opening intensity (OI) on the survival and height growth of a plantation of native tree species in three contrasting sites (south slope: SS, north slope: NS, and valley bottom: VB). At each site, we established an OI gradient of 0, 30, 50, and 70 % of initial biomass extraction, and planted *Austrocedrus chilensis*, *Nothofagus dombeyi*, *N. pumilio*, *N. antarctica*, *N. alpina* and *N. obliqua* (monitored for nine years). The optimal OI for average seedling survival was site-dependent; in SS the optimal survival was at intermediate OI (62 - 78 %), while in NS no differences were observed up to 50 % OI (32 %), and in VB plant survival was less than 3 %. *N. obliqua* and *A. chilensis* had the highest survival rate (60 % and 97 %, respectively). Annual plant growth varied among sites, with 27 ± 6 cm/year in SS, 10 ± 3 cm yr⁻¹ in NS, and 5 ± 2 cm yr⁻¹ in VB. *N. obliqua* reached the highest average plant height, with 4.2 ± 2 m in SS and 1.8 ± 1 m in NS. In SS most of the species grew from 18 to 60 % annually. Our results showed that management schemes should be species and site specific. We recommend planting on wetter slopes and initially removing up to 50 % woodland biomass.

Keywords: *Nothofagus* sp., *Austrocedrus chilensis*, opening intensity, native wood

RESUMEN

Una estrategia de manejo forestal que podría combinar exitosamente la producción y la conservación de la biodiversidad en bosques naturales, es su enriquecimiento con árboles nativos de valor maderero. En ciertos bosques de Patagonia (*e.g.* matorrales) esto requiere definir el grado de apertura inicial del dosel para garantizar el éxito de la plantación. En este trabajo, evaluamos el efecto de la intensidad de apertura (IA) en la supervivencia y crecimiento inicial en altura de plantaciones de especies forestales nativas maderables, en tres sitios contrastantes (ladera sur: LS, ladera norte: LN y fondo de valle de altura: FV) en la provincia de Río Negro, Argentina. En cada sitio establecimos un gradiente de IA: 0, 30, 50 y 70 % de biomasa extraída, en donde plantamos *Austrocedrus chilensis*, *Nothofagus dombeyi*, *N. pumilio*, *N. antarctica*, *N. alpina* y *N. obliqua* y medimos supervivencia y crecimiento durante nueve años. La IA óptima para maximizar la supervivencia promedio de los plantines dependió del sitio; en LS se alcanzó a IA intermedias (62 - 78 %), mientras que en LN no se observaron diferencias hasta 50 % IA (32 %) y en FV fue menor a 3 % en promedio independientemente de IA. *N. obliqua* y *A. chilensis* fueron las especies que más sobrevivieron (60 % y 97 % respectivamente). El crecimiento anual varió entre sitios, 27 ± 6 cm año⁻¹ en LS, 10 ± 3 cm año⁻¹ en LN y 5 ± 2 cm/año en FV. *N. obliqua* alcanzó mayor altura promedio, $4,2 \pm 2$ m en LS y $1,8 \pm 1$ m en LN. En LS la mayoría de las especies crecieron de 18 a 60 % en altura anualmente. Nuestros resultados sugieren plantar en laderas húmedas y remover inicialmente hasta un 50 % de biomasa del matorral para lograr un mayor éxito. No obstante, la IA óptima dependerá de la especie y del sitio específico.

Palabras clave: *Nothofagus* sp., *Austrocedrus chilensis*, intensidad de apertura, madera nativa.

INTRODUCCIÓN

El cambio global y la presión antrópica ejercida sobre los bosques impone el desafío de generar estrategias de manejo que satisfagan la demanda de bienes y servicios, y a la vez conserven la biodiversidad (Payn *et al.* 2015). Los bosques nativos de bajo valor maderero han sido comúnmente reemplazados por otros usos del suelo tales como forestaciones mono-específicas de exóticas (*e.g.* *Pinus* sp., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, 1950, *Eucalyptus* sp.), ganadería y/o cultivos intensivos (Raffaele *et al.* 2014, Pretzsch *et al.* 2017). Una estrategia novedosa y superadora para aumentar el valor económico de estos bosques es su enriquecimiento mediante la plantación de especies nativas de alto valor maderero (Pretzsch *et al.* 2017, Nacif *et al.* 2021). Esta alternativa de manejo, permite la conservación del ecosistema nativo sin ser reemplazado completamente, sino que se lo complejiza implantando árboles de especies autóctonas de la región, y por tanto adaptadas al ecosistema local (Álvarez-Garretón *et al.* 2019). Esta práctica, representa además una alternativa superadora en términos de calidad en las interacciones ecológicas con el ecosistema nativo (Altamirano *et al.* 2020). Más aún, combinada con aperturas del dosel que modifiquen favorablemente las condiciones de micro-sitio, constituye una oportunidad de manejo adaptativo al cambio climático (Löf *et al.* 2019). Una apertura adecuada puede proveer suficiente cantidad de luz para el óptimo crecimiento de los árboles plantados, y al mismo tiempo el mantenimiento de la matriz vegetal original permite proteger de la desecación y de las heladas a los mismos (Nacif *et al.* 2021). Sin embargo, cuál es, en el mediano plazo, la apertura óptima inicial para cada condición de sitio y especie es un parámetro incierto. El enriquecimiento del bosque con especies nativas es actualmente una práctica incipiente en la región patagónica argentina, y como tal, es necesario desarrollar el conocimiento silvícola para mejorar la productividad forestal.

El éxito de la forestación en las etapas iniciales es clave para garantizar la viabilidad del proyecto forestal. Adicionalmente a la procedencia y calidad de las plantas, el sitio y la preparación del mismo condicionan las decisiones de manejo (Löf *et al.* 2019). En paisajes caracterizados por una alta heterogeneidad ambiental, geomorfológica y edáfica como los montañosos, el manejo requiere una planificación a nivel de sitio o micro-sitio, y esto incluye la selección de la/s especie/s a plantar en función de estos. Las condiciones ambientales que caracterizan a los sitios (*i.e.* temperatura, exposición, profundidad de suelo, etc.) interactúan con las especies impactando en el éxito de la plantación, y a su vez estas condiciones pueden ser modificadas por cambios en la matriz de vegetación interviniendo en el dosel (*i.e.* cambios de temperatura, niveles de luz, humedad, heladas, etc.) (Pafundi *et al.* 2014, Gönc *et al.* 2015). El conocimiento de estos aspectos es escaso en los bosques nativos de la Patagonia argentina.

Los matorrales conforman uno de los ecosistemas forestales más complejos y diversos de Patagonia norte Argentina. Son bosques bajos, muchas veces multi-específicos, dominados por especies leñosas nativas heliófilas y rebrotantes, pioneras en la sucesión luego de disturbios como el fuego Raffaele *et al.* 2014), y son un componente clave de la biodiversidad de estos ecosistemas (Goldenberg *et al.* 2020a). Estos ecosistemas pueden estar dominados por *Nothofagus antarctica* (Forst.) Oerst., o ser mixtos, donde se suman otras especies leñosas como *Lomatia hirsuta* (Lam.) Diels *ex* J.F. Macbr., *Schinus patagonicus* (Phil.) I. M. Johnst. *ex* Cabrera y *Diostea juncea* (Gillies *ex* Hook.) Miers (Gyenge *et al.* 2009). En menor medida también pueden estar presentes *Maytenus boaria* (Mol.), *Fabiana imbricata* Ruiz *et* Pavón, *Embothrium coccineum* J. R. Forst. *et* G. Forst., *Discaria chacaye* (G. Don) Tortosa y otras. Ambos tipos ocupan, fundamentalmente, fondos de valles y laderas bajas e intermedias (Reque *et al.* 2007). Estas especies leñosas tienen adaptaciones que les permiten sobrevivir a los incendios cuando estos no son de gran severidad (lignotubérculos), rebrotando rápidamente (Tiribelli *et al.* 2018). Los matorrales mixtos, en la fase de iniciación post-incendio, forman un rodal multiespecífico, pero en ausencia de disturbios los rodales pueden ser dominados por *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.Serm. & Bizzarri, y/o *Nothofagus dombeyi* (Mirb) Oerst. (Veblen y Lorenz 1987). No obstante, dicha conversión muchas veces no se cumple, ya que los matorrales son comunidades altamente pirófilas y esta dinámica suele ser interrumpida por la ocurrencia de nuevos incendios (Morales *et al.* 2015). Asimismo, estos ecosistemas se encuentran entre los bosques más cercanos a centros urbanos y frente a disturbios tales como incendios, tienden a generar ciclos de retroalimentación positiva (Raffaele *et al.* 2014), interrumpiendo su sucesión hacia estadios menos ignífugos y fomentando mayor frecuencia y severidad de incendios. Históricamente estos bosques han sido considerados comunidades de bajo valor económico-ambiental, promoviéndose su reemplazo por otros usos del suelo, entre estos la forestación de coníferas exóticas y la ganadería bovina/ovina, lo que ha impactado en su integridad (Raffaele *et al.* 2014). En este contexto, la necesidad de desarrollar alternativas productivas que incrementen el valor productivo de este ecosistema forestal, y eviten los cambios drásticos de uso y la pérdida de los servicios ecosistémicos que conllevan, es un aspecto prioritario para la silvicultura regional. La normativa vigente en la Argentina y la región referida al uso de bosques (LN 26.331, LN 25.080 y LP 4.552) fomenta el manejo de la mayoría de los matorrales, incluyendo su enriquecimiento y restauración.

El enriquecimiento de los matorrales de Patagonia norte requiere definir el grado de apertura del dosel que garantice el éxito de la plantación. Las cortas parciales han demostrado aumentar la productividad, mantener la integridad ecológica y conservar la biodiversidad, proporcio-

nando a la vez un ingreso económico inicial con subproductos como leña y postes, que contribuye a cubrir parte de la inversión requerida para la plantación (Nacif *et al.* 2021, Goldenberg *et al.* 2020ab). Si la apertura además garantizara el establecimiento de la plantación, el componente arbóreo alcanzado en el largo plazo produciría madera de mayor calidad que la ofrecida por los matorrales. Ello dependerá de la supervivencia y crecimiento de los plantines (dos parámetros de éxito de la plantación), que se presume variarán entre especies plantadas en un mismo sitio dado que interactúan con el sistema de acuerdo a sus características autoecológicas (*i.e.* tolerancia a la sombra, rango térmico, crecimiento, interacciones bióticas) (Pretzsch *et al.* 2017). De la misma forma, se espera que condiciones ambientales contrastantes determinen diferencias en la calidad de sitio y, consecuentemente, en el éxito de la plantación a mediano plazo (Oddi *et al.* 2021). Estudios recientes de corto plazo (2 - 3 años) en matorrales de ladera sur enriquecidos con especies nativas mostraron que el mayor éxito inicial se alcanza con aperturas parciales correspondientes a ~ 30 - 50 % del área basal (Nacif *et al.* 2021). Sin embargo, se desconoce si esto se mantiene en etapas posteriores y si el grado de apertura óptimo es generalizable a otros tipos de matorral. El conocimiento de las diferencias inter-específicas asociadas a los sitios, sobre todo en el mediano y largo plazo, facilita la decisión sobre qué plantar y dónde.

El objetivo del presente trabajo es evaluar en matorrales de Patagonia norte la influencia a mediano plazo de la intensidad de apertura y del sitio en la supervivencia y crecimiento en altura de plantaciones de especies forestales nativas de alto valor maderero. El propósito es ajustar la tecnología de una alternativa productiva para los matorrales a largo plazo manteniendo los servicios ecosistémicos que proveen.

MÉTODOS

Experimento manipulativo. Trabajamos en matorrales situados en las inmediaciones de la localidad de El Foyel, Provincia de Río Negro (Argentina, apéndice 1). Específicamente, trabajamos en tres sitios contrastantes: 1) matorral de ñire en un fondo de valle de altura con una baja productividad (FV); 2) matorral mixto de ladera norte con productividad media (LN) y 3) matorral mixto de ladera sur de alta productividad (LS), caracterizados de esta manera en función de la altura dominante del matorral y la densidad de cobertura (apéndice 2). En cada sitio se instaló en 2013 y 2014 un bloque de 4 parcelas (cada una de 31,5 x 45 m = 1.418 m²) a las que, aleatoriamente, se les aplicó un nivel dentro de un gradiente de intensidad de apertura de dosel (IA: de 0 %, 30 %, 50 % y 70 % del área basal removida, figura 1 y apéndice 3). Cada parcela representó un nivel de intervención. Las aperturas se realizaron siguiendo un esquema de seis fajas por parcela. Específicamente, el 30 % de IA se obtuvo con seis fajas de

1,5 m de ancho (3,0 m de vegetación remanente entre sí), el 50 % de IA, con seis fajas de 2,5 m de ancho (2,0 m de vegetación remanente), y el 70 % de IA con seis fajas de 3,5 m de ancho (1,0 m de vegetación remanente). El 0 % de IA correspondió a la parcela control, donde no se realizaron intervenciones. Cada parcela fue enriquecida con seis especies nativas (incluso la parcela sin intervención), asignando aleatoriamente una especie a cada faja. En cada faja se plantaron 30 plantines distanciados a 1,5 m, resultando en una densidad de 1.269 plantas por hectárea (30 plantines / faja x 6 fajas / parcela x 4 parcelas / sitio x 3 sitios = 2.160 plantines en total, 720 plantines por sitio, 360 plantines por especie). Las seis especies elegidas fueron: *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.Serm. & Bizzarri (ciprés de la cordillera), *Nothofagus alpina* (Poepp et Endl.) Oerst. (raulí), *Nothofagus antarctica* (G. Forst.) Oerst. (ñire), *Nothofagus dombeyi* (Mirb) Oerst. (coihue), *Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst. (roble pellín) y *Nothofagus pumilio* (Poepp et Endl.) Krasser (lenga). Los plantines se obtuvieron de tres fuentes geográficas provenientes de las provincias de Río Negro y Neuquén (apéndice 4). En cada faja se utilizaron 10 individuos de cada fuente para tener en cuenta las posibles diferencias entre los orígenes. Los plantines tenían 0,3 - 0,9 m de altura y de 3 a 4 años de edad al momento de la plantación a raíz desnuda. Estas dimensiones y edades se evaluaron como convenientes para una plantación de enriquecimiento sin cuidados posteriores a la instalación.

Posteriormente, registramos anualmente la supervivencia y el crecimiento de todos los individuos (altura y diámetro de cuello, Nacif *et al.* 2021) del experimento entre los años 2013 y 2021, para lograr curvas de crecimiento para las diferentes especies (Oddi *et al.* 2021). A cada uno de los individuos de las especies plantadas registramos la supervivencia y medimos el diámetro y la altura (desde el suelo hasta la parte más elevada de la planta, sin ser estirada). El crecimiento relativo fue estimado como la diferencia de altura relativa dentro de una temporada de crecimiento, donde el crecimiento en altura relativa = altura máxima del meristema apical en abril - altura máxima del meristema apical en octubre / altura máxima del meristema apical en octubre * 100, utilizado como proxy de la tasa de crecimiento de las plantas, el mismo procedimiento con el diámetro del cuello de las plantas (West 2014, Nacif *et al.* 2020). Para profundizar en las características de los sitios y del diseño experimental ver Goldenberg *et al.* 2020b, Nacif *et al.* 2021 y Fernández *et al.* 2022.

Análisis de datos. Analizamos los efectos del sitio, de la IA y de la especie (efectos fijos) en las tasas de crecimiento relativo en altura (distribución normal) y en la supervivencia (distribución quasi-binomial) de las plantas utilizando modelos lineales de efectos mixtos en R (R Core Team 2021). Para ello utilizamos la función lmer (paquete lme4, Bates *et al.* 2015). En los modelos incluimos los efectos aleatorios del origen de las plantas y de las par-

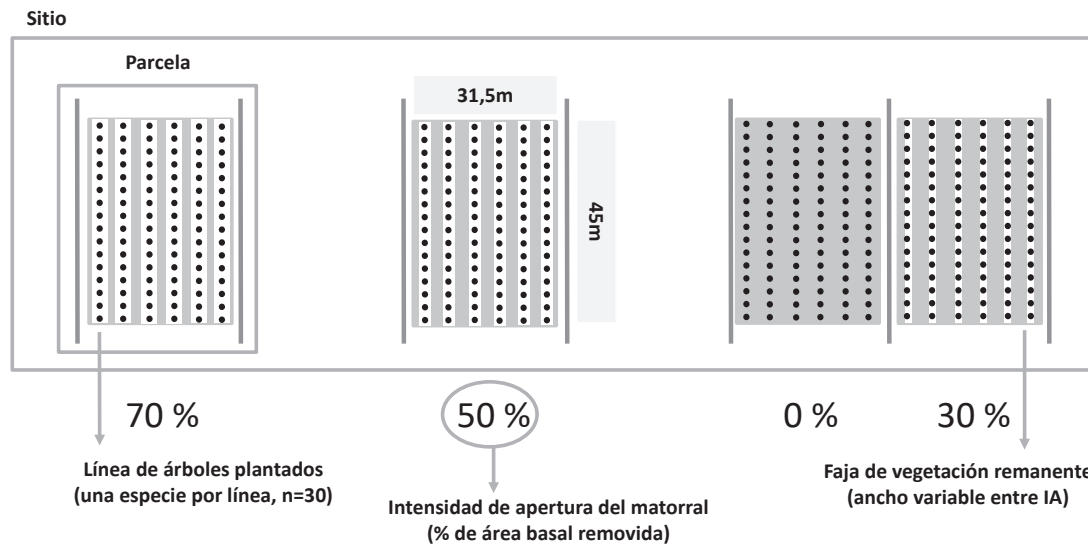


Figura 1. Esquema general del diseño experimental utilizado en cada uno de los sitios. Cada sitio con cuatro parcelas, y cada una con una IA (0, 30, 50 y 70 %).

General scheme of the experimental design applied in every site. Each site has four plots, each with its respective canopy opening intensity percentage (IA = 0, 30, 50 y 70 %).

celas. En el caso del crecimiento, modelamos la heterocedasticidad en función del tiempo (varConstPower), y la correlación temporal de los datos mediante una estructura auto-regresiva de medias móviles (ARMA). Usamos inferencia multimodelo para el marco estadístico inferencial y seleccionamos el modelo mínimo adecuado por el valor de AICc más bajo (forma corregida del Criterio de información de Akaike) utilizando la función dredge del paquete MuMin (Burnham *et al.* 2011). Además calculamos el valor de importancia relativa para cada predictor con la función importance en el paquete MuMin, que suma los “pesos de Akaike” sobre todos los modelos que lo incluyen. Habiendo explorado la correlación entre la altura y el diámetro de las plantas utilizando correlaciones de Spearman, solo incluimos los modelos de crecimiento en altura, dado que estas variables resultaron altamente correlacionadas (ver en el apéndice 5 los valores de correlación entre las variables de altura y diámetro de cuello de las plantas, para cada especie, IA y sitio).

RESULTADOS

Los modelos de efectos mixtos mostraron que para la supervivencia, el sitio, la IA y la especie resultaron ser variables de importancia, y que para el caso de crecimiento en altura también lo fue la edad de la plantación. Además, encontramos interacciones dobles e interacciones triples entre algunas de las variables (ver en apéndices 6 y 7, coeficientes del modelo e importancia relativa).

En promedio, en el sitio FV sobrevivió el 3 % de los plantines, en LN el 25 % y en LS el 50 %. En particular, en FV sobrevivieron al octavo año de experimento *N. pumilio*

(entre 10 % y 13 %) y *N. antarctica* (entre 3 % y 43 %). En LN, la menor supervivencia (< 10 %) fue registrada a 70 % de IA; en IA menores (0 %, 30 % y 50 %) las mayores tasas de supervivencia fueron registradas para *A. chilensis* (80 %, 83 % y 67 %) y *N. obliqua* (60 %, 57 % y 70 %), y el resto de las especies con valores sustancialmente menores (< 40 %). En LS, las mismas especies sobrevivieron con tasas más altas a lo largo del gradiente de IA (73 %, 90 %, 67 % y 40 % para *A. chilensis*, y 52 %, 85 %, 90 % y 37 % para *N. obliqua*) (figura 2, cuadro 1). En este sitio, el resto de las especies alcanzaron las mayores tasas de supervivencia en IA intermedias.

Por su parte, el crecimiento también varió entre sitios: en FV ~ 5 cm año⁻¹, en LN ~ 10 cm año⁻¹ y en LS ~ 27 cm año⁻¹. En la figura 3 se muestra el crecimiento en altura en función del año de plantación para las seis especies en los diferentes sitios. Para los sitios de menor calidad (FV y LN) y para las plantas de las especies que sobrevivieron al 8vo año, la IA del matorral tuvo menos influencia en el crecimiento de las plantas que en LS. En el caso de LS, IA intermedias resultaron mejores para el crecimiento de *N. obliqua* y *N. dombeyi*; *A. chilensis*, *N. pumilio*, *N. alpina* también fueron favorecidas en ausencia de apertura del matorral y en *N. antarctica*, las aperturas mejoraron el crecimiento. En LS la mayoría de las especies alcanzaron tasas de crecimiento superiores al 20 % (entre 18 % y 60 % para intensidades intermedias) (figura 3). En el cuadro 1 se incluyen los porcentajes de supervivencia, las alturas y diámetros promedio para las distintas especies en los tres sitios para el año 2021, así como los crecimientos medios y los máximos absolutos de las plantas sobrevivientes.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo observamos que en un sitio de alta productividad de un matorral mixto de Norpatagonia (*i.e.* LS), intensidades intermedias de apertura inicial maximizan la supervivencia y optimizan el crecimiento en altura de la plantación (comparativamente a un fondo de valle de al-

tura y una ladera norte). En los sitios estudiados, el éxito de la plantación parece verse afectado directamente por los factores ambientales que proporcionan las diferentes condiciones de sitio e intensidades de apertura de dosel del matorral pre-existente (Nacif *et al.* 2021, Oddi *et al.* 2021). El mayor éxito de la plantación en la ladera sur (sitio de alta productividad), seguramente está relacionado a su ma-

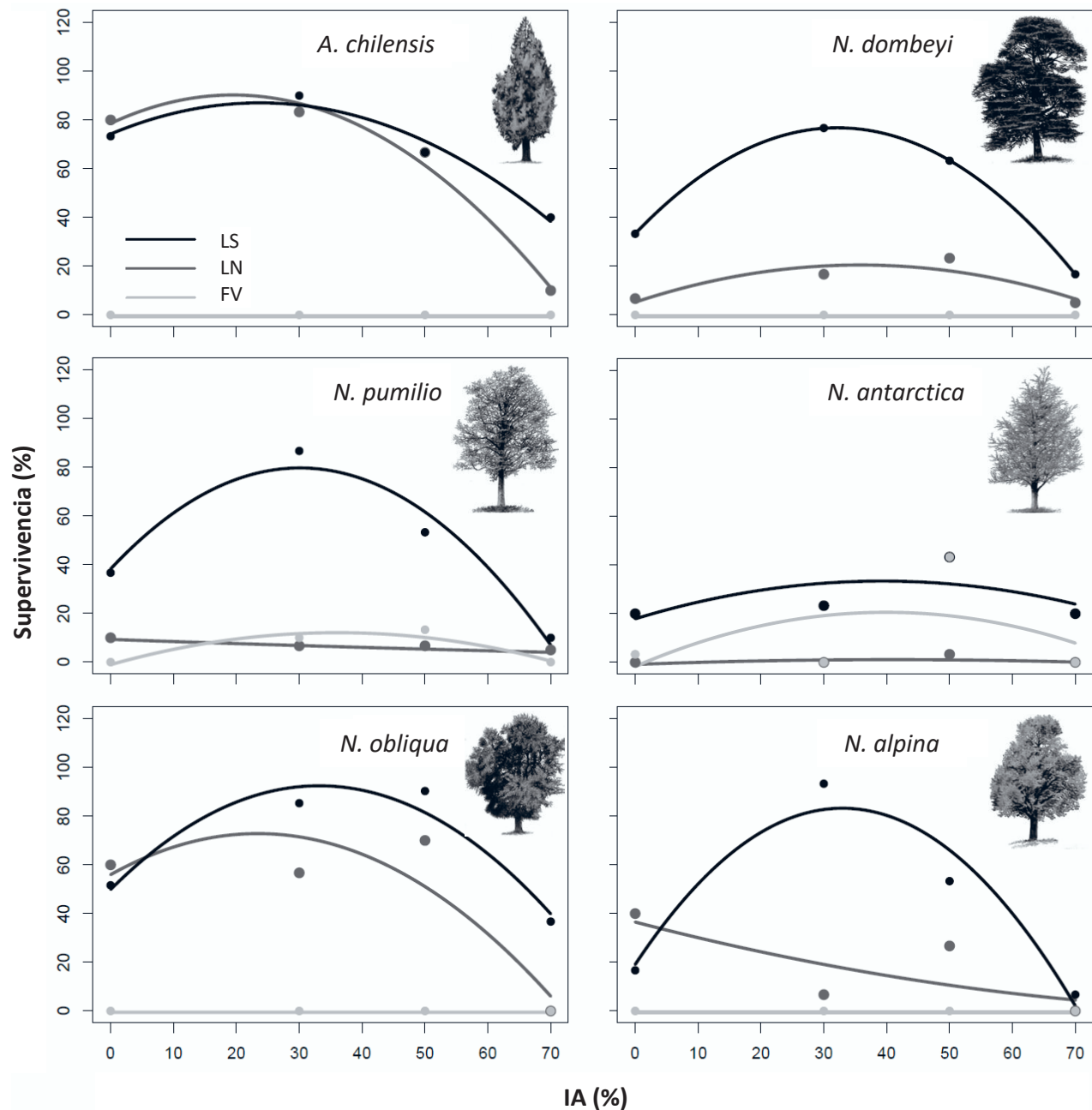


Figura 2. Respuesta de la supervivencia de las plantas al sitio y a la intensidad de apertura del matorral. Cada punto es la supervivencia al año 2021 para cada sitio e intensidad de apertura del matorral (FV= fondo de valle de altura, LN= ladera norte y LS= ladera sur). Las curvas representan los modelos seleccionados a través del AIC para cada especie.

Response of plant survival across sites and woodland opening intensities. Each point represents plant survival in 2021 for each site and canopy opening intensity (FV= valley bottom, LN= north slope y LS= south slope aspect).

Cuadro 1. Valores promedio de supervivencia, crecimiento, altura y diámetro para cada sitio (FV= fondo de valle de altura, LN= ladera norte y LS= ladera sur) y especie para el año 2021 promediando las intensidades de apertura (IA) de: supervivencia (%), tasa de crecimiento relativo promedio para la altura y el diámetro (%), altura (m, media ± ee y máxima) y diámetro (mm, media ± ee y máxima).

Average values of plant survival, growth, height and diameter for each site (FV= valley bottom, LN= north slope y LS= south slope) and species for 2021: plant survival (%), plant height and diameter growth (%), plant height (m, media ± se and maximum) and diameter (mm, media ± se and maximum). Values represent an average of overall canopy opening.

		FV		LN		LS	
Supervivencia (%)	<i>A. chilensis</i>	-	-	60	-	68	-
	<i>N. dombeyi</i>	-	-	12	-	48	-
	<i>N. pumilio</i>	6	-	7	-	47	-
	<i>N. antarctica</i>	12	-	1	-	27	-
	<i>N. alpina</i>	-	-	19	-	43	-
	<i>N. obliqua</i>	-	-	47	-	67	-
Crecimiento relativo (% h, % Ø)	<i>A. chilensis</i>	-	-	27	11	29	14
	<i>N. dombeyi</i>	-	-	26	15	52	21
	<i>N. pumilio</i>	33	7	30	10	40	18
	<i>N. antarctica</i>	29	10	-	-	43	13
	<i>N. alpina</i>	-	-	24	12	42	26
	<i>N. obliqua</i>	-	-	27	15	44	28
h (m) media ± ee, máximo	<i>A. chilensis</i>	-	-	1,0±0,3	1,7	1,3±0,5	2,1
	<i>N. dombeyi</i>	-	-	1,5±0,6	2,5	2,6±1,2	5,5
	<i>N. pumilio</i>	0,6±0,6	2,0	0,8±0,5	1,8	2,3±1,0	4,8
	<i>N. antarctica</i>	0,5±0,1	0,7	-	-	1,3±0,7	3,1
	<i>N. alpina</i>	-	-	1,3±0,6	3,1	4,1±1,5	7,3
	<i>N. obliqua</i>	-	-	1,8±0,7	4,1	4,2±1,7	7,8
Ø (mm) media ± ee máximo	<i>A. chilensis</i>	-	-	15,8±3,9	25,0	18,8±5,8	40,0
	<i>N. dombeyi</i>	-	-	19,3±4,5	26,0	32,7±14,4	72,0
	<i>N. pumilio</i>	8,7±1,2	11,0	14,4±4,5	21,0	26,8±13,1	67,0
	<i>N. antarctica</i>	13,5±3,2	18,0	-	-	19,1±11,6	57,0
	<i>N. alpina</i>	-	-	14,5±3,7	23,0	40,1±17,2	79,0
	<i>N. obliqua</i>	-	-	20,2±6,3	37,0	40,2±19,8	97,0

yor humedad, menor irradiación y mayor profundidad del suelo (Goldenberg *et al.* 2020b). Posteriormente a las intervenciones, es probable que los aumentos de temperatura y luz debido a las aperturas del matorral impulsaron tasas más altas de supervivencia (Nacif *et al.* 2021). Estos resultados concuerdan con estudios previos que concluyen que los *Nothofagus* son especies intolerantes a la sombra, cuya regeneración está asociada con disturbios y claros en los bosques (Donoso Zegers 2013). No obstante, la apertura mayor (70 %) intensificó el efecto de factores perjudiciales, *i.e.* heladas, estrés hídrico, viento (Nacif *et al.* 2021).

Las plantaciones en los otros sitios menos húmedos que en la ladera sur mostraron menor éxito. Por un lado, en el fondo de valle de altura la acumulación de masas de

aire frío, alta irradiación y poca profundidad de suelo en conjunto con el efecto desecante del viento estival y vegetación de baja altura (Goldenberg *et al.* 2021), seguramente causaron la alta mortalidad de los individuos plantados, donde a la fecha sólo sobrevivieron (marginamente) especies tolerantes a este tipo de ambientes, *i.e.* *N. antarctica* y *N. pumilio* (Soliani *et al.* 2021). Por otro lado, en la ladera norte, el sitio de condición intermedia, se obtuvo una mejor respuesta en relación al fondo de valle de altura, cuando las aperturas no superaron el 50 %. En esta ladera, donde las temperaturas estivales son mayores que en los otros sitios, hubo mayor supervivencia de *A. chilensis*, especie dominante en estas condiciones (Oddi *et al.* 2021), seguido por *N. obliqua*, capaz de establecerse en sitios más cálidos

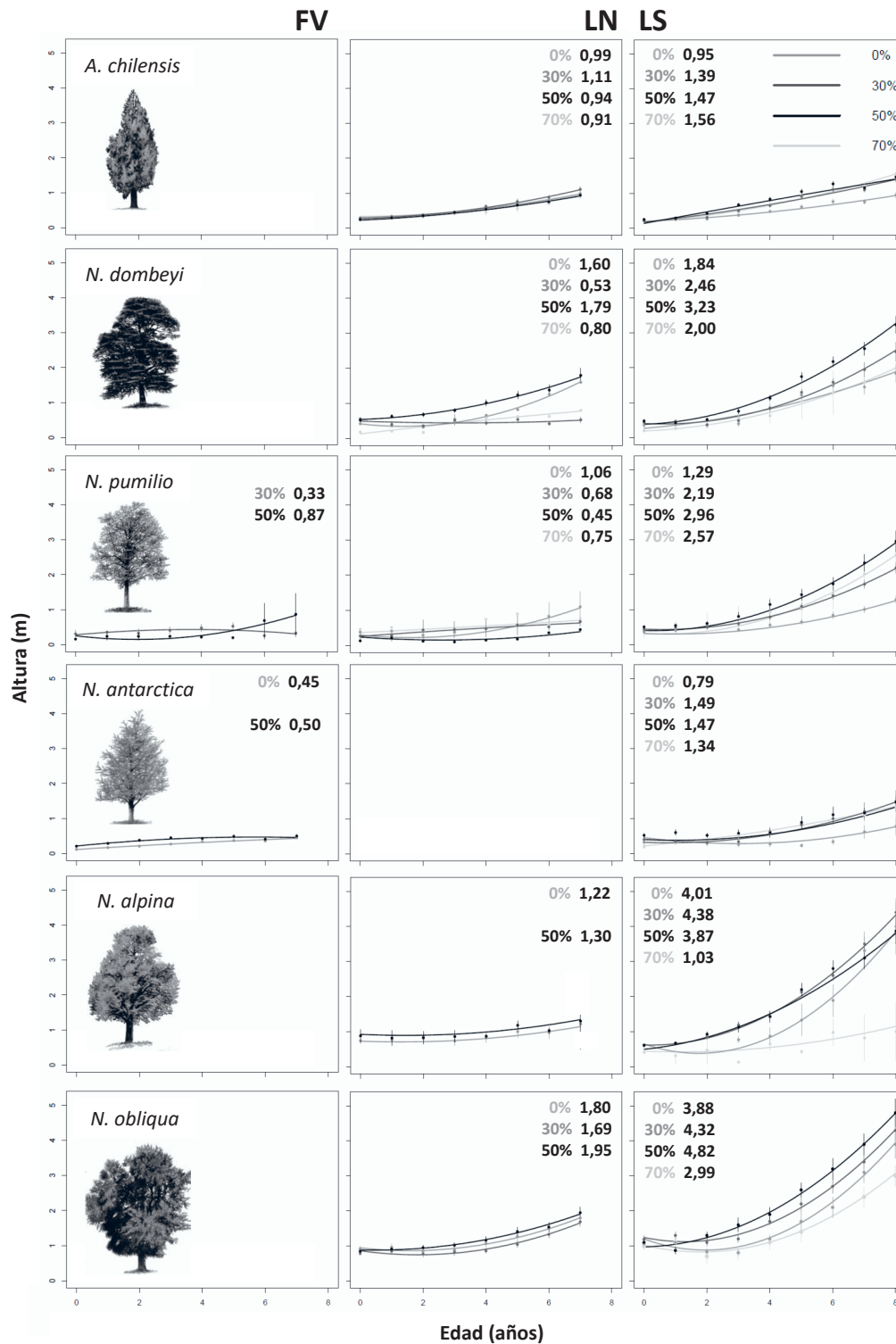


Figura 3. Altura de las plantas en función de la edad de plantación, para los tres sitios (de izquierda a derecha: FV = fondo de valle de altura, LN = ladera norte y LS = ladera sur) y para cada IA (0 %, 30 %, 50 % y 70 %). Cada punto es el valor promedio de altura (\pm EE de los datos) para cada año (entre 2014 y 2021, FV y LN; entre 2013 y 2021, LS), en cada sitio e IA. Valores en negrita corresponden a los promedios para cada IA, los porcentajes en negrita indican el mayor valor alcanzado de altura entre las IA. Las curvas representan los modelos seleccionados a través del AIC para cada especie.

Plant height as a function of plantation age, for the three sites (from left to right: FV = valley bottom, LN = north slope y LS = south slope) and for each OI (woodland opening intensity = 0 %, 30 %, 50 % y 70 %). Each point represents the plant height average (data \pm SE) for each year (between 2014 and 2021, FV and LN; between 2013 and 2021, LS), in every site and OI. Numbers in bold represent the average plant height for each OI, and the highest value among OI (%).

y con menos precipitaciones en los bosques sub-antárticos (Donoso Zegers 2013). Particularmente, las plantaciones de *N. antarctica* mostraron una alta mortalidad en general; si bien es una de las especies que espontáneamente domina en los matorrales intervenidos no se observó regeneración natural ya que es una especie con importante reproducción vegetativa, siendo esto común en varios sitios dominados por esta especie (Donoso Zegers 2013). Se suman aspectos tales como la baja humedad de los suelos en la temporada estival principalmente en la ladera norte y en el fondo de valle de altura (Fernández *et al.* 2022) y el ataque de herbívoros sobre *N. antarctica* (Nacif *et al.* 2021). Después de 8 años, en el fondo de valle de altura y en la ladera norte, ninguna plantación llegó a superar los 2 m de altura promedio. Estas tasas de crecimiento en conjunto con los bajos niveles de supervivencia, implicarían que en sitios con las características mencionadas difícilmente se logren objetivos productivos a través del enriquecimiento con las especies ensayadas. Un estudio de corto plazo realizado también en la Patagonia Norte Argentina, comparó el éxito de la plantación de *A. chilensis* y *N. dombeyi* entre un sitio xérico y uno más húmedo, con y sin cobertura del dosel y de la vegetación circundante (Caselli *et al.* 2021). En coincidencia con este trabajo previo, encontramos resultados similares en los patrones de supervivencia y crecimiento al comparar las condiciones contrastantes de los sitios estudiados (*i.e.* en el sitio más árido menor éxito de la plantación), y por otro lado, el beneficio de la cobertura en las etapas iniciales, clave para la supervivencia de las dos especies mencionadas.

Asimismo, las aperturas del matorral en la ladera sur (LS), en general, fueron beneficiosas para el crecimiento (con tasas anuales de 10 a 20 %). Antecedentes en experimentos de regeneración y plantación de *Nothofagus* mencionan un mayor éxito con una cobertura vegetal baja (Donoso Zegers 2013, Pafundi *et al.* 2014, Soto *et al.* 2015). A su vez, *N. antarctica* se comportó como una especie resistente a condiciones ambientales diversas (Donoso Zegers 2013), mientras que *N. alpina* y *N. obliqua* mostraron mayor tolerancia a la sombra, donde el efecto negativo de la baja disponibilidad de luz en los primeros años podría haber sido luego compensado al alcanzar estratos superiores del dosel y verse favorecido frente a la competencia con las plantas leñosas del matorral (Donoso y Promis 2015). Similarmente, *A. chilensis* mostró alta tolerancia a la sombra en coincidencia con su necesidad de protección temprana. Esto concuerda con resultados similares en base a estudios previos con respecto al crecimiento en *N. pumilio*, *N. obliqua* y *A. chilensis* (Donoso Zegers 2013, Urretavizcaya *et al.* 2015, Torres *et al.* 2018, Caselli *et al.* 2021). Las diferencias de crecimiento entre los niveles de apertura para las distintas especies no se mantuvieron constantes durante los años de muestreo a lo largo del tiempo; es decir, hubo interacciones, probablemente años más cálidos y secos las plantas requirieron de mayor protección. Este escenario remarca la importancia de medir múltiples esta-

ciones de crecimiento post-plantación para capturar mejor las diferencias entre especies y tratamientos a largo plazo; y adicionalmente continuar con el análisis del efecto que puedan tener variaciones climáticas interanuales (precipitaciones, temperatura) e interacciones (*i.e.* tasas de herbivoría) sobre los patrones de crecimiento y supervivencia.

La información generada en Argentina en términos de plantación con fines productivos de las especies patagónicas es aún incipiente, más aun utilizando el matorral como ecosistema nodriza (Löf *et al.* 2014). Contrariamente, en Chile existe una mayor trayectoria en la implantación con fines madereros de especies nativas (Donoso Zegers 2013). En trabajos previos con *N. obliqua*, *N. dombeyi* y *N. alpina* en la región centro-sur, han reportado mayores tasas de crecimiento, probablemente debido a mejores condiciones ambientales para el crecimiento de estas especies en dicha región (*i.e.* mayor temperatura, menor altura y mayor humedad, Donoso y Soto 2010, Donoso Zegers 2013, Ojeda *et al.* 2020, Gutierrez y Navarrete 2021, Donoso *et al.* 2022). Por ejemplo, en la Cordillera de la Costa, luego de 11 años, los árboles de *N. dombeyi* y *N. alpina* alcanzaron entre 12 y 15 m de altura en una ladera sur (Donoso *et al.* 2015) y una plantación de *N. dombeyi* de 9 años en el bosque experimental Llancahue alcanzó en promedio los 4,6 m de altura (Betancurt 2015). Más allá de la heterogeneidad de los resultados asociada a aspectos como la procedencia de las plantas y el lugar de la implantación, el desafío es lograr tener mayor información en términos locales, independientemente del objetivo de la plantación (producción de madera, restauración, enriquecimiento), ampliando el campo de estudio en aspectos como los raleos y podas de la plantación, el rendimiento económico y los plazos de producción.

Las plantaciones forestales en matorrales mixtos de norpatagonia pueden ser exitosas mediante la elección de la especie para cada sitio, siendo necesario considerar la preparación del sitio en términos de niveles de apertura inicial. En un sitio de alta productividad (*i.e.* ladera sur) es posible minimizar los costos de plantación extrayendo parte de la biomasa aérea, y con ello proporcionando beneficios económicos iniciales a los propietarios a través de la venta de leña y postes (Goldenberg *et al.* 2020a), y beneficios económicos a largo plazo si se mantienen las tendencias observadas en *A. chilensis*, *N. obliqua*, *N. alpina* y *N. dombeyi*. A partir de nuestros resultados, para poder recomendar el sistema como una alternativa viable (plantación en una matriz de matorral), encontramos de relevancia ampliar las mediciones algunas temporadas adicionales para ajustar mejor las curvas de crecimiento y simultáneamente estimar el potencial productivo en términos volumétricos y económicos. Información de relevancia que también podría ser incluida en futuros trabajos consiste en la interacción de los patrones de crecimiento asociados a los cambios en el clima o a las tasas de herbivoría por ejemplo. Finalmente, las aperturas parciales en el matorral han mostrado además, ofrecer beneficios eco-

lógicos y en la provisión de servicios ecosistémicos, por ejemplo al mantener o aumentar la diversidad de plantas, polinizadores y herbívoros así como ofrecer protección del suelo y contra incendios (Coulin *et al.* 2019, Carrón *et al.* 2020, Goldenberg *et al.* 2020a, Chillo *et al.* 2020, Nacif *et al.* 2021). Este trabajo proporciona entonces valiosa información para orientar el manejo sostenible de los matorrales mixtos de Patagonia norte.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo pudo llevarse a cargo con el financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (subsidijs PICT 2011-0335, PICT 2013-1079 y PICT 2016-0305).

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

LG y MP desarrollaron la idea; MN redactó el primer borrador; MG, FO, MP, AA, LG y MN interpretaron los resultados, revisaron y redactaron el manuscrito; MN realizó trabajo de campo y mediciones; todos los autores aprobaron la versión final de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Altamirano A, A Miranda, P Aplin, J Carrasco, G Catalán, L Cayuela, T Fuentes-Castillo, A Hernández, M Martínez-Harms, F Peluso, M Prado, R Reyes-Riveros, T Van Holt, C Vergara, C Zamorano-Elgueta, C Di Bella. 2020. Natural forests loss and tree plantations: Large-scale tree cover loss differentiation in a threatened biodiversity hotspot. *Environmental Research Letters* 15. DOI: <http://doi.org/10.1088/1748-9326/abca64>
- Álvarez-Garretón C, A Lara, J Boisier, M Galleguillos. 2019. The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests* 10. DOI: <http://doi.org/10.3390/f10060473>
- Bates D, M Mächler, B Bolker, S Walker. 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67. DOI: <http://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Betanourt Fuentes G. 2015. Evaluación del desempeño de una plantación joven de coihue establecida a campo abierto en el predio Llancahue, comuna de Valdivia. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad Nacional de Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/fifb562e/doc/fifb562e.pdf>
- Burnham K, D Anderson, K Huyvaert. 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: Some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65: 23–35. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1029-6>
- Carrón AI, LA Garibaldi, S Marquez, S Fontenla. 2020. The soil fungal community of native woodland in Andean Patagonian forest: A case study considering experimental forest management and seasonal effects. *Forest Ecology and Management* 461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117955>
- Caselli M, M Urretavizcaya, G Loguercio, L Contardi, S Gianolini, G Defossé. 2021. Effects of canopy cover and neighboring vegetation on the early development of planted *Aus-*
- trocedrus chilensis* and *Nothofagus dombeyi* in north Patagonian degraded forests. *Forest Ecology and Management* 479. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118543>
- Chillo V, M Goldenberg, LA Garibaldi. 2020. Diversity, functionality, and resilience under increasing harvesting intensities in woodlands of northern Patagonia. *Forest Ecology and Management* 474: 118349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118349>
- Coulin C, M Aizen, LA Garibaldi. 2019. Contrasting responses of plants and pollinators to woodland disturbance. *Austral Ecology*. DOI: <https://doi.org/10.1111/aec.12771>
- Donoso P, D Soto. 2010. Plantaciones con especies nativas en el centro-sur de Chile: experiencias, desafíos y oportunidades. *Bosque Nativo* 47: 10-17. http://revista.bosquenativo.cl/volumenes/47/2_donoso.htm
- Donoso P, A Promis. 2015. Silvicultura en los bosques nativos: avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo. 109-151. DOI: <https://doi.org/10.34720/g641-sh17>
- Donoso P, C Navarro, D Soto, V Gerding, O, Thiers J Pinares, B Escobar, MJ Sanhueza. 2015. Manual de plantaciones de raulí (*Nothofagus alpina*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*) en Chile. Temuco, Chile. Universidad Austral de Chile - Universidad Católica de Temuco. 203 p.
- Donoso P, A Promis, G Loguercio, H Attis Beltrán, M Caselli, L Chauchard, G Cruz, M González, M Peñalba, G Martínez Pastur, C Navarro, P Núñez, C Salas-Eljatib, D Soto, A Vásquez-Grandón. 2022. Silviculture of South American temperate native forests, *New Zealand Journal of Forestry Science* DOI: <https://doi.org/10.33494/nzjfs522022x173x>
- Donoso Zegers C. 2013. Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo. 688 p.
- Fernández MM, C Casas, LA Garibaldi. 2022. Mite density, not diversity, declines with biomass removal in Patagonian woodlands. *Applied Soil Ecology* 169: 104242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104242>
- Goldenberg M, FJ Oddi, M Amoroso, LA Garibaldi. 2020a. Effects of harvesting intensity and site conditions on biomass production of northern Patagonia shrublands. *European Journal of Forest Research* DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01292-6>
- Goldenberg M, FJ Oddi, J Gowda, LA Garibaldi. 2020b. Effects of firewood harvesting intensity on biodiversity and ecosystem services in shrublands of northern Patagonia. *Forest Ecosystems* 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00255-y>
- Gönc R, R Casaux, D Sulkin-Dolhatz. 2015. Effects of disturbances generated by different management strategies on the vegetation strata of *Nothofagus antarctica* forests of Chubut, Argentina. *Ecología Austral* 25: 231-241. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2015000300008&lng=es&nrm=iso. ISSN 1667-782X.
- Gyenge J, ME Fernández, M Sarasola, M de Urquiza, T Schlichter. 2009. Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y volumen de fuste de algunas especies leñosas nativas en el valle del río Foyel, NO de la Patagonia Argentina. *Bosque* 30(2): 95-101. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000200005>
- Gutierrez B, M Navarrete. 2021. Crecimiento y Supervivencia de un Ensayo de Procedencias y Progenies de Roble (*Notho-*

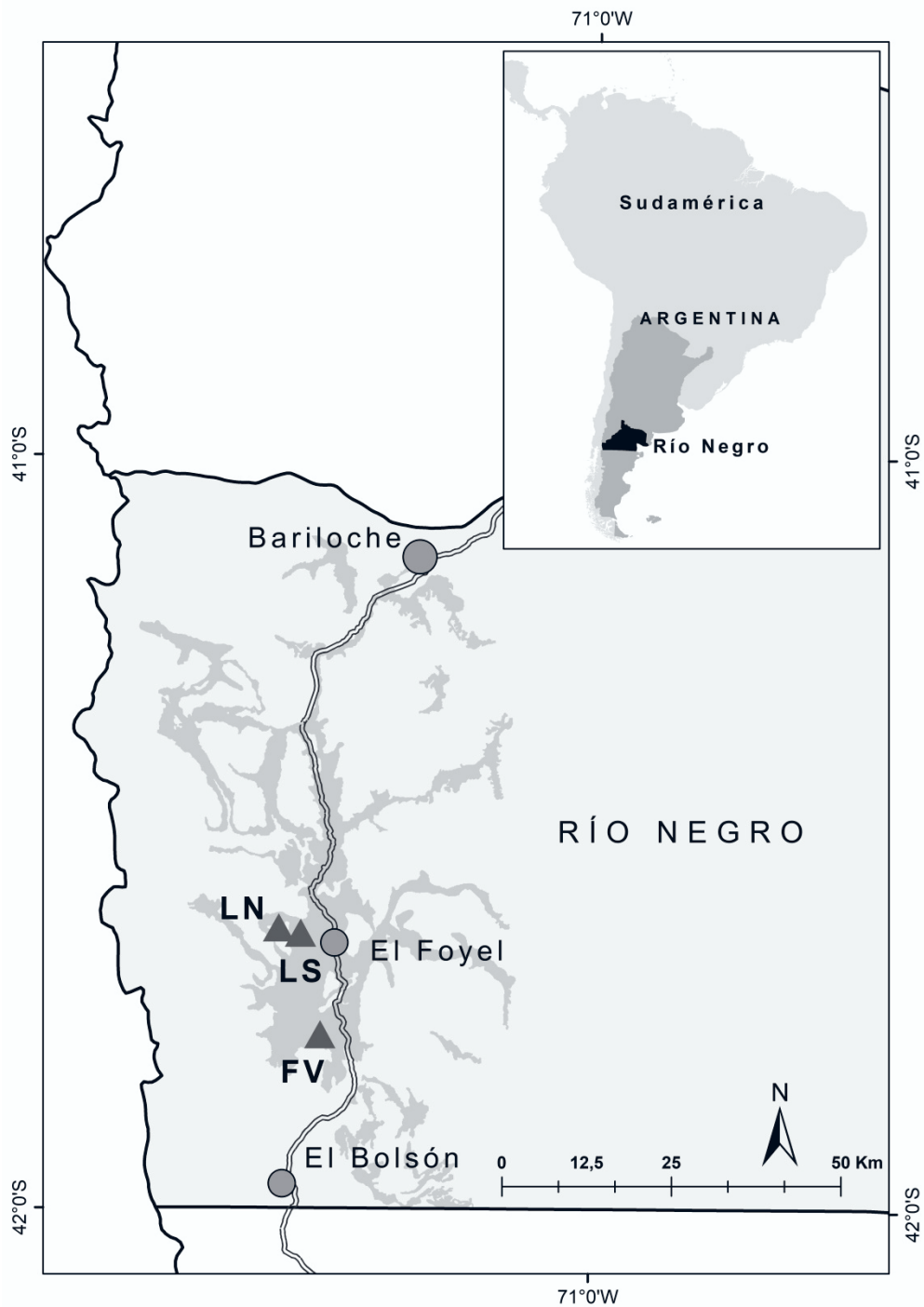
- fagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) de 21 Años de Edad en Pumi-llahue, Región de los Ríos, Chile. *Ciencia & Investigación Forestal* 27(2): 23-36. DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.547>
- Löf M, A Bolte, D Jacobs, A Jensen. 2014. Nurse trees as a forest restoration tool for mixed plantations: effects on competing vegetation and performance in target tree species. *Restoration Ecology* 22(6): 758-765. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12136>
- Löf M, P Madsen, M Metslaid, J Witzell, D. Jacobs. 2019. Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests* 50: 139-151. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>
- Morales JM, M Mermoz, JH Gowda, T Kitzberger. 2015. A stochastic fire spread model for north Patagonia based on fire occurrence maps. *Ecological Modelling* 300: 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.01.004>
- Nacif ME, T Kitzberger, LA Garibaldi. 2020. Positive outcomes between herbivore diversity and tree survival: Responses to management intensity in a Patagonian forest. *Forest Ecology and Management* 458: 117738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117738>
- Nacif ME, C Quintero, LA Garibaldi. 2021. Intermediate harvesting intensities enhance native tree performance of contrasting species while conserving herbivore diversity in a Patagonian woodland. *Forest Ecology and Management* 483: 118719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118719>
- Ojeda-González P, P Donoso, A Erlwein. 2020. Synergy in mixed *Nothofagus* spp. plantations: the effect of deciduous/evergreen neighbourhood on tree growth in the Chilean Andes. *New Zealand Journal of Forestry Science* 50: 11. DOI: <https://doi.org/10.33494/nzjfs502020x102x>
- Oddi F, M Goldenberg, M Nacif, K Heinemann, LA Garibaldi. 2021. Supervivencia y crecimiento de plantines de ciprés de la cordillera durante siete años en dos sitios contrastantes de Patagonia norte. *Ecología Austral* 31: 204-215. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1239>
- Pafundi L, M Urretavizcaya, G Defossé. 2014. Improving survival and growth of planted *Austrocedrus chilensis* seedlings in disturbed Patagonian forests of Argentina by managing understory vegetation. *Environmental Management* 54: 1412-1420. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0363-2>
- Payn T, J Carnus, P Freer-Smith, M Kimberley, W Kollert, S Liu, C Orazio, L Rodriguez, L Silva, M Wingfield. 2015. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management* 352: 57-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>
- Pretzsch H, D Forrester, J Bausch. 2017. Mixed-Species Forests. Berlin, Alemania. Springer. 653 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>
- R Foundation for Statistical Computing. R Core Team. 2021. <https://www.r-project.org>.
- Raffaele E, M De Torres Curth, C Morales, T Kitzberger. 2014. Ecología e historia natural de la Patagonia Andina. Un cuarto de siglo de investigación en biogeografía, ecología y conservación. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-3781-01-8. 256 p.
- Reque J. 2007. Caracterización silvícola de ñirantales del norte de la Patagonia para la gestión forestal sostenible. *Bosque* 28: 33-45. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002007000100006>
- Soliani C, MaG Mattera, P Marchelli, M Azpilicueta, G Dalla-Salda. 2021. Different drought-adaptive capacity of a native Patagonian tree species (*Nothofagus pumilio*) resulting from local adaptation. *European Journal of Forest Research* 140: 1147-1161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01389-6>
- Soto D, P Donoso, K Puettmann. 2015. Light availability and soil compaction influence the growth of underplanted *Nothofagus* following partial shelterwood harvest. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 998-1005. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0353>
- Tiribelli F, T Kitzberger, J Manuel. 2018. Changes in vegetation structure and fuel characteristics along post-fire succession promote alternative stable states and positive fire-vegetation feedbacks. *Journal of Vegetation Science* 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1111/jvs.12620>
- Torres CD, A Magnin, JG Puntieri. 2018. Morpho-physiological responses of *Nothofagus obliqua* to light intensity and water status, with focus on primary growth dynamics. *Trees - Structure and Function* 32: 1301-1314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1712-1>
- Urretavizcaya MF, M Pastorino, V Mondino, L Contardi. 2015. La Plantación con Árboles Nativos. In Attis Beltran H, C Barroetaveña, JE Bava, NA Bonino, L Bulgarelli, GO Caballe, F Calvi, SR Castañeda, LM Chauchards, F Chavat, LL Claps, L Contardi, C Danklmaiert, MM Davel, EA de Errasti, GE Defossé, J Del Vas, A Dezzotti, JP Diez, Y Dillon, MA Fernandez, A Felicetti, MCM Frugoni, S Focarazzo, V Fontana, MM Godoy, HE Gonda, AG Greslebin, DA Guglielmin, JE Gyenge, MV Lantschner, FJ Letourneau, GA Loguercio, A Martinez, FH Mattes, U Mele, GE Melzner, VA Mondino, AM Mortoro, C Novak, CI Nuñez, MA Nuñez, I Orellana, PM Pantaenius, MJ Pastorino, M Rajchenberg, V Rusch, G Salvador, MM Sarasola, RE Sbrancia, GA Stecher, OA Troncoso, MF Urretavizcaya, SA Varela, A Velásquez, JM Villacide, MN Weigandt, G Zalazar eds. Manual de Buenas Prácticas para el manejo de plantaciones forestales en el noroeste de la Patagonia. Buenos Aires, Argentina. Ministerio de Agroindustria. p. 335-368.
- Veblen TT, DC Lorenz. 1987. Post-fire stand development of *Austrocedrus-Nothofagus* forests in northern Patagonia. *Vegetation* 71: 113-126. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00044825>

Recibido: 21.07.22

Aceptado: 30.01.23

Apéndices

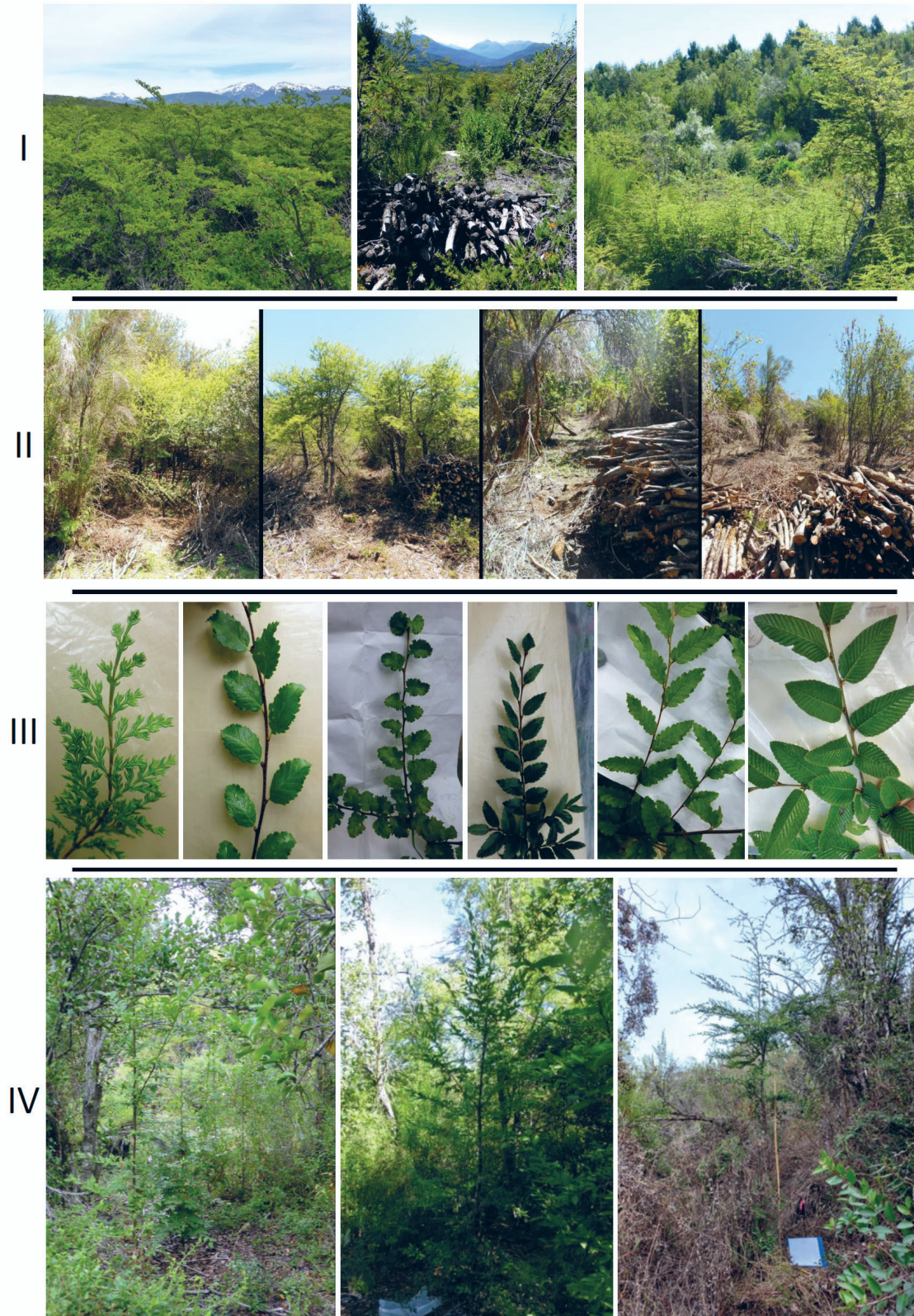
Apéndice 1. Los triángulos indican los tres sitios experimentales al oeste de la provincia de Río Negro (Argentina), LS: Ladera sur, LN: Ladera norte y FV: Fondo de valle de altura. Además, la distribución de los matorrales en gris oscuro.



Apéndice 2: Caracterización de los sitios. *IMA: Incremento medio anual. *G: Área basal. *T min: temperatura mínima (promedio anual). *T max: temperatura máxima (promedio anual). *Precip: precipitación media anual. *Temp suelo: Temperatura promedio del suelo (Marzo 2017). *VWC: contenido volumétrico de agua promedio (Marzo 2017). * Radiación solar: Promedio anual de radiación solar.

Sitio	Ladera Sur – Productividad alta	Ladera norte – Productividad intermedia	Fondo de valle – Baja productividad
Latitud / longitud	41° 38' 49.7" S / 71° 30' 4.9" W	41° 38' 54.6" S / 71° 30' 31.4" W	41°46'32" S / 71°28'18" W
Orientación y altitud (m s.n.m)	sur (790)	norte (800)	fondo de valle de altura (870)
Especies vegetales dominantes	<i>N. antarctica</i> , <i>Embothrium coccineum</i> , <i>Diostea juncea</i> , <i>Schinus patagonicus</i> , <i>Lomatia hirsuta</i> <i>Maytenus boaria</i>	<i>N. antarctica</i> , <i>L. hirsuta</i> , <i>D. juncea</i> , <i>S. patagonicus</i> , <i>Discaria chacaye</i> , <i>Fabiana imbricata</i> , <i>E. coccineum</i> , <i>M. boaria</i>	<i>N. antarctica</i> , <i>Chusquea culeou</i> , <i>Ribes cucullatum</i>
Edad del rodal (años)	~ 50	~ 50	~ 30
Altura dominante (m)	6,1 ± 1,2	3,4 ± 0,8	2,5 ± 0,1
Profundidad del suelo (cm)	125	55	90
Tipo de suelo	Hapludands	Hapludands	Udivitrands
Carbono (%)	8	5,7	6,3
Nitrógeno (%)	0,5	0,3	0,4
pH	5,93	5,30	5,23
IMA (m ³ ha ⁻¹ year ⁻¹)	3,6 ± 0,3	1,8 ± 0,3	0,4 ± 0,3
Área basal (m ² ha ⁻¹)	46,7	34,8	23,5
T min (°C)	3	2	1,5
T máx (°C)	15	14	15
Precip (mm)	1.100	1.100	1.100
Radiación solar (W m ₂)	155	165	170
Temp suelo (°C)	9,8	11,9	5,8
VWC (%)	75	54	89
Velocidad del viento (promedio anual, km h ⁻¹)	1,1	7,2	6,2

Apéndice 3. I. Sitios de estudio, izq. a der. FV (fondo de valle), LN (ladera norte) y LS (ladera sur). **II.** Vista del frente de una faja en cada IA (intensidad de apertura) en LS, izq. a der. 0, 30, 50 y 70 % de área basal removida. **III.** Especies plantadas en los tres sitios: izq. a der. ciprés de la cordillera (*A. chilensis*), lenga (*N. pumilio*), ñire (*N. antarctica*), coihue (*N. dombeyi*), roble pellín (*N. obliqua*), raulí (*N. alpina*). **IV.** Plantación en LS, izq. a der. *N. alpina* en IA de 50 % (2016), *N. obliqua* en IA 30 % (2018) y *N. dombeyi* en IA de 30 % (2021).



Apéndice 4. Cuadro con información de los plantines utilizados en el experimento.

Lugar de plantación	Fecha de plantación	Vivero	Especie	Cantidad	Origen de las semillas	Fecha de siembra y lugar	Sustrato	Repiques y cambio de lugar	Envases y capacidad	Tipo y frecuencia de riego	Forma de entrega
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Mallín Ahogado	<i>A. chilensis</i>	300	Zona Mallín Ahogado	Sept.2010, Invernadero	100 % compost: hecho con ramas, hojas, lupinos, avena sembrada, etc.	Mayo 2011, Intemperte	Botellas recicladas y macetas de 1 a 1/2 L.	Micro aspersión: 1 vez X semana	maceta
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Forestal Cerro Pirque	<i>A. chilensis</i>	860	INTA Golondrinas (Loma del Medio)	Sept.2010, Invernadero	100 % tierra negra	Diciembre 2010: 1° Repique a bandejas y 2° repique a maceta en Sept. 2011	Macetas de 1 L.	Fertirriego hasta Sept. 2011 y luego con manguera 1vez X semana.	maceta
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Centro Forestal Isla Victoria (TE. 0294 4323627)	<i>A. chilensis</i>	85	Cosecha Isla Victoria(camino Puerto Radal) Marzo-abril 2010 invernadero 2010	previa estratificación siembra junio 2010 invernadero	50 % tierra negra-50 % compost	1 año de crecimiento en interior. posterior repique y rufificación a exterior	envase polietileno negro, capacidad 2 L.	Riego por aspersión todos los días (verano)	maceta
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Mallín Ahogado	<i>N. antarctica</i>	40							
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. antarctica</i>	40	Trompúl (entre San Martín y Hua Hum)	Oct.- Nov.2010, Invernadero (en surcos)	Invernáculo=Tierra, arena, compost y arena volcánica. En campo= tierra común	Surco y almaciguera en invernáculo= 1 año + 2 años a campo	-	En invernadero x aspersión y riego común en campo, raíz desnuda 2 veces por semana aprox.	maceta
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Ecoplant	<i>N. antarctica</i>	85	Cordón del Chapelco-San Martín de los Andes	May. 2011, Invernadero	tierra de bosque y perlita	Mayo 2012, Intemperte	Cartucho	Micro aspersión: 1er año y aspersión el 2do.	maceta
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Mallín Ahogado	<i>N. dombeyi</i>	85							
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Ecoplant	<i>N. dombeyi</i>	85	Cordón del Chapelco-San Martín de los Andes	May. 2011, Invernadero	tierra de bosque y perlita	Mayo 2012, Intemperte	Cartucho	Micro aspersión: 1er año y aspersión el 2do.	maceta
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Centro Forestal Isla Victoria (TE. 0294 4323627)	<i>N. dombeyi</i>	40	Cosecha chico-Nirihau. Marzo 2011	previa estratificación siembra mayo-junio 2011 invernadero	50 % tierra negra-50 % compost	1 año de crecimiento en interior, posterior repique y rufificación a exterior	-	riego por aspersión todos los días (verano)	raíz desnuda

Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. obliqua</i>	40	Pilo Lil	Primavera 2010-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)+2 años de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. obliqua</i>	40	Yuco Alto	Primavera 2011-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)+1 año de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. obliqua</i>	40	Quila Quina	Primavera 2009-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)+3 años de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. alpina</i>	100	Tromen=R27	Primavera 2012-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	2 plug (=1 temporada invernáculo)+1 año de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. alpina</i>	90	Yuco Alto	Primavera 2013-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	3 plug (=1 temporada invernáculo)+1 año de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. alpina</i>	90	Curruhué=R20	Primavera 2011-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)+1 año de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. puntillo</i>	40	Cerro Otto	Primavera 2012-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego	raíz desnuda
Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. puntillo</i>	40	Neuquén norte	Oct.-Nov.2010, Invernadero (en surcos)	Invernáculo=Tierra, arena, compost y arena volcánica. En campo= tierra común	Surco y almaciguera en invernáculo= 1 año + 2 años a campo	-	En invernadero x aspersión y riego común en campo, raíz desnuda 2 veces por semana aprox.	

Ladera Sur	Mayo/Junio de 2013	Estación INTA	<i>N. pumilio</i>	40	Challuaco	Primavera 2012-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego	raiz desnuda
Ladera Sur	Septiembre de 2013	Estación INTA	<i>N. obliqua</i>	720	Yuco Alto	Primavera 2011-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)+1 año de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raiz desnuda
Ladera Sur	Septiembre de 2013	Estación INTA	<i>N. obliqua</i>	360	Quila Quina	Primavera 2009-Invernáculo	Invernáculo=mezcla de turba y arena. Cantero de cría a la intemperie= sobre tierra.	1 plug (=1 temporada invernáculo)+3 años de cantero de cría	Bandejas Hiko de tubete de 265 cm ³ .	Fertirriego en plug y en cantero de cría riego común suficiente	raiz desnuda
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. dombeyi</i>	115	La Angostura	Primavera 2010-Invernáculo	Tierra del vivero + arena volcánica + 10% compost compuesto de hojarasca y residuos orgánicos del vivero	1 o 2 temporadas en invernáculo y entre ½ y 2 años fuera de invernáculo	En invernáculo envase de 0,6 L y fuera de invernáculo 2,5 L.	frecuencia varió según el tamaño de maceta y las condiciones climáticas de temperatura y humedad.	Maceta de 2,5 L
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. antarctica</i>	155	La Angostura	Primavera 2012-Invernáculo	Tierra del vivero + arena volcánica + 10% compost compuesto de hojarasca y residuos orgánicos del vivero	Un año y medio en invernáculo (al año se replica a envase) y 2 meses de rusticación fuera del invernáculo	Macetas de entre 0,6-0,8 L.	frecuencia varió según el tamaño de maceta y las condiciones climáticas de temperatura y humedad.	Macetas de entre 0,6-0,8 L
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. pumilio</i>	120	C° Otto +5% Challuaco	Primavera 2012-Invernáculo	Tierra del vivero + arena volcánica + 10% compost compuesto de hojarasca y residuos orgánicos del vivero	Un año y medio en invernáculo (al año se replica a envase) y 2 meses de rusticación fuera del invernáculo	Macetas de entre 0,6-0,8 L.	Aspersión + refuerzo a mangue- ra. La frecuencia varió según el tamaño de maceta y las condiciones climáticas de temperatura y humedad.	Macetas de entre 0,6-0,8 L

Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. pumilio</i>	50	San Martín de los Andes	Primavera 2010-Invernáculo	Tierra del vivero + arena volcánica + 10% compost	2 años en invernáculo en cantero de siembra y 2 años afuera. Rapique 2:1-1	En invernadero 2-3 veces semanales en verano. La frecuencia varió según condiciones climáticas de temperatura y humedad.	Raíz desnuda
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Vivero Forestal Bosques Patagónicos	<i>N. alpina</i>	50	Lanín	Primavera 2011-Invernáculo	Tierra del vivero + arena volcánica + 10% compost	1 año en invernáculo en cantero de siembra y 2 años afuera. Rapique 1:1-1	En invernadero 2-3 veces semanales en verano. La frecuencia varió según condiciones climáticas de temperatura y humedad.	Raíz desnuda
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	UNRN	<i>N. antarctica</i>	50	Challhuaco	19/6/2012	Suelo: Compost 1:1	Invernadero frío/05/2013. Luego exterior con sombra	30 min diario por aspersión. Nov-Feb Fert Nitrofoska c/15 días	Maceta
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	UNRN	<i>N. antarctica</i>	50	Nirihuan	19/6/2012	Suelo: Compost 1:1	Invernadero frío/05/2013. Luego exterior con sombra	30 min diario por aspersión. Nov-Feb Fert Nitrofoska c/15 días	Maceta
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	UNRN	<i>N. dombevi</i>	50	Lago Moreno	19/6/2012	Suelo: Compost 1:1	Invernadero frío/05/2013. Luego exterior con sombra	30 min diario por aspersión. Nov-Feb Fert Nitrofoska c/15 días	Maceta
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	UNRN	<i>A. chilensis</i>	50	Lago Gutiérrez	19/6/2012	Suelo: Compost 1:1	Invernadero frío/05/2013	30 min diario por aspersión. Nov-Feb Fert Nitrofoska c/15 días	Maceta
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	UNRN	<i>N. obliqua</i>	50	Plantación Bolson	14/6/2011	suelo-compost 2:1	16-26/10/11 invernadero frío. Fertilizante C/15 días. Luego exterior sin sombra	En Marzo 2012 pasaron a exterior, riego aspersión diario. Nov-Feb 2013/14 Fert Nitrofoska c/15 días	Raíz desnuda

Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Mallín Ahogado	<i>A. chilensis</i>	300	Zona Mallín Ahogado	Sept.2010, Invernadero	100% compost: hecho con ramas, hojas, lupines, avena sembrada, etc.	Mayo 2011, Intemperie	Botellas recicladas y macetas de 1 a 1/2 L.	Microaspersión: 1 vez X semana	Maceta
Ladera Norte y Fondo de valle	Mayo de 2014	Forestal Cerro Pirque	<i>A. chilensis</i>	860	INTA Golondrinas (Loma del Medio)	Sept.2010, Invernadero	100% tierra negra	Diciembre 2010: 1° Repique a bandejas y 2° repique a maceta en Sept. 2011	Macetas de 1 L.	Fertirriego hasta Sept. 2011 y luego con manguera 1 vez X semana.	Maceta

Apéndice 5. Coeficientes de correlación de Spearman para las variables de altura y diámetro de cuello de las plantas, para cada especie, IA (intensidad de apertura) y sitio. Nivel de significancia: *** $P < 0,001$, ** $P < 0,010$, * $P < 0,050$.

Sitio	Especie	IA			
		0	30	50	70
LN	<i>A. chilensis</i>	0,89***	0,92***	0,85***	0,93***
	<i>N. alpina</i>	0,68***	-	0,54***	-
	<i>N. dombeyi</i>	0,90***	0,71*	0,79***	0,93*
	<i>N. obliqua</i>	0,86***	0,81***	0,74***	-
	<i>N. pumilio</i>	0,52	0,67*	0,79	0,82
LS	<i>A. chilensis</i>	0,83***	0,87***	0,87***	0,93***
	<i>N. alpina</i>	0,94***	0,95***	0,91***	0,71*
	<i>N. antarctica</i>	0,64***	0,84***	0,73***	0,84***
	<i>N. dombeyi</i>	0,91***	0,91***	0,92***	0,44
	<i>N. obliqua</i>	0,78***	0,81***	0,86***	0,88***
FV	<i>N. pumilio</i>	0,79***	0,90***	0,89***	0,93***
	<i>N. antarctica</i>	0,96***	-	0,53***	-
	<i>N. pumilio</i>	-	0,29	0,71***	-

Apéndice 6. Coeficientes estimados de los efectos fijos del modelo mínimo adecuado. Para los modelos de Supervivencia en función de la intensidad de apertura (IA) y de la altura de las plantas en función del año de plantación. Los valores estimados por el modelo que son más del doble de los valores de su error estándar se muestra en negra.

Parámetros del modelo	Supervivencia	Parámetros del modelo	Altura de las plantas
Intercept	78,57 (7,70)	Intercept	0,31
IA	1,20 (0,50)	Año	0,0063
IA ²	-0,031 (0,0070)	Año ²	0,013 (6,952e-03)
LS	-4,35	LS	-0,011
FV	-79,10 (0,0021)	FV	-0,43
<i>N. dombeyi</i>	-73,32 (0,0021)	IA	-0,0013
<i>N. pumilio</i>	-69,24 (0,0021)	<i>N. dombeyi</i>	0,13
<i>N. antarctica</i>	-79,43 (0,0021)	<i>N. pumilio</i>	-0,029
<i>N. alpina</i>	-42,050 (0,0021)	<i>N. antarctica</i>	0,14
<i>N. obliqua</i>	-22,60 (0,0021)	<i>N. alpina</i>	0,62 (1,353e-01)
IA * LS	-0,12	<i>N. obliqua</i>	0,65 (9,270e-02)
IA ² * LS	0,0082	Año * LS	0,026
IA * FV	-1,20 (0,0021)	Año ² * LS	-0,0040
IA ² * FV	0,031 (0,0021)	Año * FV	0,29
IA * <i>N. dombeyi</i>	-0,35	Año ² * FV	-0,048
IA ² * <i>N. dombeyi</i>	0,019 (0,0021)	Año * IA	0,00082
IA * <i>N. pumilio</i>	-1,29 (0,0021)	Año ² * IA	-9,77e-05
IA ² * <i>N. pumilio</i>	0,031 (0,0021)	LS * IA	-0,0019

Continúa

Continuación Apéndice 6

IA * <i>N. antarctica</i>	-1,11 (0,0021)	FV * IA	0,0025
IA ² * <i>N. antarctica</i>	0,030 (0,0021)	Año * <i>N. dombeyi</i>	-0,036
IA * <i>N. alpina</i>	-1,87 (0,0021)	Año ² * <i>N. dombeyi</i>	0,0098
IA ² * <i>N. alpina</i>	0,034 (0,0021)	Año * <i>N. pumilio</i>	-0,051
IA * <i>N. obliqua</i>	0,24	Año ² * <i>N. pumilio</i>	0,0021
IA ² * <i>N. obliqua</i>	0,00017	Año * <i>N. antarctica</i>	-0,14 (5,827e-02)
LS * <i>N. dombeyi</i>	32,45 (0,0021)	Año ² * <i>N. antarctica</i>	0,013 (7,009e-03)
FV * <i>N. dombeyi</i>	73,32 (0,0021)	Año * <i>N. alpina</i>	-0,060
LS * <i>N. pumilio</i>	33,28 (0,0021)	Año ² * <i>N. alpina</i>	0,0023
FV * <i>N. pumilio</i>	68,73 (0,0021)	Año * <i>N. obliqua</i>	-0,11 (5,869e-02)
LS * <i>N. antarctica</i>	23,10 (0,0021)	Año ² * <i>N. obliqua</i>	0,019 (8,062e-03)
IA * <i>N. antarctica</i>	78,26 (0,0021)	LS * <i>N. dombeyi</i>	-0,059
LS * <i>N. alpina</i>	-13,08	LS * <i>N. pumilio</i>	0,10
FV * <i>N. alpina</i>	42,05 (0,0021)	FV * <i>N. pumilio</i>	0,072
LS * <i>N. obliqua</i>	-1,75	LS * <i>N. alpina</i>	-0,049
FV * <i>N. obliqua</i>	22,60 (0,0021)	LS * <i>N. obliqua</i>	0,31 (1,160e-01)
IA * LS * <i>N. dombeyi</i>	1,97 (0,0021)	IA * <i>N. dombeyi</i>	0,00094
IA ² * LS * <i>N. dombeyi</i>	-0,038 (0,0021)	IA * <i>N. pumilio</i>	0,0042 (1,472e-03)
IA * FV * <i>N. dombeyi</i>	0,35	IA * <i>N. antarctica</i>	0,0019
IA ² * FV * <i>N. dombeyi</i>	-0,020 (0,0021)	IA * <i>N. alpina</i>	-0,0061 (1,512e-03)
IA * LS * <i>N. pumilio</i>	2,97 (0,0021)	IA * <i>N. obliqua</i>	-0,0016
IA ² * LS * <i>N. pumilio</i>	-0,054 (0,0021)	Año * LS * IA	0,0011
IA * FV * <i>N. pumilio</i>	2,020 (0,0021)	Año ² * LS * IA	-1,48e-05
IA ² * FV * <i>N. pumilio</i>	-0,041 (0,0021)	Año * FV * IA	-0,0022
IA * LS * <i>N. antarctica</i>	0,82	Año ² * FV * IA	0,00040
IA ² * LS * <i>N. antarctica</i>	-0,017	Año * LS * <i>N. dombeyi</i>	-0,055
IA * FV * <i>N. antarctica</i>	2,22 (0,0021)	Año ² * LS * <i>N. dombeyi</i>	0,019
IA ² * FV * <i>N. antarctica</i>	-0,044 (0,0021)	Año * LS * <i>N. pumilio</i>	-0,077
IA * LS * <i>N. alpina</i>	4,69 (0,0021)	Año ² * LS * <i>N. pumilio</i>	0,024
IA ² * LS * <i>N. alpina</i>	-0,070 (0,0021)	Año * FV * <i>N. pumilio</i>	-0,20
IA * FV * <i>N. alpina</i>	1,87 (0,0021)	Año ² * FV * <i>N. pumilio</i>	0,028
IA ² * FV * <i>N. alpina</i>	-0,034 (0,0021)	Año * LS * <i>N. alpina</i>	-0,059
IA * LS * <i>N. obliqua</i>	1,25	Año ² * LS * <i>N. alpina</i>	0,048 (1,345e-02)
IA ² * LS * <i>N. obliqua</i>	-0,016	Año * LS * <i>N. obliqua</i>	-0,15 (7,323e-02)
IA * FV * <i>N. obliqua</i>	-0,24	Año ² * LS * <i>N. obliqua</i>	0,043 (9,630e-03)
IA ² * FV * <i>N. obliqua</i>	-0,00017		

Apéndice 7. Importancia relativa de cada variable predictora (Supervivencia y altura de las plantas). Los valores de la importancia relativa se calculan a partir de la suma de los “pesos de Akaike” de todos los modelos que incluyen la variable predictora. Los valores de la importancia relativa en negrita son variables o interacción de variables incluidas en el modelo mínimo adecuado (IA = intensidad de apertura).

<i>Variable predictora</i>	<i>Supervivencia</i>	<i>Altura de las plantas</i>
Año	-	1,00
Sitio	1,00	1,00
IA	1,00	1,00
Especie	1,00	1,00
IA * Especie	1,00	1,00
IA * Año	-	1,00
Año * Sitio	-	1,00
Sitio * Especie	1,00	1,00
Año * Sitio * Especie	-	1,00
IA * Año * Especie	-	1,00
IA * Sitio	1,00	0,94
IA * Sitio * Especie	1,00	0,93
IA * Año * Sitio	-	0,15
IA * Año * Sitio * Especie	-	0,03

