

## Monitoreo a corto y largo plazo en ensayos de restauración de la conífera longeva y de lento crecimiento *Pilgerodendron uviferum*

Short-term and long-term monitoring in restoration trials of the long-lived and slow-growing conifer *Pilgerodendron uviferum*

Nicole Galindo <sup>\*\*</sup>, Jan R Bannister <sup>a</sup>, Katharina Laage <sup>b</sup>

\*Autor de correspondencia: <sup>a</sup> Instituto Forestal, Oficina Chiloé, Nercón S/N, Castro, Chile, tel.: 56 65 2633641, ngalindo@infor.cl

<sup>b</sup> Universidad de Greifswald, Facultad de Matemáticas y Ciencias Naturales, Instituto de Botánica y Ecología del paisaje, Alemania.

### SUMMARY

Long-term monitoring is essential to understand responses to restoration actions in slow-growing species such as the native conifer *Pilgerodendron uviferum*. After catastrophic fires, most trees and seeds of this conifer were eliminated, limiting its natural recovery. The objective of this study was to analyze the implications of short-term and long-term monitoring on the interpretation of results in passive and active restoration experiments with *Pilgerodendron uviferum* in Chiloé Island. For 10 years, the processes of seed production and natural plant recruitment, and assisted regeneration through plantations of *P. uviferum* were evaluated in different microsite conditions in bogs, and light availability in sites with better drainage. The production of *P. uviferum* seeds was irregular and abundant every seven years (~200 seeds m<sup>-2</sup>). The natural regeneration after eight years increased by 80 %, especially in substrates with mosses and in association with *Donatia fascicularis* and *Astelia pumilia*. The abundance of natural regeneration was positively associated with older trees, the height and diameter of plants was favored by the protection of shrubs. In bogs, plants established on mounds reached higher levels of survival (78 %) and in sites with better drainage, survival was higher under canopy protection (100 %). Our results suggests that slow-growing species, such as *P. uviferum*, require long periods of monitoring to adequately interpret the results of restoration experiments in burned forests.

*Key words:* early performance, ciprés de Las Guaitecas, Chiloé Island, growth, ecological restoration, survival.

### RESUMEN

El monitoreo a largo plazo es fundamental para comprender las respuestas a acciones de restauración en especies de lento crecimiento como la conífera nativa *Pilgerodendron uviferum*. Luego de incendios catastróficos, la mayoría de los árboles y semillas de esta especie fueron eliminados, restringiendo su recuperación natural. El objetivo de este estudio fue analizar las implicancias del monitoreo a corto y largo plazo en la interpretación de resultados en ensayos de restauración pasiva y activa de *Pilgerodendron uviferum*, posterior a incendios en la Isla de Chiloé. Durante 10 años se evaluó la producción de semillas, el reclutamiento natural, y la regeneración asistida mediante plantaciones de *P. uviferum* bajo diferentes condiciones de micrositio en bosque turbosos y luminosidad en bosque de mejor drenaje. La producción de semillas de *P. uviferum* fue irregular y abundante cada siete años (~200 semillas m<sup>-2</sup>). La regeneración natural luego de ocho años aumentó en un 80 %, principalmente en sustratos cubiertos con musgos y en asociación con *Donatia fascicularis* y *Astelia pumilia*. La abundancia de regeneración natural estuvo positivamente asociada a árboles semilleros de mayor edad, la altura y diámetro de las plantas fue favorecida por la protección arbustiva. En sitios turbosos, la plantación en camellones alcanzó mayores tasas de sobrevivencia (78 %) y en sitios con mejor drenaje, fue mayor bajo protección de dosel superior (100 %). Los resultados sugieren que especies de lento crecimiento como *P. uviferum* requieren de periodos prologados de monitoreo para interpretar adecuadamente los resultados de ensayos de restauración en bosques quemados.

*Palabras clave:* desempeño inicial, ciprés de Las Guaitecas, Isla de Chiloé, crecimiento, restauración ecológica, sobrevivencia.

### INTRODUCCIÓN

En estudios de ecología se ha definido que el monitoreo a largo plazo corresponde al seguimiento sistemático y regular de datos de campo durante más de 10 años o lo

suficientemente largos para cuantificar los procesos claves que estructuran el ecosistema bajo investigación (Linder-mayer *et al.* 2012). En este sentido, al realizar restauración ecológica, en el proceso de recuperación de los ecosistemas ocurren potenciales cambios en las especies, que sue-

len responder en largos periodos de tiempo, y, por ende, un enfoque de monitoreo a largo plazo mejora la comprensión del potencial adaptativo y la plasticidad a nivel de especie, población y comunidad (Montalvo *et al.* 2008, Moreno-Mateos *et al.* 2020). La comprensión de estos procesos ecológicos proporciona antecedentes que promueven la generación de conocimiento para la toma de decisiones y mejora la eficiencia de las acciones de la restauración, pues permite una evaluación comparativa del progreso, posibilita un manejo adaptativo a través de la modificación y el diseño de soluciones que mejoren los procesos de recuperación de los ecosistemas a restaurar (Stanturf *et al.* 2017, Gann 2019). Por el contrario, iniciativas con programas de monitoreo a corto plazo, que incluyen entre tres y cinco años de evaluación, dependiendo de la fuente de financiamiento (Stanturf *et al.* 2017), en general son simplificados para entregar respuestas sobre la recuperación sostenida de las especies y comunidades, y no permiten evaluar correctamente el éxito o fracaso de las acciones de restauración (Brancalion *et al.* 2013, Moreno-Mateos *et al.* 2020).

A nivel mundial, existen pocos estudios que consideran el monitoreo en periodos de tiempo significativos de décadas o más (Vallauri *et al.* 2002). Un interesante estudio de monitoreo a largo plazo es una iniciativa de restauración en los Alpes de Europa Central, en que luego de 120 años se descubrió que, pese a que no se ha recuperado la composición original del bosque, el suelo ha recuperado su funcionalidad (*e.g.* profundidad, Vallauri *et al.* 2002). En otros lugares del mundo también se han realizado importantes estudios de restauración a largo plazo, como en Estados Unidos (Doyle y Drew 2008), Costa Rica (Pattanayak y Cordero 2012) y Brasil (Calmon *et al.* 2011).

En Chile, actualmente se registran 95 acciones de restauración ecológica (MMA 2020), de las cuales más del 60 % cuenta en promedio con programas de monitoreo de dos años. Lara *et al.* (2014) presentan seis experiencias de restauración en Chile, con monitoreos en promedio de cinco años, que incluyen acciones de conversión de especies exóticas a especies nativas, y programas de investigación para la restauración de especies nativas emblemáticas y en estado de conservación como *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch, *Fitzroya cupressoides* (Molina) y *Pilgerodendron uviferum* (D. Don) Florin. Asimismo, existen algunos estudios con periodos de monitoreo importante, como el de Montaldo (1999), que incluye una experiencia de restauración pasiva monitoreada por 34 años (Smith-Ramírez *et al.* 2015).

Una necesidad urgente a nivel nacional es la aplicación de programas de investigación para la restauración de especies de lento crecimiento y en categoría de conservación como las coníferas nativas del sur de Chile (Lara *et al.* 2013). Estas coníferas se establecen en suelos infértiles, con crecimientos bajos en comparación a especies arbóreas en bosques tropicales, y aún más bajos, en bosques alterados, lo que podría llevar muchos siglos

recuperar las características de los bosques originales (Newton y Watson 1995). Por ejemplo, *Fitzroya cupressoides* presenta crecimientos extremadamente bajos en altura ( $< 16 \text{ cm año}^{-1}$ ) luego de 5 años desde su establecimiento en sitios alterados por incendios y explotación maderera (Lara *et al.* 2008). En el caso de *Pilgerodendron uviferum* su crecimiento en altura es aún menor, fluctuando entre  $5,75 \text{ cm año}^{-1}$  en sitios abiertos y  $12,75 \text{ cm año}^{-1}$  en sectores protegidos por matorral (Bannister *et al.* 2020). Lo que contrasta con otras especies arbóreas de los bosques templados como *Eucryphia cordifolia* Cav. ( $< 88 \text{ cm año}^{-1}$ ), *Gevuina avellana* Molina ( $< 47 \text{ cm año}^{-1}$ ) y *Aextoxicon punctatum* Ruiz et Pavon ( $< 32 \text{ cm año}^{-1}$ ) (Escobar *et al.* 2013, Donoso *et al.* 2013).

Al definir un enfoque de restauración (*i.e.* pasivo y/o activo) en especies de lento crecimiento posterior a un disturbio, es importante considerar estudios que incluyan las limitantes en el potencial de recuperación natural, como la disponibilidad de semillas y recuperación de la regeneración natural, que pueden ocurrir en prolongados periodos de tiempo y presentar una importante variación espacial dependiendo del ecosistema. Asimismo, al acelerar el proceso de restauración a través de reintroducción de plantas de la misma especie, las variables abióticas (disponibilidad de luz, sustrato, nutrientes) y bióticas (procedencia de las plantas, ramoneo) pueden influir en el crecimiento y sobrevivencia en las fases tempranas de establecimiento, y cada una de estas variables dependerá del factor limitante de sitio (Bannister *et al.* 2020). Al trabajar con especies de lento crecimiento, una evaluación a corto plazo resulta insuficiente en la comprensión de las respuestas a las acciones de restauración, lo que determina la relevancia del monitoreo a largo plazo en estas especies.

Un caso representativo de especie de lento crecimiento que requiere urgente restauración es la conífera *P. uviferum*. Esta especie de alto valor ecológico y maderero, luego de varios siglos de quemadas extensivas y tala indiscriminada (Bannister *et al.* 2012, Lara *et al.* 2013) presenta problemas de conservación, siendo incluida en la lista roja de especies de la IUCN como vulnerable (Souto *et al.* 2013) y en el Apéndice I de la convención de CITES (UNEP-WCMC 2020). En este contexto, el año 2008 se inició un programa de investigación a largo plazo con el objetivo de estudiar los bosques quemados de *P. uviferum* en el sur de la Isla de Chiloé, y desarrollar una base ecológica-científica que apoye las estrategias de restauración y conservación de la especie (Bannister *et al.* 2013, 2014, 2020). Según los estudios ya publicados, los cipresales representan un típico caso de ecosistemas con baja resiliencia a incendios, debido a la baja tasa de recuperación natural por la falta de individuos semilleros a escala de paisaje (Cruz y Lara 1981, Bannister *et al.* 2014). Además, dependiendo de la ubicación, el crecimiento de plantas establecidas de *P. uviferum* estaría limitado por la microtopografía (sectores de turbera) y por la disponibilidad de luz (sectores de monte con mejor drenaje) (Bannister *et*

al. 2013). El objetivo de este estudio es analizar y discutir las implicancias en la interpretación de datos que tiene el monitoreo de corto y largo plazo en ensayos de restauración de *P. uviferum*. La hipótesis es que, al restaurar especies de lento crecimiento, como *P. uviferum* se requiere de períodos de tiempo prolongados (al menos 10 años) de monitoreo para interpretar adecuadamente los resultados de ensayos de restauración pasiva y activa.

Este estudio contempló las evaluaciones de los resultados del monitoreo en el corto plazo de los estudios publicados por Bannister *et al.* (2013, 2014) sobre la producción de semillas y regeneración natural de *P. uviferum*, y el desempeño inicial (sobrevivencia y crecimiento) de una plantación experimental de *P. uviferum* bajo distintos tratamientos de micro-topografía y cobertura de dosel; y los resultados en el largo plazo de estos mismos ensayos por un periodo de 10 años en los bosques quemados de la Isla de Chiloé. Basándose en esta información se analizan las implicancias de estos resultados en la interpretación de datos y la toma de decisiones para restaurar coníferas de lento crecimiento en los bosques templados quemados de la zona austral de Chile.

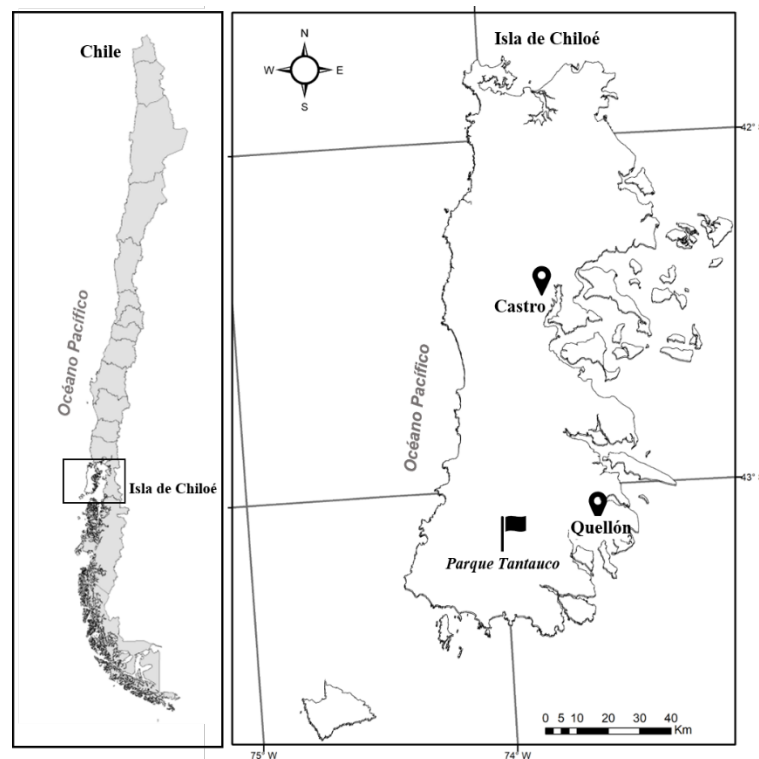
## MÉTODOS

*Área de estudio.* El estudio se llevó a cabo al interior del Parque Tantauco (43°10 S, 74°05 O), esta área de conser-

vación corresponde a un parque privado que alberga extensas áreas afectadas por incendios de origen antrópico que causaron la destrucción de bosques dominados por *P. uviferum* (Holz y Veblen 2009) al sur de la Isla de Chiloé (figura 1). El clima corresponde a templado frío con fuerte influencia oceánica (Di Castri y Hajek 1976), con precipitaciones medias anuales de 2.043 (mm), humedad relativa de 81 % y temperaturas medias, máximas y mínimas de 9,6, 14,0 y 5,1°C, respectivamente, entre los años 2009 y 2019 (Red Meteorológica de INIA 2020).

El paisaje del área estudiada fue fuertemente influenciada por las últimas glaciaciones (ca. 13.000 años AP), dando hoy origen a lomajes suaves y hondonadas. En sectores con relieve deprimido y planos predominan los suelos ñadis, que se caracterizan por presentar un horizonte delgado y rojizo entre el suelo y el depósito fluvio-glacial llamado fierrillo u horizonte gley (Villagrán 1988). La baja profundidad y escasa pendiente de estos suelos produce una lenta velocidad de drenaje en los meses invernales, saturando el suelo de agua, al contrario, durante los meses estivales se produce una disminución de la humedad debido a la limitada capacidad de almacenar suficiente agua.

*Experimento de producción y dispersión de semillas.* La metodología utilizada por Bannister *et al.* (2014) y considerada por este estudio, consistió en monitorear árboles con conos femeninos, aislados ( $\geq 200$  m) y con regene-



**Figura 1.** Ubicación geográfica del área de estudio (Parque Tantauco) en la Isla de Chiloé.

Geographical location of the study area (Parque Tantauco) on the Island of Chiloé.

ración natural de la especie a su alrededor. Debido a la restricción en acceso y logística se seleccionó un árbol de 76 años. Alrededor de este árbol se instalaron 28 cajas de semillas, distribuidas en dirección a los puntos cardinales con una distancia inicial de 2 m, y luego cada 5 m, completando una distancia total de 30 m al árbol semillero. Las cajas de semillas corresponden a cajones de madera de 0,25 m<sup>2</sup> de superficie y a 30 cm del suelo. Este experimento fue visitado cada invierno entre 2009 y 2019, y se cuantificó la cantidad de semillas depositadas para cada una de las cajas. Posteriormente, las cajas eran vaciadas para la cuantificación en el año siguiente. Este experimento estuvo limitado por la suposición que la semillación de un individuo sería similar a la semillación de otros individuos de la especie en el área de estudio.

*Estudio regeneración natural de P. uviferum.* A partir de la metodología utilizada en Bannister *et al.* (2014) para evaluar el reclutamiento natural de plantas alrededor de los árboles semilleros y conocer qué factores de micrositio lo influyen. En 2010, se marcaron 20 árboles semilleros aislados, a una distancia entre árboles  $\geq 150$  m. A cada uno de los 20 árboles semilleros seleccionados, se midió el diámetro a la altura del cuello (DAC), diámetro a 1,3 m de altura (DAP), altura total (h), altura de copa (hc), área de copa (ac). Estas mediciones se realizaron nuevamente en el año 2018. Se determinó la edad aproximada de cada árbol mediante tarugos de incremento, solo el primer año de monitoreo (2010).

Para estos mismos años de monitoreo, en un radio de 30 m alrededor de cada árbol semillero, se contó cada planta de regeneración natural de *P. uviferum* y se determinó la posición espacial de cada una de ellas mediante la medición de la distancia al árbol semillero cercano y su posición en el eje cartesiano. Se consideró regeneración natural a aquellas plántulas y retoños que tuvieran  $< 5$  cm de DAP y fueran más jóvenes que el árbol central de semillas. Se realizaron mediciones del diámetro a la altura del cuello (DAC) de cada planta encontrada. En el año 2018, se incorporaron otros atributos de la planta como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (h) y variables de micrositio como el tipo de sustrato en el suelo y la cobertura del matorral dominados por especies de *Baccharis* y *Gleichenia* spp. Para el tipo de sustrato del suelo en el que se encuentra creciendo *P. uviferum* se definieron las siguientes categorías: suelo mineral; *Sphagnum*; cojín *Donatia-Astelia* (dominado por *Donatia fascicularis* J.R. Forster y *Astelia pumilia* J. R. Forst.); mezcla mineral - musgos (sustrato formado de suelo mineral y en menor proporción de musgos); y mezcla musgos - cojín *Donatia-Astelia* (sustrato formado de musgos y menor proporción por *Donatia-Astelia*). Los cojines de *Donatia-Astelia* es una asociación vegetacional de caméfitos que es común en las comunidades turbosas acojinadas, donde es frecuente encontrar poblaciones de *P. uviferum* (Ramírez *et al.* 2014). De esta forma, se estimó el porcentaje del tipo de

sustrato y de cobertura de matorral presente en 1 m<sup>2</sup> alrededor de cada planta de renuevo de *P. uviferum*.

*Experimento con regeneración asistida de P. uviferum.* La metodología utilizada por Bannister *et al.* (2013) consistió en establecer dos experimentos de plantación en bosques quemados de *P. uviferum*, uno en bosques turbosos donde la micro-topografía es el factor limitante para el crecimiento de plantas, y otro en bosques de monte en que el factor limitante del crecimiento de las plantas es la disponibilidad de luz. En ambos experimentos, se utilizó un diseño en tres bloques completamente aleatorizados (cada bloque de tres unidades experimentales). Los tratamientos fueron asignados a unidades experimentales de 120 m<sup>2</sup>, con 12 plantas plantadas a 2x2 m que incluye un área *buffer* al perímetro de la unidad de 3 m. En total, se establecieron en terreno 108 plantas etiquetadas de la especie (216 plantas en total). En los bosques turbosos se utilizaron tres tratamientos: a) sustrato mineral (sustrato mineral luego de extraer la capa de *Sphagnum*), b) camellón (sustrato elevado por la acumulación de musgos), y c) sustrato natural (capa plana inalterada de musgos). En los bosques de monte se usaron los tratamientos de: a) dosel denso (dosel cerrado), b) dosel semi-denso (50 % de cobertura de dosel) y c) dosel abierto (condiciones abiertas). Durante 10 años (2010 a 2019), cada invierno se midió el diámetro a la altura del cuello (DAC) y altura total (h).

*Análisis estadísticos.* Para evaluar la disponibilidad de semillas se calculó la suma total de semillas dispersadas en cada año y se clasificó según la distancia de la caja al árbol semillero. Para la evaluación del reclutamiento natural de *P. uviferum*, inicialmente se verificó el tipo de distribución y la homogeneidad de las variables a través de la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Levene, respectivamente, y se obtuvo que algunas variables de los árboles semilleros (DAC, DAP, h, ac) y regeneración natural (DAC y h) cumplían con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, caso contrario ocurrió con las variables de los árboles semilleros (hc), regeneración natural (frecuencia de plantas, DAP) y las de sitio (sustrato mineral, *Sphagnum*, mineral-musgo, musgo-cojín *Donatia-Astelia*, cojín *Donatia-Astelia* y cobertura matorral). Las variables de la regeneración natural y los atributos de los árboles semilleros corresponden a grupos relacionados, por lo tanto, si se cumplía con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba de t para datos pareados. En caso contrario se utilizó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Para evaluar la asociación entre el desempeño de la regeneración natural y los atributos de los árboles semilleros, y las variables de sitio, al cumplirse con los supuestos de normalidad se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, en el caso contrario, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman. Finalmente, se comparó la frecuencia relativa de regeneración natural según el tipo de sustrato con la prueba no paramétrica de

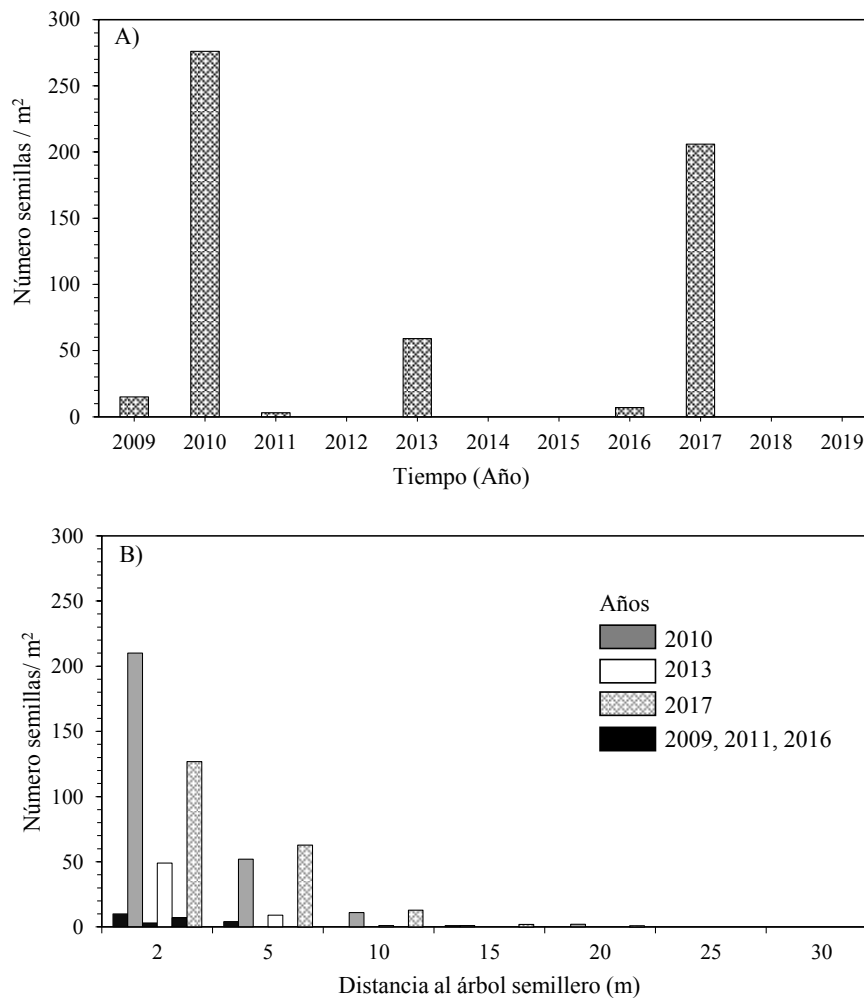
Kruskal Wallis para comparar más de dos grupos independientes (Sokal and Rohlf 1995).

Para evaluar la regeneración asistida, se calculó el incremento corriente anual (ica) del diámetro a la altura del cuello (DAC) y altura total (h) de las plantas en cada año para el análisis de crecimiento. Dado que la mayoría de las variables (sobrevivencia, DAC, h, ica) obtuvieron distribuciones no normales y heterocedástidad de varianza, incluso, después de varias transformaciones de los datos, se utilizaron solo pruebas no paramétricas. Para evaluar el efecto de los tratamientos en cada año de medición, para cada una de las variables respuesta, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis. Finalmente, se evaluó para cada tratamiento en particular, si presentaba cambios significativos en el tiempo, para ello se aplicó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon para datos relacionados (Sokal and Rohlf 1995). En todas las pruebas se utilizó un

$\alpha < 0,05$  y los softwares estadísticos R versión 3.5.2 (R Development Core Team, 2020) y SigmaPlot versión 14.0.

## RESULTADOS

*Producción y dispersión de semilla de P. uviferum.* Luego de diez años de monitoreo, la producción de semillas fue irregular en el tiempo (figura 2A). En los años 2010 y 2017 se presentaron eventos de alta producción de semillas ( $>200$  semillas  $m^{-2}$ ), y en el año 2013 una producción media ( $> 50$  semillas  $m^{-2}$ ). El resto de los años de monitoreo hubo una producción muy baja o nula. Tanto en los años de alta y baja producción de semillas se observó que la dispersión se concentra principalmente a  $<5$  m de distancia del árbol semillero, depositándose más del 60 % de las semillas en los primeros 2 m desde el árbol semillero (figura 2B).



**Figura 2.** A) Número de semillas de *P. uviferum* recolectadas entre los años 2009 y 2019. No se incluyen los años 2012, 2014, 2015, 2018, 2019 y 2020 ya que no hubo producción de semillas. B) Distancia de dispersión de semillas de *P. uviferum* desde el árbol semillero en los años con semillación. Las barras negras representan  $<15$  semillas/ $m^2$ .

A) Number of *P. uviferum* seeds collected between 2009 and 2019. The years 2012, 2014, 2015, 2018, 2019 and 2020 are not included since seed production was null. B) Dispersion distance of *P. uviferum* seeds from the seed tree in years with seed productions. Black bars represent  $<15$  seeds/ $m^2$ .



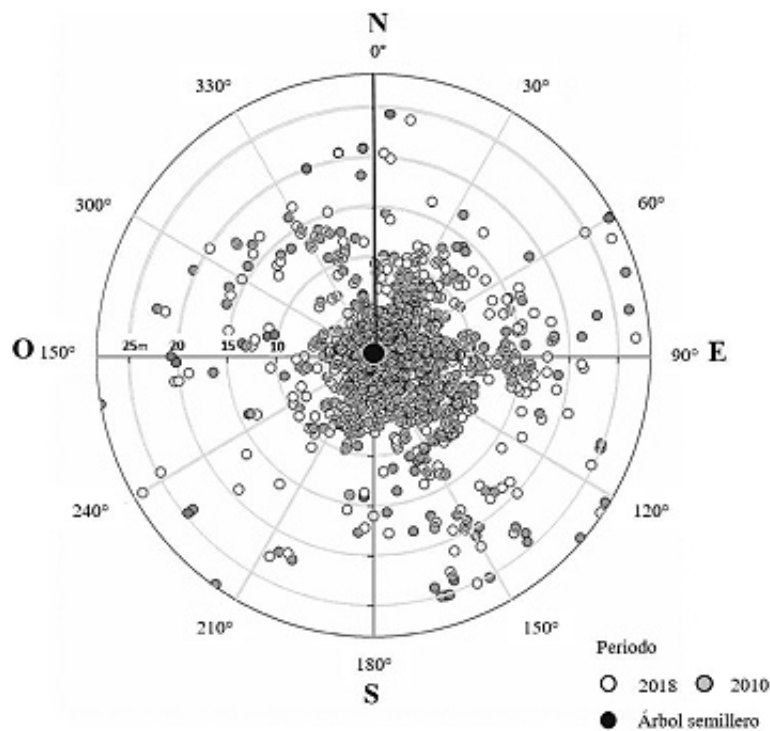
*Regeneración natural de P. uviferum.* Los árboles semilleros presentaron aumentos significativos en diámetro, altura total y área de copa entre 2010 y 2018 ( $P < 0,001$ ) (cuadro 1). La regeneración natural de *P. uviferum* entre estos periodos presentó cambios en la densidad media de regeneración aumentando de 38 a 47 plantas, ( $P = 0,004$ ) (cuadro 1). Se observa que el 51 y 47 % de las plántulas de regeneración en 2010 y 2018, respectivamente, se encontraron

distribuidas a  $< 5$  m del árbol semillero y más del 70 % de las plántulas se concentraron en dirección oriente en ambos periodos (entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ ) (figura 3). El aumento en frecuencia de la regeneración tuvo una correlación positiva con la presencia del sustrato cojín de *Donatia-Astelia* ( $P = 0,01076$ ) (cuadro 2), y se encontró una mayor presencia de regeneración natural en los sustratos conformados por musgos y cojines de *Donatia-Astelia* ( $P < 0,001$ )

**Cuadro 1.** Regeneración natural *P. uviferum* y atributos estructurales de árboles semilleros (n=20).

Natural regeneration of *P. uviferum* and structural attributes of seed trees (n=20).

	2010	2018	Crecimiento medio anual	Valor P	
Regeneración natural media (n° plantas año <sup>-1</sup> )	38,6	47,8	-	0,004	
Regeneración natural (n° plantas año <sup>-1</sup> )	772	956	-	NA	
Atributos árboles semilleros	DAP (cm)	13,48 ± 5,98	15,14 ± 5,89	0,21	0,001
	DAC (cm)	19,28 ± 7,29	22,40 ± 8,29	0,39	0,001
	Altura total (m)	6,40 ± 1,52	6,80 ± 1,53	0,05	0,001
	Altura copa (cm)	47,0 ± 38,40	52,45 ± 38,28	0,01	0,601
	Área copa (m <sup>2</sup> )	3,62 ± 2,54	4,88 ± 3,16	0,16	0,001
	Edad (años)	58,10 ± 13,96	66,18 ± 13,96	-	NA



**Figura 3.** Representación espacial de la regeneración natural de *P. uviferum* total alrededor de su respectivo árbol semillero en los años 2010 y 2018. El círculo negro corresponde a una representación gráfica de la posición central de los 20 árboles semilleros.

Spatial representation of the natural regeneration of *P. uviferum* total around its respective seed tree in 2010 and 2018. The black circle corresponds to a graphic representation of the central position of the 20 seed trees.

(figura 4). La frecuencia de regeneración natural en el año 2018 tuvo una correlación positiva con el diámetro a la altura del cuello (DAC) ( $Rho = 0,49$ ;  $P = 0,04617$ ), y pecho (DAP) ( $Rho = 0,45$ ;  $P = 0,02857$ ), altura total (h) ( $Rho = 0,46$ ;  $P = 0,04343$ ) y la edad ( $Rho = 0,68$ ;  $P = 0,001016$ ) de los árboles semilleros (cuadro 2). La cobertura de matorral presentó una relación positiva tanto con el diámetro a la altura del cuello ( $Rho = 0,54$ ;  $P = 0,01571$ ) y pecho ( $Rho = 0,54$ ;  $P = 0,003486$ ) y la altura ( $Rho = 0,65$ ;  $P = 0,002699$ )

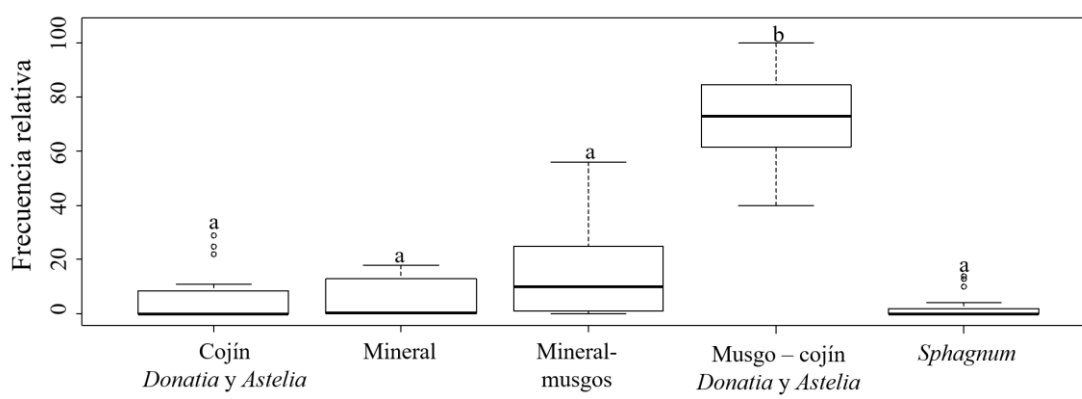
de las plantas de regeneración. En cambio, la presencia del sustrato cojín *Donatia-Astelia* muestra una relación negativa con los diámetros a la altura del cuello ( $Rho = -0,50$ ;  $P = 0,02426$ ) y de pecho ( $Rho = -0,48$ ;  $P = 0,03242$ ) de las plantas (cuadro 2).

*Regeneración asistida de P. uviferum.* En el experimento en bosques turbosos, durante los diez años de monitoreo, las plantas establecidas en camellón siempre presentaron

**Cuadro 2.** Matriz de correlación de Spearman entre atributos estructurales de la regeneración natural, árboles semilleros, y de sitio (n = 20). Efectos significativos (\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; \*\*\*  $P < 0,001$ ).

Spearman's correlation matrix among structural attributes of natural regeneration, seed trees, and site (n = 20). Significant effects (\*  $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$ , \*\*\*  $P < 0,001$ ).

Variables	Frecuencia Regeneración natural (n° plantas)	Aumento Regeneración natural (n° plantas) Plantas sanas (%)	Atributos regeneración natural			
			DAC (mm)	DAP (cm)	Altura total (m)	
Cobertura matorral (%)	-0,11	-0,39	0,22	0,54*	0,63*	0,65**
Mineral	0,05	-0,11	0,01	0,12	0,21	0,11
Tipo sustrato (%)						
<i>Sphagnum</i>	0,34	0,13	-0,20	-0,10	-0,33	-0,09
Cojín <i>Donatia-Astelia</i>	0,31	0,56*	0,04	-0,50*	-0,48*	-0,34
Mineral-musgo	0,27	0,16	-0,35	-0,21	-0,15	-0,16
Musgo-Cojín <i>Donatia-Astelia</i>	-0,13	-0,01	0,21	0,23	0,32	0,17
Atributos árbol semillero						
DAP (cm)	0,49*	0,14	-0,36	0,22	0,07	0,46*
DAC (mm)	0,45*	0,22	-0,21	0,14	0,12	0,40
Altura total (m)	0,46*	0,50*	-0,08	-0,18	-0,08	0,13
Altura copa (m)	0,03	-0,24	0,05	0,29	0,43	0,41
Área copa (m <sup>2</sup> )	0,45	0,28	-0,24	0,08	0,01	0,36
Edad (años)	0,68***	0,34	-0,37	-0,20	-0,13	-0,08

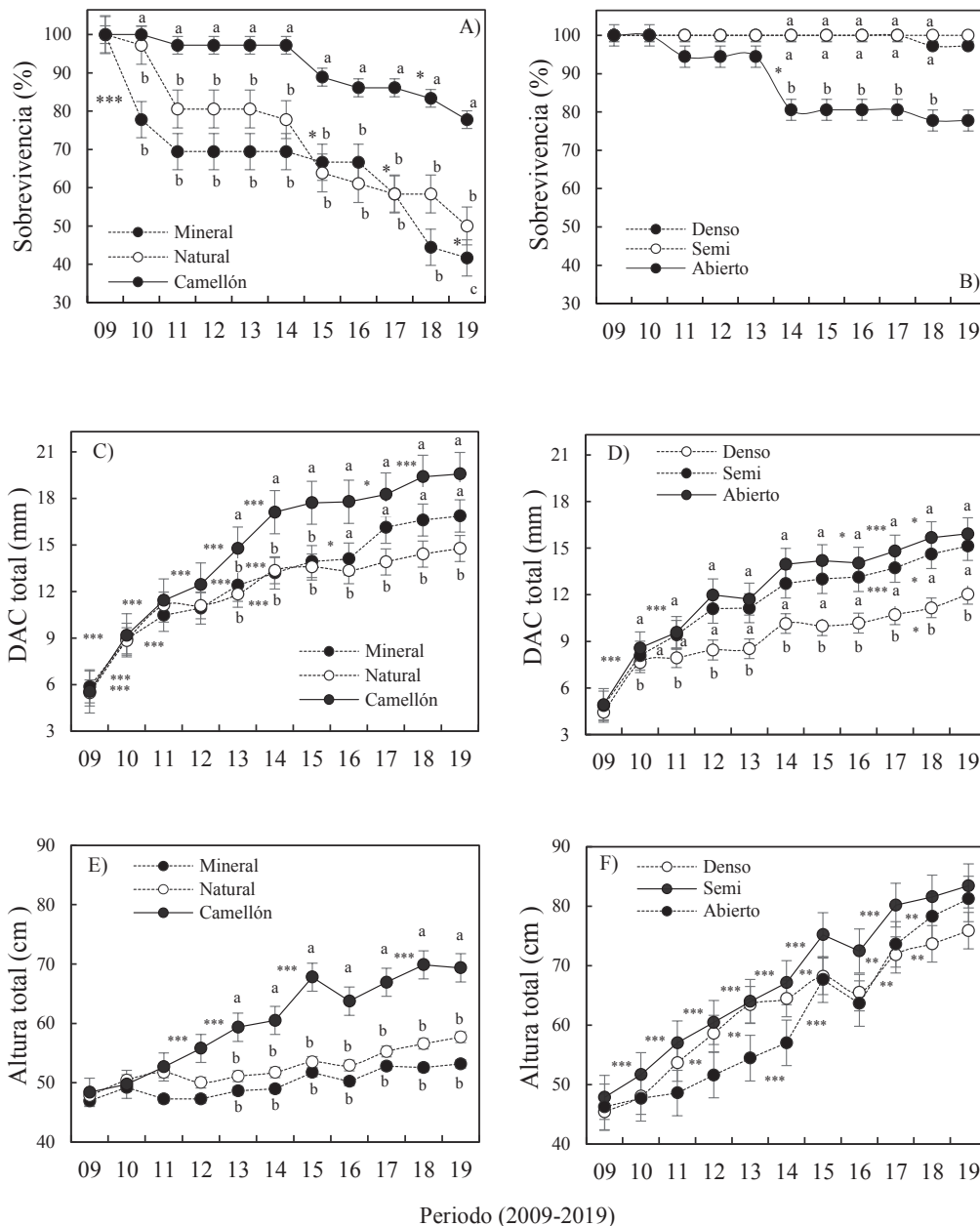


**Figura 4.** Frecuencia relativa regeneración natural de *P. uviferum* según el tipo de sustrato. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0,05$ ).

Relative frequency of natural regeneration of *P. uviferum* according to the type of substrate. Different letters indicate significant differences between treatments ( $P < 0,05$ ).

los mayores niveles de sobrevivencia ( $P < 0,05$ ). En la figura 5A, luego de 6 años de monitoreo, la sobrevivencia de las plantas comenzó a disminuir en todos los tratamientos hasta el décimo año de estudio. En diez años, la tasa de sobrevivencia de las plantas establecidas en camellón fue de un 78 %, un 50 % en suelo natural y un 42 % en suelo mineral ( $P = 0,005585$ ). El diámetro y la altura de las plan-

tas presentaron un mayor crecimiento en las plantas establecidas en camellón, alcanzando un diámetro  $\sim 19,6$  mm ( $P = 0,002239$ ) y  $\sim$  altura de 69,4 cm ( $P = 0,009956$ ) en diez años (figura 5C y 5E). El incremento (ica) en diámetro y altura fue variable en todo el periodo de monitoreo, sin presentar una tendencia (figura 6A y 6C). En bosques de monte, en diez años, la sobrevivencia de las plantas esta-



**Figura 5.** Sobrevivencia media (A y B), diámetro a la altura del cuello (DAC) (mm) (C y D) y altura total (cm) (E y F) de *P. uviferum* entre 2009 y 2019, según el tratamiento en bosques turbosos (tipo sustrato: camellón, mineral y natural) y bosques de monte (cobertura de dosel: abierto, denso, semi denso). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0,05$ ). Niveles de significancia (\* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ ).

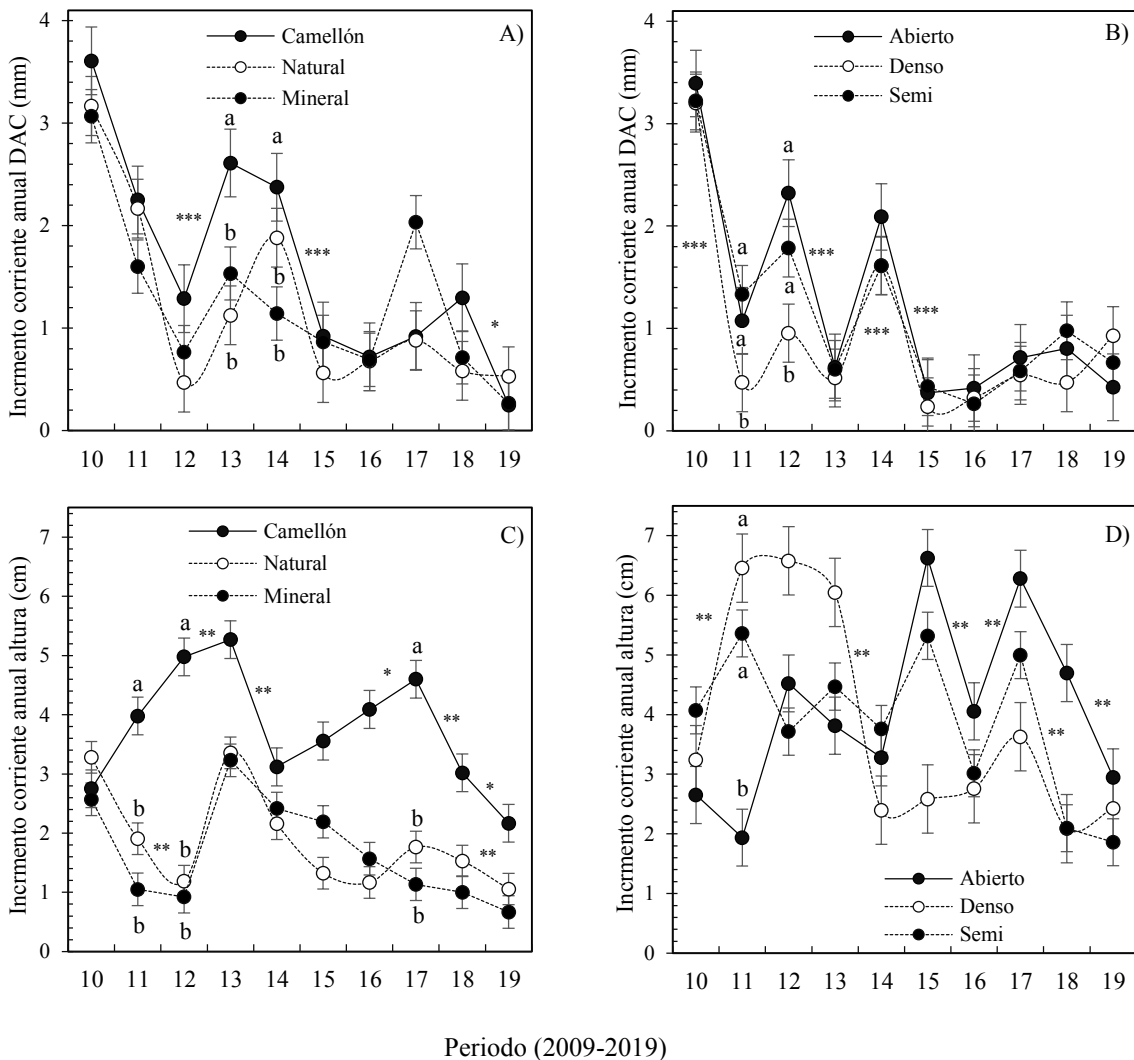
Survival (A and B), root collar diameter (DAC) (mm) (C and D) and total height (cm) (E and F) of *P. uviferum* plants between 2009 and 2019, according to the treatment in bogs forests (substrate type: mounds, mineral and natural) and upland forests (canopy coverage: open, dense, semi-dense). Different letters indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ). Significance levels (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$ ).



blecidas bajo cobertura de dosel denso y semi denso fue siempre mayor que los sectores abiertos ( $P = 0,001065$ ), alcanzando un 97 % de plantas vivas en el sector con cobertura de dosel denso, 100 % en condiciones semi denso y un 78 % en los lugares abiertos (figura 6B). Las plantas, en general, no presentan diferencias en altura según el tratamiento ( $\sim 80,2 \text{ cm año}^{-1}$ ) y el diámetro fue mayor en la plantación establecida bajo dosel abierto ( $15,9 \text{ mm año}^{-1}$ ) y semidenso ( $15,1 \text{ mm año}^{-1}$ ) que en dosel denso ( $12,0 \text{ mm año}^{-1}$ ) ( $P = 0,0002506$ ) (figura 5D y 5F). En cuanto al incremento en altura y diámetro (ica), fue variable los diez años de monitoreo (figura 6B y 6D).

## DISCUSIÓN

*Monitoreo a corto y largo plazo de ensayos de restauración pasiva y activa de P. uviferum.* Al igual que muchas coníferas del mundo, *Pilgerodendron uviferum* no produce conos todos los años y tiene intervalos irregulares de producción de semillas, esta limitación además estaría acompañada de que esta especie es dioica (Lara *et al.* 2013), por tal razón su importancia de monitorear estos procesos en el largo plazo. En este caso de estudio, el monitoreo a corto plazo (3 años) de la producción de semillas reportado por Bannister *et al.* (2014) muestra que *P. uviferum* tiene un patrón irregular de



**Figura 6.** Incremento corriente anual (ica) en diámetro a la altura del cuello (DAC) (A y B) y altura (C y D) de *P. uviferum* entre 2009 y 2019, según el tratamiento aplicado en plantación en bosques turbosos (tipo sustrato: camellón, mineral y natural) y en bosques de monte (cobertura de dosel: abierto, denso, semi denso). Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P < 0,05$ ). Niveles de significancia (\* $P < 0,05$ ; \*\* $P < 0,01$ ; \*\*\* $P < 0,001$ ).

Current annual increment (ica) in root collar diameter (DAC) (A and B) and height (C and D) of *P. uviferum* seedlings in plantation between 2009 and 2019, according to the treatment applied in plantation in bogs forests (substrate type: mound, mineral and natural) and in mountain forests (canopy coverage: open, dense, semi-dense). Different letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). Significance levels (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$ ).

producción y distancias cortas de diseminación (< 20 m y se concentró a  $\leq 5$  m del árbol semillero). Estos antecedentes son reforzados por el monitoreo a largo plazo (10 años) y, además en este periodo se evidenció que *P. uviferum* presenta una tendencia de alta producción de semillas de cada 7 años (> 200 semillas  $m^{-2}$ ), similar a otras coníferas como *Pinus lambertiana* Doug. (2 a 7 años) (Fowells y Schubert 1956). Una de las dificultades de este tipo de observaciones, es obtener medidas precisas de los patrones de dispersión, ya que los mecanismos son susceptibles a modificarse tanto por las condiciones bióticas y abióticas, como la variación en la velocidad, turbulencia y dirección del viento, cambiando en el tiempo y espacio (Bullock *et al.* 2003). A pesar de ello, un resultado elocuente de este estudio es que el patrón de dispersión de las semillas de *P. uviferum* no fue modificado por estas condiciones. Por lo tanto, en un mismo experimento del monitoreo de la producción de semillas, la interpretación de los resultados en un monitoreo a corto plazo fue fundamental para tener una aproximación de la distancia de recuperación natural de las poblaciones de *P. uviferum*, pero insuficiente para determinar las tendencias de producción de semillas, necesario para la implementación de acciones de restauración. Lo que demuestra la importancia de seguir evaluándolo en el tiempo, de manera de observar si esta tendencia es consistente a mayores escalas de tiempo y a más larga distancia a través de otros posibles agentes de dispersión, que podrían determinar la estructura genética o las tasas de expansión del rango (Nathan y Muller-Landau 2000).

La interpretación de los resultados del monitoreo a corto plazo (1 año) sobre la distancia efectiva del reclutamiento de plántulas de los árboles semilleros de *P. uviferum* (<5 m) reportados por Bannister *et al.* (2014) es la misma luego de 8 años. Este antecedente no fue suficiente para comprender el patrón de reclutamiento natural de la especie alrededor de los árboles semilleros, pero si fundamental para desarrollar nuevas interrogantes como qué factores de micrositio influyen el reclutamiento natural de plantas alrededor de los árboles semilleros, por tal razón, es que en un segundo monitoreo (luego de 8 años), se determinó monitorear otras posibles variables explicativas que favorezcan un enfoque de restauración adecuado para esta especie. De este modo, se observó que la regeneración natural se relacionó favorablemente con la presencia de musgos (*Sphagnum* spp.), como ha sido descrito en la dinámica natural de *P. uviferum* (Cruz y Lara 1981, Bannister *et al.* 2012, 2014), y en otras especies de la Familia Cupressaceae como *Libocedrus bidwillii* Hook. f. y *Fitzroya cupressoides* (Haase 1986, Parker y Donoso 1993). También se relacionó favorablemente con la presencia de cojines de *Donatia-Astelia*, sin embargo, el diámetro de las plántulas muestra una relación desfavorable, lo que podría indicar que los sitios seguros para germinación no son necesariamente favorables para la supervivencia y crecimiento de las plantas. Por otro lado, los árboles semilleros de mayor edad presentaron una mayor proporción de plántulas, lo

que probablemente se deba a un mayor número de eventos de abundante semillación. Finalmente, tanto la altura como el diámetro de las plántulas fue mayor en presencia de cobertura de matorral, lo que sugiere un efecto nodriza o facilitador para la regeneración natural, que coincide con *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.Serm. & Bizzarri, en que el establecimiento de la regeneración natural es favorecido por arbustos (Kitzberger *et al.* 2000).

La interpretación de los resultados del desempeño de las plantaciones de *P. uviferum* en el corto plazo (2 años) reportados por Bannister *et al.* (2013) muestra que la micro-topografía (sitios turbosos) y la disponibilidad de luz (sitios de mejor drenaje) no tuvieron efectos significativos en la sobrevivencia y crecimiento de la plantación. Sin embargo, los resultados del monitoreo a largo plazo (10 años) demuestran que la efectividad de la plantación (en términos de sobrevivencia y crecimiento) puede variar en el tiempo. En general, la especie presentó bajas tasas de crecimiento (incremento medio anual  $\sim 1,03$  mm  $año^{-1}$  en diámetro y  $\sim 2,94$  cm  $año^{-1}$  en altura), muy inferiores a otras especies establecidas en bosque templado del sur de Chile (Donoso *et al.* 2015).

En sitios turbosos, en general la sobrevivencia de la plantación se mantuvo los primeros cinco años sobre el 65 %. Sin embargo, luego de siete años, la sobrevivencia de la plantación en suelo natural y sustrato mineral bajó considerablemente, mientras que la plantación en sitios elevados se mantuvo alta (78 %) y mostró un mayor crecimiento en diámetro y altura de plantas, a pesar de que el incremento corriente anual en diámetro y altura fue variable y bajo en el periodo de estudio. Esto último contrasta con ensayos de restauración con otras especies en que hay un aumento constante del incremento en altura y diámetro de las plantas en el tiempo (Donoso *et al.* 2015, Soto *et al.* 2020). Si bien no se evaluaron los mecanismos que explican la mayor sobrevivencia de la plantación en sitios elevados, estas plantas estuvieron menos expuestas al anegamiento del suelo y, por ende, a un menor estrés fisiológico que se da en las plantas sumergidas en agua producto del daño al aparato fotosintético (Wang *et al.* 2016), lo que respalda la hipótesis de Bannister *et al.* (2013). Por lo tanto, la micro-topografía es un componente relevante al plantar bajo condiciones de drenaje restringido.

En los sitios de mejor drenaje, la sobrevivencia de la plantación en general fue alta en todos los tratamientos (> 90 %), especialmente bajo protección del dosel, lo que es consistente con los resultados demostrados por Bannister *et al.* (2013). Aun así, cabe señalar que, al quinto año, la sobrevivencia de la plantación en el sitio abierto disminuyó significativamente a un 81 %, manteniéndose hasta el décimo año, lo que podría ser explicado en parte por una baja presencia de hongos micorrízicos en sectores abiertos, sin los cuales el potencial de absorción de nutrientes es menor (Simard *et al.* 2012). Estos antecedentes nos confirman la persistencia de la especie para sobrevivir y crecer en condiciones de drenaje restringido y baja nutrición.

*Implicancias del monitoreo a corto y largo plazo en la restauración de P. uviferum.* En general, las acciones de restauración ecológica incluyen monitoreos de corto plazo (MMA 2020), y se asume que estos plazos son representativos, sin considerar características claves como el lento crecimiento de algunas especies. Nuestros resultados sugieren que las especies de lento crecimiento como *P. uviferum* requieren de periodos de tiempo más prologados para interpretar adecuadamente los resultados de ensayos de restauración pasiva y activa en bosques quemados. Se debe considerar que, en el caso de los bosques dominados por *P. uviferum* cuya distribución geográfica cubre sobre 1600 km de extensión de norte a sur, la variabilidad de condiciones de sitio es inmensa, por lo que se debe entender que la recuperación de este tipo de ecosistemas será muy variable a lo largo de su distribución y, por ende, los estudios de largo plazo deben considerar toda la distribución de los ecosistemas que se requieren restaurar. Esto es un gran desafío, especialmente en el contexto de cambio climático que enfrentan los ecosistemas en que crece *P. uviferum*, tal como se ha observado en la Isla de Chiloé, en que las precipitaciones han disminuido un 5 % por década entre los años 1960-2016 (Garreaud *et al.* 2013), y los modelos de simulación indican que estas tendencias continuarán (Boisier *et al.* 2018).

En este estudio, el monitorear ensayos por un periodo más prolongado (10 años) permitió demostrar que la disponibilidad abundante de semillas de *P. uviferum* está limitada a periodos de siete años, lo que se traduce en una falta de semillas y pérdida de oportunidades para la regeneración de la especie durante los periodos de baja producción de semillas. La falta de un abastecimiento constante de semillas sugiere que se debe recolectar y almacenar suficientes semillas durante los años de buena producción de semillas o desarrollar alternativas de reproducción vegetativa, que resultan fundamental en la gestión de los programas de restauración activa para esta especie. Por otra parte, a diferencia de otras especies longevas y de lento crecimiento como *F. cupressoides*, en que el mayor porcentaje de mortalidad de la plantación se produjo durante el primer año de crecimiento (Donoso *et al.* 2000), la mortalidad en plantaciones de *P. uviferum* aumentó considerablemente a partir del séptimo año en sitios turbosos y del quinto año en sitios de mejor drenaje, especialmente en los tratamientos más desfavorables. El tomar decisiones basándose en monitoreos a corto plazo posiblemente hubiera llevado a conclusiones erróneas como que la micro-topografía no es un factor relevante al momento de plantar *P. uviferum* en bosques turbosos quemados, por el alto costo monetario, tiempo y de gestión que se necesita para generar camellones (Bannister *et al.* 2013).

Estos antecedentes son importantes para los encargados de desarrollar programas de restauración en la práctica, ya que, si apoyan sus decisiones en los resultados de monitoreos de corto plazo, pueden aplicar técnicas de restauración de forma errada, llevando muchas veces a

un fracaso de la restauración, lo que representa grandes esfuerzos económicos, logísticos y de mano de obra, entre otros. Además, sin un reconocimiento explícito de los múltiples valores proporcionados por los estudios ecológicos a largo plazo, los administradores de recursos y los encargados de formular políticas podrían pasar por alto importantes descubrimientos que apoyen la restauración ecológica (Díaz-Delgado 2016), y será difícil lograr una política y gestión ambiental basada en evidencia científica (Harris *et al.* 2006).

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la administración de Parque Tantauco por su apoyo logístico por más de 10 años en esta investigación. Esta es una contribución al programa de investigación de restauración de ecosistemas forestales nativos del Instituto Forestal. Se agradece el financiamiento de una beca DAAD-CONICYT de doctorado, de los proyectos CONICYT-PAI Folio N°821320007 y FONDECYT de Iniciación N°11160191 y del Ministerio de Agricultura (MINAGRI).

## REFERENCIAS

- Bannister JR, PJ Donoso, J Búhos. 2012. Persistence of the slow growing conifer *Pilgerodendron uviferum* in old-growth and fire-disturbed southern bog forests. *Ecosystems* 15: 1158–1172. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9574-7>
- Bannister, JR, R Coopman, P Donoso, J Bauhus. 2013. The importance of microtopography and nurse canopy for successful restoration planting of the slow-growing conifer *Pilgerodendron uviferum*. *Forests* 4(1): 85-103. DOI: [10.3390/f4010085](https://doi.org/10.3390/f4010085)
- Bannister JR, S Wagner, P Donoso, J Bauhus. 2014. The importance of seed trees in the dioecious conifer *Pilgerodendron uviferum* for passive restoration of fire disturbed southern bog forests. *Austral Ecology* 39(2): 204- 213. DOI: [10.1111/aec.12060](https://doi.org/10.1111/aec.12060)
- Bannister JR, G Travieso, N Galindo, M Acevedo, K Puettmann, C Salas-Eljatib. 2020. Shrub influences on seedlings performance when restoring the slow-growing conifer *Pilgerodendron uviferum* in fire-disturbed southern bog forests. *Restoration Ecology* 28(2): 396-407. DOI: [10.1111/rec.13090](https://doi.org/10.1111/rec.13090)
- Brancalion P, RA Viani, M Calmon, H Carrasco, R Rodrigues. 2013. How to Organize a Large-Scale Ecological Restoration Program? The Framework Developed by the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. *Journal of Sustainable Forestry* 32(7): 728-744. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817339>
- Bullock J, I Moy, S Coulson, R Clarke. 2003. Habitat-Specific Dispersal: Environmental Effects on the Mechanisms and Patterns of Seed Movement in a Grassland Herb *Rhynanthus minor*. *Ecography* 26(5): 692-704.
- Boisier JP, C Álvarez-Garretón., RR Cordero, A Damiani, L Gallardo, R Garreaud *et al.* 2018. Anthropogenic drying in Central-Southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations. *Science of the Anthropocene* 6: 74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>

- Calmon M, P Brancalion, A Paese, J Aronson, P Castro, S Costa Da Silva, RR Rodrigues. 2011. Emerging threats and opportunities for biodiversity conservation and ecological restoration in the Atlantic Forest of Brazil. *Restoration Ecology* 19(2): 154–158. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2011.00772.x>
- Cruz, G, A Lara. 1981. Tipificación, cambio de estructura y normas de manejo para Ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendron uviferum* D. Don Florin) en la isla Grande de Chiloé. Tesis Ingeniero Forestal, Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias, Universidad de Chile. 215 p.
- Escobar B, C Donoso, A Zuñiga. 2013. *Eucryphia cordifolia* Cav. In Donoso C ed. Especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cúneo Ediciones. p. 247-261.
- Di Castri F, E Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. Santiago, Chile. Universidad Católica de Chile. 163 p.
- Díaz-Delgado R. 2016. La investigación y seguimiento ecológico a largo plazo (LTER). *Ecosistemas* 25(1): 01-03. DOI: [10.7818/ECOS.2016.25-1.01](https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.01)
- Donoso C, B Escobar, H Castro, A Zuñiga, R Grez. 2000. Sobrevivencia y crecimiento de alerce (*Fitzroya cupressoides* Mol. (Johnston)) en plantaciones experimentales en la Cordillera de la Costa de Valdivia. *Bosque* 21(1): 13-24. DOI: [10.4206/bosque.2000.v21n1-02](https://doi.org/10.4206/bosque.2000.v21n1-02)
- Donoso C, B Escobar, F Medel. 2013. *Gevuina avellana* Mol. In Donoso, C ed. Especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cúneo Ediciones. p. 265-276.
- Donoso C, M Núñez, P Donoso, B Escobar. 2013. *Aextoxicon punctatum* R.et PAV. In Donoso C ed. Especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cúneo Ediciones. p. 135-147.
- Donoso P, D Soto, C Fuentes. 2015. Differential growth rates through the seedling and sapling stages of two *Nothofagus* species underplanted at low-light environments in an Andean high-graded forest. *New Forest* 46: 885–895. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9480-x>
- Doyle M, C Drew. 2008. Large-Scale Ecosystem Restoration: Five Case Studies from the United States. The Science and Practice of Ecological Restoration Series. United States. Island Press. 344 p.
- Fowells, Schubert. 1956. Seed Crops of Forest Trees in the Pine Region of California. United States Department of Agriculture. 48 p. (Technical Bulletin N°1150).
- Gann GD, T McDonald, B Walder, J Aronson, CR Nelson, J Jonson, et al. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27: S1-S46. DOI: [10.1111/rec.13035](https://doi.org/10.1111/rec.13035)
- Garreaud R, P López, M Minvielle, M Rojas. 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate* 26: 215–230. DOI: [10.1175/JCLI-D-12-00001.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1)
- Haase P. 1986. A study of a *Libocedrus bidwillii* population at pegg flat, arthur's pass, New Zealand. *New Zealand Journal of Ecology* 9: 153-156.
- Harris J, R Hobbs, E Higgs, J Aronson. 2006. Ecological Restoration and Global Climate Change. *Restoration Ecology* 14 (2): 170–176. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00136.x>
- Holz A, TT Veblen. 2009. *Pilgerodendron uviferum*: The Southernmost Tree-Ring Fire Recorder Species. *Ecoscience* 16: 322–29. DOI: [10.2980/16-3-3262](https://doi.org/10.2980/16-3-3262)
- INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CL). 2020. Red agrometeorológica de INIA. Consultado 10 jul. 2020. Disponible en <https://agrometeorologia.cl/>
- Kitzberger T, D Steinaker, T Veblen. 2000. Effects of Climatic Variability on Facilitation of Tree Establishment in Northern Patagonia. *Ecology* 81(7): 1914-1924. DOI: [10.2307/177281](https://doi.org/10.2307/177281)
- Lara A, C Echeverría, O Thiers, E Huss, B Escobar, K Tripp, C Zamorano, A Altamirano. 2008. Restauración ecológica de coníferas longevas: el caso del alerce (*Fitzroya cupressoides*) en el sur de Chile. In González-Espinosa M, JM Rey-Benayas, N Ramírez-Marcial eds. Restauración de bosques en América Latina. México. p. 39-56.
- Lara A, JR Bannister, C Donoso, A Rovere, D Soto, B Escobar, A Premoli. 2013. *Pilgerodendron uviferum* (D. Don) Florin. In Donoso C ed. Especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cúneo Ediciones. p. 82-92.
- Lara A, C Little, M Cortés, E Cruz, M González, C Echeverría, J Suárez, A Bahamondez, R Coopman. 2014. Restauración de Ecosistemas Forestales. In Donoso C, M González, A Lara eds. Ecología Forestal bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile. Valdivia, Chile. Ediciones Universidad Austral de Chile. p. 605-672.
- Lindermayer DB, GE Likens, A Andersen, D Bowman, CM Bull, E Burns, et al. 2012. Value of long-term ecological studies. *Austral Ecology* 37:745–57. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02351.x>
- Luzio W, O Seguel, M Casanova. 2010. Suelos de la zona mediterránea húmeda. In Luzio W ed. Suelos de Chile. Santiago, Chile. Universidad de Chile. p.195-239.
- MMA (Ministerio del medio Ambiente, CL). 2020. Registro Nacional de Restauración Ecológica y Acciones de Recuperación. Santiago. Chile. Consultado 30 jul. 2020. Disponible en <https://restauracionecologica.mma.gob.cl/>
- Minore D, RJ Laacke.1992. Natural regeneration. In SD Hobbs, SD Tesch, PW Owston eds. Reforestation practices in southwestern Oregon and northern California. Corvallis. Forest Research Laboratory. Oregon State University. p. 258-283.
- Montaldo P. 1999. Treinta y cuatro años de una sucesión secundaria en praderas de ñadi en la provincia de Valdivia, Chile. *Agro sur* 27(2): 82-89.
- Moreno-Mateos D, A Alberd, E Morriën, W Van der Putten, A Rodríguez-Uña, D Montoya. 2020. The long-term restoration of ecosystem complexity. *Nature Ecology & Evolution* 4, 676–685. DOI: [10.1038/s41559-020-1154-1](https://doi.org/10.1038/s41559-020-1154-1)
- Montalvo A., S Williams, KJ Rice, SL Buchmann, C Cory, SN Handel, GP Nabhan, R Primack, RH BRobichaux. 2008. Restoration Biology: A Population Biology Perspective. *Restoration Ecology* 5(4): 277–290. DOI: [10.1046/j.1526-100X.1997.00542.x](https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00542.x)
- Nathan R, H Muller-Landau. 2000. Spatial Patterns of Seed Dispersal, Their Determinants and Consequences for Recruitment. *Trends in Ecology & Evolution* 15(7): 278–285. DOI: [10.1016/S0169-5347\(00\)01874-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01874-7)
- Newton A, A Watson. 2005. Restoring Temperate Forests. In Mansourian S, D Vallauri, N Dudley eds. Forest Restoration in Landscapes. New York, USA. Springer. p. 320-328.
- Parker T, C Donoso. 1993. Natural regeneration of *Fitzroya cupressoides* in Chile and Argentina. *Forest Ecology and*



- Management* 59: 63–85. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90071-T](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90071-T)
- Ramírez C, C San Martín, O Vidal, Y Pérez, J Valenzuela, JL Solís, G Toledo. 2014. Tundra Subantártica en la Isla Grande de Chiloé, Chile: Flora y vegetación turbosa de campañas. *Anales del Instituto de la Patagonia* 42(2): 17-37. DOI: [10.4067/S0718-686X2014000200002](https://doi.org/10.4067/S0718-686X2014000200002)
- R Development Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Asutria.
- Sigmaplot. 2016. Systat Software, San Jose, CA: Version 14.0
- Simard SW, KJ Beiler, MA Bingham, JR Deslippe, LJ Philip, FP Teste. 2012. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. *Fungal Biology Reviews* 26(1): 39–60. DOI: [10.1016/j.fbr.2012.01.001](https://doi.org/10.1016/j.fbr.2012.01.001)
- Smith-Ramírez C, M González, C Echeverría, A Lara. 2015. Estado actual de la restauración ecológica en Chile, perspectivas y desafíos. *Anales del Instituto de la Patagonia* 43(1): 11-21. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100002>
- Sokal R, FJ Rohlf. 1995. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. 714 W.H. Freeman and Company.
- Soto DP, PJ Donoso, A Vásquez-Grandón, M González-Chang, C Salas-Eljatib. 2020. Differential early performance of two underplanted hardwood tree species following restoration treatments in high-graded temperate rainforests. *Forests* 11: 401. <https://doi.org/10.3390/f11040401>
- Souto C, A Premoli, M Gardner. 2013. *Pilgerodendron uviferum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013:e.T32052A2809552. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20131.RLTS.T32052A2809552>.
- Stanturf J, S Mansourian, M Kleine. 2017. Implementing Forest Landscape Restoration, a Practitioner’s guide. Vienna, Austria. International Union of Forest Research Organizations. 128 p.
- UNEP-WCMC (Comps.) 2020. Checklist of CITES species – CITES Identification Manual. CITES Secretariat, Geneva, Switzerland, and UNEPWCMC, Cambridge, United Kingdom. Accessed on 17/05/2021
- Vallauri DR, J Aronson, M Barbero. 2002. An Analysis of Forest Restoration 120 Years after Reforestation on Badlands in the Southwestern Alps. *Restoration Ecology* 10: 16-26. DOI: [10.1046/j.1526-100X.2002.10102.x](https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.10102.x)
- Villagrán C.1988. Late quaternary vegetation of southern Isla Grande de Chiloé, Chile. *Quaternary Research* 29: 294–306. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90037-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90037-3)
- Wang C, C Li, H Wei, Y Xie, W Han. 2016. Effects of Long-Term Periodic Submergence on Photosynthesis and Growth of *Taxodium distichum* and *Taxodium ascendens* Saplings in the Hydro-Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir of China. *PloS One* 11(9): e0162867. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162867>

Recibido: 14/12/20  
Aceptado: 20/06/21



