



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Migración Asistida de *Araucaria araucana*, un estudio de caso en Chile

IPINZA CARMONA, R.¹, GONZALEZ CAMPOS, J.², MOLINA BRAND, M.², GUTIÉRREZ CARO, B.², SOTO GUEVARA, H.², KOCH ZUÑIGA, L.², HASBÚN ZAROR, R.³, SANTIBÁÑEZ QUEZADA, F.⁴, SAAVEDRA PAILLAO, L.⁴, MAGNI DÍAZ, C.⁴ y CELHAY SCHOELERMANN, J.⁵

1 Instituto Forestal (INFOR), Chile, Sede Valdivia.

2 Instituto Forestal, Chile, Sede Biobío.

3 Universidad de Concepción.

4 Universidad de Chile, Antumapu, Santiago.

5 CMPC, Los Ángeles.

Resumen

La *Araucaria araucana* es una especie emblemática de los bosques de Chile y Argentina. En estos últimos años esta especie está siendo sometida a una fuerte presión de selección debida al cambio climático, el que ha predisputado al daño foliar de la araucaria (DFA), enfermedad que está comprometiendo el 85% de las poblaciones chilenas, lo que ha cambiado su estado de conservación de vulnerable a en vías de extinción, en especial las procedencias de la cordillera de la costa. Dado este escenario se está ejecutando un programa de migración asistida de esta especie, para lo que se han seleccionado 450 madres a lo largo de su distribución natural, se han recogido semillas que se han viverizado manteniendo la estructura familiar. Mediante proyecciones climáticas para los próximos 50 y 70 años, se han seleccionado áreas de acogida, tanto fuera como dentro de la distribución natural. Se ha plantado a la fecha un total de 5 ensayos de progenie y procedencia. De las 450 familias se seleccionaron aproximadamente 100 para análisis genómico. La migración asistida permitirá que se exprese la variación genética adaptativa y de esta forma salvaguardar el potencial evolutivo de esta especie.

Palabras clave

Araucaria araucana, migración asistida, conservación.

1. Introducción

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, en el artículo 1, define el cambio climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMCC diferencia así entre el cambio climático atribuible a fenómenos naturales y el que es alterado por las actividades humanas (IPCC, 2014).

Existe un temprano consenso científico sobre el papel del clima en la dirección de los patrones de distribución espacial y productividad de las plantas (WOODWARD 1987). Las variables climáticas, se relacionan con los rangos geográficos y ecológicos de distribución de las plantas, de acuerdo a las restricciones fisiológicas que éstas presentan y determinan la supervivencia y productividad de sus poblaciones en un determinado lugar (VILLAGRÁN Y HINOJOSA 1997; HARRISON et al., 2020). Sin embargo, lo alarmante, es la tasa de cambios del clima durante las últimas décadas, ha sido muy superior al ritmo de los siglos anteriores. Una variable clave como la temperatura media global, ha presentado un aumento sobre un 1°C durante el último siglo (IPCC 2014). Los modelos de cambio climático global sugieren que la temperatura subiría en el orden de los 2°C en la zona sur, incluso algo más en zonas montañosas de altura. Un cambio de esta magnitud puede ser bioclimáticamente significativo para muchas especies, considerando que en los últimos 10.000 años la temperatura no

ha variado más que algunas décimas de grado. Se suma a este cambio, un cambio de régimen de lluvia que está haciendo más secos y prolongados los veranos, lo que puede generar un efecto potenciador entre el estrés térmico y el hídrico a que estarían quedando sometidas las especies (HARRISON et al., 2020).

Si la tasa de cambios en el clima excede el ritmo de respuesta fisiológica de las especies, en especial la capacidad de las poblaciones de migrar o adaptarse, se puede esperar un profundo impacto adverso en la distribución de las especies, tanto la composición y estructuras de comunidades y así como en los procesos y funciones ecosistémicas asociados a estas especies (ACKERLY et al., 2010).

En el caso particular de Chile, se prevén cambios significativos en las décadas que vienen. El alza que ha venido teniendo la temperatura, parece haberse acelerado a partir de los años 80 y, particularmente, a partir de los años 2000 (<https://www.cr2.cl/>). La velocidad que podrían estar tomando estos cambios es infinitamente superior a la velocidad con que las especies podrían reaccionar para generar una respuesta evolutiva en el corto plazo a estas nuevas condiciones bioclimáticas, sin precedentes.

El cambio climático está afectando a muchas especies forestales en Chile y sobresale el caso de *Araucaria araucana*. Debido a que, a partir del año 2015, profesionales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) comenzaron a detectar la muerte de ramas cuyos síntomas más evidentes era el surgimiento de cancros en ramas y tallos, los cuales producían una exudación abundante de resina e incluso de ejemplares completos de todas las edades dentro del 90% de las poblaciones naturales de la especie (BALOCCHI et al., 2021.), a este fenómeno se le llama Daño Foliar de Araucaria o DFA. Cómo una respuesta inmediata se impulsó la generación de una mesa técnica compuesta por doce organismos públicos, privados y académicos para aunar esfuerzos de investigación en torno a la sintomatología que afectaba a esta icónica especie de bosque nativo de Chile.

Dentro del abanico de iniciativas que surgieron en dicha mesa técnica, y precisamente atendiendo a la posibilidad de sufrir una pérdida irreparable del acervo genético de la especie debido a la mortalidad generada por el DFA, el Instituto Forestal (INFOR) determinó como prioritario iniciar acciones de conservación genética. Lo que se concretó a través de un proyecto GEF apoyado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente, con financiamiento de este proyecto denominado Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (SIMEF) y con apoyo de la empresa privada a través de CMPC, se determinó aplicar el concepto de Migración Asistida,

En este sentido la estrategia de Migración Asistida de Araucaria, establecida operacionalmente por IPINZA (2018), pretende salvaguardar el potencial evolutivo de la especie ante la presión del cambio climático. Para ello basándose una colección de germoplasma que capture la máxima diversidad genética de la especie, y posterior establecimiento de ensayos de progenies y procedencias, localizados dentro y fuera del área de distribución natural de la especie en Chile, para que de esta forma la variación genética adaptativa de variables tales como la supervivencia y rasgos de crecimiento, entre otras, se expresen y así poder seleccionar y utilizar el germoplasma de las Araucarias sobreviviente de estos ensayos para restaurar y/o rehabilitar áreas afectadas por el cambio climático. Esta iniciativa busca un doble objetivo, por una parte, realizar un rescate de material genético que pudiera perderse debido al efecto del daño foliar en la distribución natural de la especie, y por otra parte establecer las bases de una población que permita efectuar en el futuro iniciativas de restauración con el material genético rescatado (Figura 1).

Como la mayoría de las especies leñosas, Araucaria tiene una capacidad de dispersión relativamente limitada y la presión del cambio climático sobrepasa sus capacidades normales de dispersión. No es sorprendente en consecuencia que la idea de una migración asistida aparezca como una solución lógica y eficaz al problema de la adaptación o, más propiamente, de la falta de adaptación de los

árboles al cambio climático (AITKEN *et al.*, 2008). Adicionalmente, durante el 2018 – 2019 no habiendo certeza aún de las causas de DFA, ni de herramientas de prevención y menos aún de control, la Migración Asistida fue utilizada como un principio precautorio preciso para la conservación de esta significativa especie no solo a nivel nacional sino mundial (IPINZA 2018).

En el presente documento se describe el plan o procedimiento operativo para la Migración Asistida de *Araucaria araucana*, siendo una de las primeras iniciativas de conservación de un recurso genético forestal a gran escala en Chile.

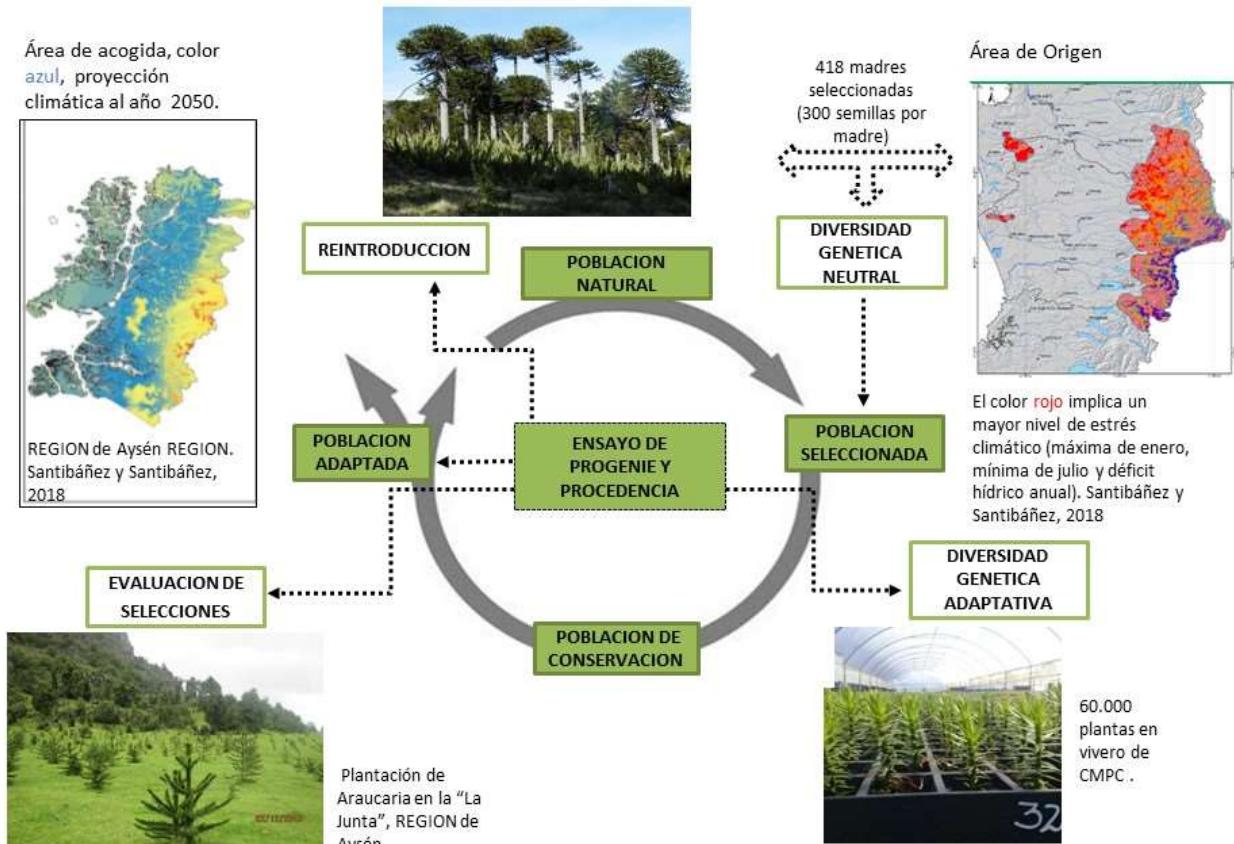


Figura 1. Modelo de migración asistida de *Araucaria araucana* propuesto por IPINZA (2018).

2. Objetivos

Salvaguardar el potencial adaptativo de *Araucaria araucana*, ante la presión de selección del cambio climático mediante la aplicación de la estrategia de conservación, Migración Asistida.

3. Metodología

Estudio bioclimático

Para establecer el perfil bioclimático de la especie se superpuso la distribución geográfica de la especie (según el catastro de vegetación nativa de Chile) con una malla climática constituida de puntos de 1 km², en un Sistema de Información Geográfico (SIG). Cada uno de los puntos de esta malla se vincula a una base de datos donde se encuentra el valor de las variables climáticas; Calidez del verano (temperatura máxima del mes más cálido, enero), Rigor del invierno (temperatura mínima del mes más frío, julio) y Grado de aridez (déficit hídrico anual); se proyecta de acuerdo con

estándares del IPCC, y se conforma un índice de estrés integral para el 2050 y 2070 (Santibáñez y Santibáñez, 2018).

A partir de la superposición de la distribución geográfica y la malla climática, se construyó un histograma de frecuencias de la presencia de la especie frente a intervalos de las variables climáticas. El supuesto básico es que la frecuencia más alta ocurre en los intervalos donde la variable climática es más favorable, lo que implica menores niveles de estrés. Contrariamente, el intervalo máximo de distribución queda definido por las presencias de las especies en los menores y mayores valores de la variable analizada. Se supone que no hay individuos viviendo fuera de este intervalo máximo. Este análisis se repite para cada una de las variables climáticas, de modo que se obtienen 3 histogramas independientes, los que delimitan los rangos bioclimáticos tolerados por la especie (Santibáñez y Santibáñez, 2018).

Muestreo con consideraciones genéticas

En forma preliminar se utilizó como base la estructura genética reportada por MARTÍN *et al.* (2014), quienes, utilizando 271 árboles desde 12 poblaciones naturales y aplicando 8 marcadores genéticos tipo microsatélites (SSR) e inferencia bayesiana, obtuvieron una estructura compuesta por 5 clúster genéticos, distribuidos en 2 clúster en la distribución costera y 3 clúster en la distribución andina.

En la temporada verano-otoño del año 2018 se colectaron 200 semillas de un total de 418 árboles madre de *Araucaria araucana*, a partir de 12 poblaciones naturales de Chile representativas de los 5 estratos reportados. Además, se realizó un enriquecimiento en el muestreo de las poblaciones costeras en la temporada verano 2019, donde se colectaron 200 semillas de un total 40 árboles madre, a consecuencia de que los resultados del estudio bioclimatológico sostienen que los mayores niveles de estrés estarían afectando a las poblaciones situadas en la Cordillera de Nahuelbuta. Donde los registros climatológicos existentes, estiman que estas serían las poblaciones que han soportado la mayor alza en la temperatura y/o la mayor variación en la pluviometría en los últimos 100 años (MOLINA *et al.*, 2021)

Evaluación de parámetros morfológicos de semillas y plantas

Las semillas colectadas fueron trasladadas al Laboratorio de Semillas Forestales de INFOR, Sede Biobío y fueron almacenadas en cámara de frío a 4°C hasta su análisis, donde se midieron parámetros morfológicos y fisiológico de la semilla de cada una de las familias colectadas. (GONZÁLEZ Y KOCH 2021). Utilizando un pie de metro digital, se registraron los valores para los parámetros morfológicos promedio de 10 semillas por familia; Largo (LS), Ancho, para esta variable dada la forma oblonga a cuneiforme, se consideró el ancho medio (ASM) y ancho base de la semilla (ASB). El valor para la variable Peso (PS), y Número de semillas por kilo. Una vez viverizadas las plantas también serán evaluadas mediante parámetros morfológicos, utilizando 10 individuos de cada familia de la colección, principalmente se colectarán los parámetros de altura y arquitectura de la planta, así como la supervivencia a 1 temporada (SAAVEDRA 2021).

Previo a la elección del test estadístico (paramétrico o no paramétrico) para cada parámetro evaluado, se probaron los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad, usando las pruebas de Levene y Kolmogorov Smirnov respectivamente, ambos con un $\alpha = 0.05$.

Evaluación diversidad genética neutral:

La validación de la diversidad genética neutral de la colección muestreada fue estimada utilizando una muestra de 89 individuos, seleccionados según la distancia geográfica de las madres en terreno, a fin de minimizar el parentesco se utilizó un criterio del vecino más lejano dentro de cada población. Se emplearon marcadores moleculares tipo Polimorfismo de nucleótido único (SNP), utilizando un genotipado por secuenciación (ELSHIRE *et al.*, 2011). Este estudio se realizó colaborativamente con el Laboratorio de Epigenética Vegetal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Chile. La secuenciación se realizó mediante la prestación de servicios del Centro de Biotecnología de la Universidad de Wisconsin – Madison, Estados Unidos.

Se calculó la diversidad genética usando los índices de Heterocigocidad (H_e) y Coeficiente de Endogamia (G/S), un Análisis de Varianza Molecular (AMOVA) usando un modelo de alelos infinitos basados en FST y significancia estimada a partir de 499 permutaciones, y análisis de agrupamiento fue realizado para estimar el número de clúster genéticos para las progenies de poblaciones de *Araucaria araucana*. Este análisis se realizó a través de dos métodos a) Análisis Discriminante de Componentes Principales (ADCP) y b) agrupamiento *K-means*, el cual usa un Criterio de Información Bayesiano (BIC, calculado usando la suma de cuadrados en lugar de verosimilitudes).

Viverización:

Sobre la base de un convenio de colaboración firmado entre INFOR y la empresa FORESTAL MININCO (CMPC), la siembra de la colección de semillas y la producción de plantas se realizó en el vivero Carlos Douglas perteneciente a dicha empresa, localizado en la ciudad de Yumbel, Región del Biobío, Chile. La siembra se realizó en contenedores de 110 cc de capacidad con corteza de pino compostada como sustrato, utilizando los esquemas operacionales de riego, fertilización y manejos culturales de las plantas del vivero. Durante la viverización, se registró y analizó la emergencia de plántulas (GUTIÉRREZ 2021).

Establecimiento de ensayos genéticos en lugares de acogida y no acogida:

Basados en los mapas generados en el estudio bioclimatológico, la selección de sitios para el establecimiento de ensayos se realizó considerando las áreas de acogida proyectadas para la especie. Estas áreas, también denominadas azules, pueden estar dentro o fuera del área de distribución geográfica actual de Araucaria, y consideran áreas con un mínimo nivel (0 – 0.20) de estrés integral (SANTIBÁÑEZ Y SANTIBÁÑEZ 2018). Como elemento de comparación para determinar la interacción genotipo- ambiente también se consideraron áreas con un índice integral ≥ 21 para el establecimiento de ensayos. Se realizaron visitas técnicas en cada sitio candidato para revisar la superficie efectiva para el establecimiento de ensayos genéticos, una vez seleccionado el sitio, se procedió a marcar la superficie del ensayo.

Establecimiento de ensayos genéticos:

Los diseños de los ensayos corresponden en su mayoría a bloques incompletos, plantando un árbol por parcela (Single Tree Plot = STP), la elección de este diseño se basa en que para la colección existente, se requiere evaluar muchas progenies o tratamientos, y en caso de utilizar bloques completos se harían extremadamente grandes y por lo tanto el sitio dentro de cada bloque sería muy heterogéneo. El diseño de bloques incompletos balanceados, permite una configuración donde todas las comparaciones de las progenies se presentan un mismo número de veces en un bloque.

Para cada ensayo genético, se realizó una habilitación de terreno, involucrando corta de arbustos menores y/o roce de maleza. Posteriormente se confeccionaron casillas de 40 cm de diámetro x 40 cm de profundidad a un espaciamiento de 5x5 m, utilizando una pala plantadora tipo neozelandesa. Las plantas con un orden preasignado dentro de cada ensayo fueron establecidas sobre las casillas, siguiendo el croquis del ensayo, cada planta fue fertilizada directamente en la casilla utilizando 15 g de Basacote ® granular de 9 M (Compo Expert). Adicionalmente, se suplementó con 30 g de Boronato Calcita, para sustituir la baja proporción de Boro propia de los suelos de la Cordillera de Nahuelbuta, este se aplicó una vez plantado a 30 cm del cuello de cada planta.

Adicionalmente previo a la plantación las raíces de las plantas fueron sumergidas en una solución del fungicida de amplio espectro Ridomil Gold ® (Syngenta) a una concentración 460 mg/L, siguiendo el esquema para *Pino radiata* propuesto por REGLINSKI et al. (2008).

Se planificó un programa de medición para los ensayos, contemplando una medición inicial al primer año de plantación, cuyo objetivo será estimar la interacción genotipo - ambiente de las variables supervivencia y altura inicial, que son caracteres de alto valor adaptativo, el procedimiento de análisis se realiza de acuerdo con las sugerencias de GILMOUR et al. (1999).

4. Resultados

Estudio bioclimático

La proyección climática dentro y fuera del área de distribución natural de la especie indica que el sur de Chile, fuera del área de distribución, dispondrá de numerosas áreas de altura en la Cordillera de Los Andes, con índices mínimos de estrés integral, las cuales servirán como áreas de acogida o áreas azules. Estas van bajando en altitud a medida que se avanza hacia el sur, de modo que, en Chiloé continental, las posibles zonas de acogida han descendido hasta los 1500 metros. Más al sur, en la Región de Aysén esta tendencia descendente se mantiene, cayendo claramente por debajo de los 1000 metros. Esta región presenta fuertes gradientes climáticos longitudinales, estos gradientes expresan un grado creciente de continentalidad de un litoral con fuertes rasgos marítimos hasta un sector oriental fuertemente continental. El análisis muestra que el sector intermedio del territorio, en la parte continental mantendría niveles aceptables de estrés, razón que permite mirar a estas zonas como posibles áreas de acogida. Globalmente en estas áreas, las condiciones climáticas se mantendrían en rangos similares a lo que es en la actualidad el área de distribución de la *Araucaria araucana*.

Evaluación de parámetros morfológicos de semillas y plantas

La media, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros morfológicos evaluados en las semillas y plantas se muestran en la Tabla 1 y 2, respectivamente. Letras distintas indican diferencias significativas usando un $\alpha = 0.05$.

Tabla 1. Resumen Análisis de Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos de las semillas de *Araucaria araucana*, se muestra la media ± desviación estándar, las letras indican diferencias significativas utilizando el test de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se muestra μ (media poblacional) ± desviación estándar poblacional y Coeficiente de variación (CV%).

Poblaciones	Largo de Semillas (cm)	Ancho Medio Semillas (mm)	Ancho Basal de Semillas (mm)	Peso de Semillas (g)	N° de Semillas por Kilo**
Villa Las Araucarias	3,61 ± 0,29c	1,24 ± 0,08c	1,35 ± 0,12abc	3.49 ± 0,53 d	285
PN Nahuelbuta	4,11 ± 0,36a	1,33 ± 0,10a	1,36 ± 0,11ab	3.95 ± 0,64 bc	256,41
RN Ralco	3,83 ± 0,35bc	1,22 ± 0,11c	1,30 ± 0,13cb	3.53 ± 0,62 d	276
RN Las Nalcas	3,99 ± 0,26ab	1,26 ± 0,08bc	1,30 ± 0,09cde	4.21 ± 0,68 ab	227,50
Lonquimay	3,60 ± 0,41c	1,24 ± 0,08bc	1,24 ± 0,07de	3.59 ± 0,68 cd	292
RN Malalcahuuello	3,80 ± 0,40bc	1,21 ± 0,10c	1,27 ± 0,12cde	3.60 ± 0,72 cd	275,75
RN Huerquehue	3,94 ± 0,19ab	1,23 ± 0,09bc	1,24 ± 0,07de	4.06 ± 0,54 abc	259
PN Conguillio	3,92 ± 0,43ab	1,25 ± 0,11bc	1,30 ± 0,19bcd	4.00 ± 0,89 abc	260,50
PN Villarica	4,08 ± 0,40a	1,30 ± 0,09ab	1,39 ± 0,09a	4.39 ± 0,63 a	239
Cruzaco	3,76 ± 0,17bc	1,23 ± 0,09bc	1,21 ± 0,07e	3.83 ± 0,63 bcd	254
Icalma	3,76 ± 0,26bc	1,26 ± 0,08abc	1,21 ± 0,08e	3.90 ± 0,69 bcd	249
Marimenuco	3,75 ± 0,36bc	1,25 ± 0,10bc	1,21 ± 0,09de	3.82 ± 0,45 bcd	274
$\mu \pm$ desviación estándar	3,90 ± 0,36	1,26 ± 0,10	1,29 ± 0,12	3,87 ± 0,71	Med: 257 *
CV (%)	9,36%	8,28%	9,31%	18,44%	26%

(*) Calculado sobre la mediana; (**) Test no paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha = 0.05$).

Tabla 2. Resumen Análisis de Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos de las plantas de *Araucaria araucana*, se muestra la media ± desviación estándar, las letras indican diferencias significativas utilizando pruebas de comparaciones múltiples de medias Bonferroni ($\alpha =0.05$).

Poblaciones	Altura total (cm)	Altura hasta el verticilo (cm)	Presencia de ramas (%)	Largo de rama (cm)	Largo total (cm)	Supervivencia (%)**
PN Nahuelbuta	14,8 ±0,3abc	11 ±0,5a	95b	4,9 ±0,3c	22,4 ±0,6a	83,7 ±2,8ab
Villas Las Araucarias	15,6 ±0,3a	12,6 ±0,7b	78a	5,1 ±0,3c	22,7 ±0,8a	86,9 ±2,5abc
RN Ralco	14,1 ±0,1bcd	11,9 ±0,4ab	31abc	4,0 ±0,2a	16,2 ±0,3b	93,9 ±0,8c
RN Las Nalcas	13,6 ±0,2bd	11,7 ±0,5ab	38abc	4,5 ±0,2ab	16,9 ±0,5b	90,54 ±2,04ac
Lonquimay	13,1 ±0,39bcde	10,15 ±0,70ab	10ab	4,6 ±0,31a	14 ±0,67b	88,88 ±3,75abc
RN Malalcahuello	13,85 ±0,22bcd	11,9 ±0,53ab	40abc	4,2 ±0,26ab	16,7 ±0,52b	90,56 ±1,65abc
PN Conguillio	13,81 ±0,26bcd	11,8 ±0,53ab	33abc	4,1 ±0,20a	16,1 ±0,45b	90,48 ±1,41abc
Marimenuco	13,22 ±0,36bcde	10,07 ±1,16a	70abc	5 ±0,5bc	18,8 ±1,2ab	88,02 ±3,75abc
Cruzaco	14,98 ±0,35ac	11,7 ±0,86ab	44abc	4 ±0,4ab	17,6 ±0,6b	87,90 ±2,77abc
Icalma	13,24 ±0,18d	10,6 ±0,54a	42abc	4,27 ±0,2ab	16,5 ±0,4b	88,18 ±1,92ab
PN Huerquehue	13,19 ±0,23de	10,8 ±0,61a	40abc	4,8 ±0,3ab	16,8 ±0,6b	91,27 ±1,44abc
PN Villarrica	12,16 ±0,21e	10,5 ±0,50a	38abc	4,3 ±0,2ab	15,3 ±0,5b	83,63 ±1,66b
$\mu \pm$ desviación estándar	13.8 ±0.25	11.22 ±0.67	46.5	4.48 ±0.28	17.5 ±0.60	88.66 ±2.20

(**) Test no

paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha =0.05$).

Evaluación diversidad genética neutral:

La diversidad genética de la colección total fue $H_o = 0,15$. Y el coeficiente de endogamia, $Gis = 0,55$. Las poblaciones de la costa presentaron un $H_o = 0,34$ y $GIS = 0,58$, mientras que las poblaciones andinas presentaron un $H_o = 0,331$ y $GIS = 0,54$.

La AMOVA indica que la varianza se divide en 65% dentro de los individuos, 21,5% entre individuos, 12,5% entre poblaciones, y 0,6% entre cordilleras. Los resultados del ADCP y análisis K-means indican que la colección de progenies de Araucaria está dividida en 5 clúster genético. 2 clúster bien definidos en la distribución costa, siendo uno la población del Parque Nacional Nahuelbuta, y el otro Villa Las Araucarias. Mientras que en las poblaciones andinas se estructuran en 3 clúster genéticos.

Evaluación de parámetros morfológicos de semillas y plantas

Los valores del parámetro Número de Semilla por Kilo muestran una distribución asimétrica negativa, por lo que el estadígrafo más apropiado para describir los datos en ese caso es la mediana, la cual es de 257. No cumplen los supuestos de Normalidad y Homocedasticidad, por lo que para esta variable se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual reemplaza a la ANOVA ($\alpha = 0,05$). Las poblaciones presentan diferencias significativas entre ellas ($P = 0,00 < \alpha = 0,05$).

El largo promedio de las semillas (LS) para todas las poblaciones muestreada durante el año 2018, fue de $3,9 \pm 0,36$ cm. El test ANOVA utilizando las poblaciones como factor, muestra que existen diferencias para esta variable, las 2 poblaciones costeras, Parque Nacional Nahuelbuta y Villa Las Araucarias, presentan diferencias significativas entre ellas, las semillas de la Villa Las Araucarias son más pequeñas ($3,61 \pm 0,29$ cm) que las semillas de Parque Nacional Nahuelbuta ($4,19 \pm 0,36$ mm) (Tabla 1),

La variable LS de la población de la Reserva Nacional Ralco ($3,82 \pm 0,35$ cm) presenta diferencias significativas, con respecto a la población de Parque Nacional Villarrica ($4,08 \pm 0,40$ cm), lo que se explica debido a que ambas poblaciones corresponden a los extremos norte y sur respectivamente de la distribución andina (Tabla 1).

El ancho medio de las semillas para todas las poblaciones muestreada durante el año 2018, fue de $1,26 \pm 0,10$ cm. Se encontraron diferencias para esta variable, las 2 poblaciones costeras presentan diferencias significativas entre ellas, las semillas de la Parque Nacional Nahuelbuta ($1,33 \pm 0,10$ cm), son más anchas que las semillas de Villa Las Araucarias ($1,24 \pm 0,08$ mm) (Tabla 1), resultados similares se observaron en el largo de la semilla, como se ha discutido, uno de los factores puede corresponder a la pérdida de diversidad genética. En las poblaciones andinas, las diferencias significativas se exhiben en las poblaciones de los extremos de la distribución, en la distribución sur, Parque Nacional Villarrica presenta semillas levemente más anchas ($1,30 \pm 0,09$ cm) que las poblaciones más septentrionales Reserva Nacional Ralco ($1,22 \pm 0,11$ cm) y Reserva Nacional Malalcahuuello ($1,21 \pm 0,10$ cm), manteniéndose la tendencia latitudinal (Tabla 1).

Viverización:

La emergencia promedio de plantas de la colección a los 7 meses post siembra, alcanzó a un 81,4% para las poblaciones andinas y 77,9% para poblaciones de la costa (Gutiérrez 2019), lo que se traduce a 67.157 plantas de las cuales 60.158 corresponden a poblaciones andinas y 6.999 a las poblaciones costeras. La colecta de poblaciones costeras temporada 2019, genero un total de 5341 plantas quedando un total de 12.340 plantas.

Establecimiento de ensayos en lugares de acogida:

A la fecha se han seleccionado 5 sitios tanto dentro del área de acogida, como fuera de esta (Tabla 3).

Tabla 3. Sitios seleccionados para el establecimiento de ensayos genéticos dentro y fuera de las áreas de acogida.

Sitio Seleccionado	Propiedad	Superficie efectiva (ha)	Latitud	Longitud
Reserva Nacional Coyhaique	Pública	4,1	-45.51130	-71.98565

Predio Casa Blanca	Privada	1	-38.47411	-73.18093
Predio Caramávida	Privada	2,25	-37.65783	-73.24658
Reserva Nacional Malalcahuuello	Pública	40	-38.39926	-71.59341
Predio San Antonio	Privada	1,6	-37.79468	-72.82972

Evaluación de diversidad genética adaptativa:

A la fecha, debido a las restricciones impuestas por la pandemia mundial, solo se ha logrado medir el ensayo establecido en la Reserva Nacional de Coyhaique, a dos años desde su plantación, a partir de este se estimó la heredabilidad individual de la primera medición de altura, como $h^2 = 0,50 \pm 0,13$ y la supervivencia como $h^2 = 0,16 \pm 0,18$.

5. Discusión

Estudio bioclimático:

Existe solo un trabajo de predicción de áreas potenciales de distribución de Araucaria, realizado por el Centro de Semillas, Genética y Entomología de CONAF en el año 2018 usando el método de Máxima Entropía (PHILLIPS et al., 2006), los resultados de este estudio sostienen que la probabilidad futura de presencia de Araucaria ocupara un área más allá de su distribución geográfica natural, principalmente en la Cordillera de Los Andes entre las regiones de Maule y Aisén, En Aisén se fortalece la probabilidad de presencia de Araucaria en una mayor superficie (ESPINOZA 2018), siendo resultados similares a los encontrados en el estudio bioclimatológico presentado en este trabajo.

Evaluación diversidad genética neutral:

Con relación a los resultados del análisis molecular, la comparación entre cordilleras, La heterocigocidad es levemente menor en poblaciones costeras ($H_o = 0,14$) que en poblaciones andinas ($H_o = 0,15$) consecuentemente el índice GIS es mayor en poblaciones costeras (GIS=0,58) que las poblaciones andinas (GIS=0,54). Lo que se podría correlacionar con el estado de amenaza en que se encuentran las poblaciones costeras. Para este estudio, el valor general de GIS =0,55, da indicios sobre el cruzamiento histórico entre individuos. Las poblaciones andinas del centro de la distribución natural presentan menores valores de H_o , lo cual podría estar relacionado con la especialización de dichos individuos a un hábitat de mayor altura y por ende clima más frío.

El análisis jerárquico de diferenciación genómica dentro de individuos, entre individuos (dentro de las poblaciones), entre poblaciones (dentro de las cordilleras) y entre macrozona muestra que el mayor porcentaje de la variación está dentro de los individuos. No obstante, existe diferenciación significativa en los otros niveles jerárquicos.

Por otra parte, los resultados del ADCP y análisis K-means indican que la colección de progenies de Araucaria está estructurada en 5 clúster genéticos compuesto por los individuos pertenecientes a las poblaciones costeras separados por el PC1, por otro lado, del PC2 se encuentran las poblaciones andinas. Por lo que los resultados respaldan la estructura genética reportada MARTÍN et al. (2014).

Evaluación de parámetros morfológicos de semillas y plantas

En la literatura se reporta un número estimado de 260 semillas por kilo (MUÑOZ, 1984; CARO, 1995; GONZÁLEZ et al., 2006). TRONCOSO (2015), informa un valor de 311 ± 19.10 semillas/ kg (año 2013) y $406 \pm 12,00$ semillas/kg (año 2014), para la población de Villa Las Araucarias. En este estudio para esta localidad, se indica un valor 294 ± 63.37 semillas/kg.

En las poblaciones andinas, el número de semillas por kilogramo varía de 180 a 250, siendo también un número mucho menor que en Villa Las Araucarias. La diferenciación en el tamaño de las semillas está correlacionada con numerosos factores ambientales, como la variación altitudinal (BEKESSY, 2002), la que implica variaciones de temperatura, cantidad y tipo de precipitaciones (pluviales o nivales). Las diferencias ambientales podrían explicar las diferencias en el tamaño de las semillas de Araucaria.

En relación al LS, en los últimos años varios autores informan una disminución en la variabilidad genética para la especie en la población de Villa Las Araucarias. Los análisis utilizando marcadores moleculares tipo microsatélites (SSR), muestran que la población de Villa Las Araucarias presenta la menor variación genética con respecto al resto de las poblaciones de la especie, medida como heterocigosidad no sesgada ($UHe = 0.56$) (Martín et al., 2014). Además, otros autores señalan que Villa Las Araucarias, tiene el menor número de alelos por locus polimórfico, utilizando marcadores tipo aloenzimas (Ruiz et al., 2007). Por lo tanto, se podría teorizar que la falta de diversidad genética está teniendo efectos en la expresión de rasgos morfológicos, sin embargo, se necesitan profundizar estos análisis. Por otra parte, una comparación con los datos reportados para la variable LS, se puede realizar para la localidad Villa Las Araucarias, Troncoso (2015), determinó que las semillas colectadas en 2013 en esta localidad miden $3,84 \pm 0,28$ cm, en el presente estudio esta localidad presenta un valor de $3,61 \pm 0,29$ cm, siendo valores similares. Otros autores mencionan valores de 4 a 5 cm el largo de las semillas para la especie a través de su distribución natural (Donoso y Cabello 1977; Donoso 1998), sin una prueba estadística, se puede teorizar que las semillas han disminuido su tamaño, sin embargo, para confirmar estas suposiciones se debería contar con información temporal sobre la variable.

El comportamiento de la variable LS en las distribuciones extremas sugiere una tendencia latitudinal en la variación por lo menos en la macrozona Andes, al respecto SERSIC et al. (2011), describe que existen quiebres filogeográficos latitudinales para algunas especies del género *Nothofagus* y *Astrocedrus*, lo que podría estar explicando estas diferencias.

Troncoso (2015), reportó un valor de $13,9 \pm 1,2$ mm de ancho medio de la semilla, para la localidad Villa Las Araucarias, en este estudio para esta localidad se reporta un valor de $12,43 \pm 0,83$ mm de ancho medio de la semilla. Se observa, el mismo patrón con respecto al largo, las semillas parecieran disminuir en su tamaño, aunque cabe destacar la baja diversidad genética de la localidad reportada.

Viverización:

Una evaluación preliminar de emergencia de plántulas, se realizó en octubre de 2018, es decir a 4 meses post plantación, alcanzando un valor medio de 58,9%. En esa ocasión se observó que en las procedencias costeras la germinación y la emergencia de plántulas (68,1%) se manifiestan antes que en las procedencias andinas (57,8%). En la evaluación final, efectuada 7 meses post siembra, es decir en enero de 2019, se constató un aumento general de la emergencia de plántulas, que subió de 58,9 a 81,1%. Este incremento fue de mayor envergadura para las procedencias andinas, las cuales, a pesar de exhibir una germinación más lenta, alcanzaron valores de emergencia de plántulas superiores a los de las procedencias costeras. Considerando la evaluación de enero 2019, en promedio la emergencia de plantas de las 418 familias alcanzó un 81%, siendo mayor en las semillas de las procedencias andinas (81,4%) que en las procedencias costeras (77,9%) (Gutiérrez 2021).

Establecimiento de ensayos en lugares de acogida:

A la fecha se han establecido 5 ensayos genéticos, de progenie y procedencias, todo de tamaños diferentes debido a la superficie efectiva, pero usando el mismo esquema operacional, esta red de ensayo permitirá generar un resguardo del material vegetal, y subyacentemente de la diversidad genética de la especie.

La reintroducción de germoplasma resguardado en los ensayos genéticos a poblaciones naturales, se llevará a cabo cuando se verifiquen las correlaciones genéticas edad-edad, desempeño de las procedencias en las distintas áreas de ensayo, interacciones genotipo ambiente y puesta a punto de tecnología de embriogénesis somática, entre otros detalles.

6. Conclusiones

Dentro del programa de migración asistida, el establecimiento de ensayos de progenie y procedencia de *Araucaria araucana*, tanto fuera como dentro de la distribución natural de esta especie, está permitiendo salvaguardar su potencial adaptativo, en especial las procedencias de las zonas costeras

que se encuentran en peligro de extinción por la presión de selección que está ejerciendo el cambio climático.

El estudio bioclimático permitió identificar las zonas de máximo y mínimo estrés integral, denominándose esta última como área de acogida o zona azul para la migración asistida de la Araucaria araucana.

El análisis molecular de *Araucaria araucana* reveló que la heterocigosidad de las procedencias costera es levemente menor a las andinas, y la endogamia es mayor en las procedencias costeras que las andinas.

El Análisis Discriminante de Componentes Principales (ADCP) y el agrupamiento *K-means*, determinó la existencia de 5 agrupaciones ecológico genético de la Araucaria en la zona de estudio, dos costeras y tres andinas.

La procedencia costera de Villa Las Araucaria, presenta los menores tamaños de semilla y menores niveles de diversidad genética y es donde el efecto de la presión del cambio climático se está expresando con mayor intensidad.

7. Agradecimientos

Agradecemos a la Corporación Nacional Forestal: en especial a Aida Baldini, Monica Gonzalez, Julio Figueroa, Neftali Soto y Leonardo Araya. Al Dr. Fernando Drake (QEDP) de la Universidad de Concepción, por su empuje y compromiso en aunar a muchas instituciones para salvaguardar el potencial evolutivo de la Araucaria araucana. Al señor Eduardo Cayul, presidente de los Loncos de la comunidad de Lonquimay. A las empresas forestales: APROBOSQUE AG., CMPC, y Bosque Arauco, entre otras por su apoyo. Por último, a todos los administradores y guarda parques del Sistema Nacional de Áreas Silvestre Protegidas con presencia de Araucaria de la Corporación Nacional Forestal.

8. Bibliografía

- AITKEN, S.; YEAMAN, S.; HOLLIDAY, J.; WANG, T.; CURTIS-MCLANE, S; 2008. Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcome for tree population. *Evol. Appl* 1:95-111
- ACKERLY, D.; LOARIE, S.; CORNWELL, W.; WEISS, S.; HAMILTON, H.; BRANCIFORTE, R.; KRAFT, N; 2010. The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Divers. Distrib* 16:476-487.
- BALOCCHI, F.; WINGFIELD, M, J.; AHUMADA, R.; BARNES, I; 2021. *Pewenomyces kutranfy* gen. nov. et sp. nov. causal agent of an important canker disease on *Araucaria araucana* in Chile. *Plant Pathol* 70:1243-1259.
- BEKESSY, S.; ALLNUTT, T.; PREMOLI, A.; LARA, A.; ENNOS, R.; BURGMAN, M.; CORTES, M.; NEWTON, A; 2002. Genetic variation in the vulnerable and endemic Monkey Puzzle tree, detected using RAPDs. *Heredity* 88: 243-249.
- CARO, M. 1995. Producción y dispersión de semillas de *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch., en Lonquimay. Memoria para obtener el título de Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago, Chile, 55 pp.

DONOSO, C., CABELLO, A. 1977. Antecedentes fenológicos y de germinación de especies leñosas chilenas. *Revista de la Facultad de Ciencias Forestales*, 1(2), 31-41

DONOSO, C. 1998. Bosques templados de Chile y Argentina; Variación, estructura y dinámica. Cuarta Edición. Editorial Universitaria. 483. Santiago de Chile.

ELSHIRE, R.; GLAUBITZ, J.; SUN, Q.; POLAND, J.; KAWAMOTO, K.; BUCKLER, E., MITCHELL, S; 2011. A Robust, Simple Genotyping-by-Sequencing (GBS) Approach for High Diversity Species. PLoS ONE 6: e19379

ESPINOZA, J; 2018. Modelamiento del nicho ecológico y estimación del efecto del cambio climático en la distribución de especies. Centro de Semillas, Genética y Entomología, CONAF, Chillán.

HARRISON, S., SPASOJEVIC, M., LI, D; 2020. Climate and plant community diversity in space and time. PNAS 117: 4464-4470.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPINZA, R. 2018. Migración Asistida: El nuevo paradigma de la conservación en recursos genéticos forestales para la adaptación al cambio climático. CIFOR 24:69-88.

GILMOUR, A.; CULLIS, B.; WELHAM, S.; THOMPSON, R; 1999. ASREML. Beta Version. 177.

GONZÁLEZ, M.; CORTÉS, M.; IZQUIERDO, F.; GALLO, L.; ECHEVERRÍA, C.; BEKKESY, S.; MONTALDO, P; 2006. *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch Araucaria (ó), Pehuen, Piñonero, Pino Araucaria, Pino chileno, Pino del Neuquén, Monkey puzzle tree. En Donoso, C (Ed.) Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología. Valdivia, Chile. 36-53

GONZÁLEZ – CAMPOS, J.; KOCH, L; 2021. Evaluación de parámetros morfológicos y fisiológicos en semillas de *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch, Cosecha Temporada 2018. En: IPINZA, R.; MÜLLER-USING, S. (eds): Migración asistida de *Araucaria araucana*. Página 75 – 89. FAO y MINAGRI. Santiago de Chile.

GUTIÉRREZ, B; 2021. Análisis de la emergencia de plántulas durante la viverización de una colección de semillas de 418 familias de *Araucaria araucana*. En: IPINZA, R.; MÜLLER-USING, S. (eds): Migración asistida de *Araucaria araucana*. Página 53 – 74. FAO y MINAGRI. Santiago de Chile.

MARTÍN, M.; MATTIONI, C.; LUSINI, I.; MOLINA, J.; CHERUBINI, M.; DRAKE, F.; HERRERA, M.; VILLANI, F.; MARTÍN, L; 2014. New insights into the genetic structure of *Araucaria araucana* forests based on molecular and historic evidences. Tree Genet. Genomes 10: 839–851.

MOLINA, M.; GONZÁLEZ, J., SOTO, H.; BARRIENTOS, M; 2021. Cosecha de semillas de *Araucaria araucana*. En: IPINZA, R.; MÜLLER-USING, S. (eds): Migración asistida de *Araucaria araucana*. Página 27 – 52. FAO y MINAGRI. Santiago de Chile.

MUÑOZ, R. 1984. Análisis de la productividad de semillas de *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch, en el área de Lonquimay. Tesis para obtener el título de ingeniero forestal. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 84 pp.

PHILLIPS, S.; ANDERSON, R.; SCHAPIRE, R; 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Model*, 190:231-259.

REGLINSKI, T.; SPIERS, T.; TAYLOR, J.; AH CHEE, A.; DICK, M; 2008. Management of Phytophthora root rot in radiata pine seedlings. The Horticulture and Food Research Institute of New Zealand Ltd. New Zealand.

SAAVEDRA, L; 2021. Análisis morfológico y genético de caracteres tempranos en plantas de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch, en un ensayo de progenie en vivero. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniera Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza Universidad de Chile. 65. Santiago de Chile.

SANTIBÁÑEZ, F.; SANTIBÁÑEZ, P. 2018. Evaluación de las forzantes bioclimáticas en la sustentabilidad de las comunidades de Araucarias en Chile. Hacia una estrategia de conservación del patrimonio natural frente a la amenaza del cambio climático. Informe Técnico INFODEP, Santiago, Chile.

SERSIC, A.; COSACOV, A.; COCUCCI, A.; JOHNSON, L.; POZNER, R.; AVILA, L.; SITES, J.; MORANDO, M; 2011. Emerging phylogeographical patterns of plants and terrestrial vertebrates from Patagonia. *Biol. J. Linn. Soc* 103:475-494.

TRONCOSO, A. 2015. Evaluación del proceso de germinación de la especie *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. proveniente del sitio prioritario de conservación de Villa Las Araucarias, Región de La Araucanía. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile.

VILLAGRÁN, C.; HINOJOSA, L. 1997. Historia de los bosques del sur de Sudamérica, II: Análisis fitogeográfico. *Rev. Chil. Hist. Nat* 70: 241-267.

WOODWARD, F. 1987. Climate & Plant Distribution. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press. UK. 174 p.