



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA EN CONSERVACION DE RECURSOS NATURALES

**ESTRATEGIAS DE MANEJO PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL
HÁBITAT DE *Eucryphia glutinosa* (Poepp. et Endl)**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniera en Conservación de
Recursos Naturales

POR: Javiera Anastasia Tapia Flores

Profesor Guía: Cristian Echeverría

Marzo, 2024

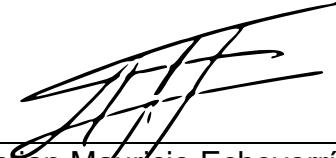
Concepción, Chile

© 2024, Javiera Anastasia Tapia Flores

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

ESTRATEGIAS DE MANEJO PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DEL
HÁBITAT DE *Eucryphia glutinosa* (Poepp. et Endl)

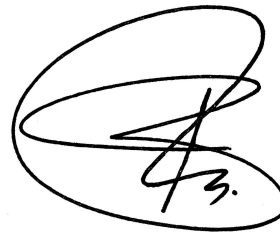
Profesor Guía



Cristian Mauricio Echeverría Leal

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, Ph.D.



Profesora Guía

Paula Meli

Profesora Asistente

Bióloga, Dra.



Profesor Guía

Elvis Hernaldo Gavilán Gutiérrez

Profesor Asistente

Licenciado en Matemática, Dr.

DEDICATORIA

A ti, que no alcanzaste a verme pero siempre supiste que llegaría hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Un simple gracias se lo lleva el viento y queda en la memoria, pero el viento fluye y la memoria es frágil, al menos este quedará escrito por la eternidad.

En primer lugar quiero agradecerme, porque en mi momento más bajo reuní mis últimas fuerzas y me animé a no tirar todo al abismo, a continuar luchando y amando. También quiero agradecer a mi pareja Sebastián por nunca perder la fe en mí y animarme cada día a cumplir mis metas y ser mejor persona conmigo y con el mundo. Agradezco a mi familia, a mi hermana, mi madre, mi abuela (mami), desde que tengo memoria que siempre creyeron que hoy estaría aquí. Gracias a mis roomies-amigos, fueron las risas de mis días malos y el calor de mis inviernos

Agradezco al financiamiento obtenido de la Iniciativa Foresta Nativa de la Universidad de Concepción, proyecto de Restauración Ecológica (VR/F/20/EP001) bajo el Convenio Enel-UdeC, por incluirme como practicante, enseñarme sobre la restauración ecológica y posteriormente brindarme los datos medidos en terreno para la formulación de los análisis vistos en este estudio. Quiero agradecer también al Laboratorio de Ecología de Paisaje (LEP), por la facilitación de los recursos geoespaciales de los sitios de estudio con los cuales pude generar material visual como apoyo de este estudio.

Agradezco al profesor Cristian Echeverría por darme la oportunidad de entrar al mundo de la restauración ecológica y poder maravillarme con el proceso, por el apoyo brindado en todo momento y por guiarme en este viaje. Agradezco también a la profesora Paula Meli y el profesor Elvis Gavilán por dar lo mejor de sí, enseñarme y aconsejarme para siempre obtener el mejor resultado.

Gracias a mi Renatito, fuiste mi motivación para siempre querer volver a casa. Finalmente te agradezco a ti que donde quiera que estés, siempre estuviste presente, de eso me encargué personalmente.

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
I. INTRODUCCIÓN	5
II. METODOLOGÍA	10
2.1 Descripción de la especie	10
2.2 Descripción del área de estudio	11
2.2.1 Sitio Los Esteros	11
2.2.2 Sitio Los Peñascos	13
2.2.3 Sitio Rayenco	16
2.3 Descripción del ecosistema de referencia	18
2.3.1 Ecosistema de referencia El Valiente	18
2.4 Estrategias de manejo para la restauración ecológica	21
2.5 Recopilación de datos	22
2.6 Selección de variables de los predios de restauración ecológica de <i>E. glutinosa</i>	24
2.7 Procesamiento de indicadores	26
2.7.1 Variables biofísicas	26
2.7.2 Variables de composición	27
2.7.3 Variables estructurales	28
2.7.4 Análisis complementarios	30
III. RESULTADOS	33
3.1 Variables Biofísicas: Humedad y temperatura	33
3.2 Variables Composicionales: Riqueza y Abundancia	35
3.2.1 Índice de Diversidad de Shannon	35
3.2.2 Análisis de la composición del ecosistema	36
3.3 Variables Estructurales	38
3.3.1 Análisis de la estructura ecosistémica	38
3.4 Análisis complementarios	39

3.4.1 Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) para todos los indicadores.....	40
3.4.2 Influencia de variables en la sobrevivencia	41
IV. DISCUSIÓN.....	43
4.1 Limitaciones para esta investigación	49
V. CONCLUSIONES	52
VI. GLOSARIO	53
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	55
VIII. APÉNDICE	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores y métricas seleccionadas de los atributos biofísicos, composicionales y estructurales de los predios medidos y su ecosistema de referencia correspondiente.....	25
Tabla 2. Porcentaje de sobrevivencia obtenidos para los sitios de restauración.	42

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ubicación de los sitios de restauración ecológica para el hábitat de <i>Eucryphia glutinosa</i> en el predio Los Esteros, comuna de Quilaco, Región del Biobío.	13
Figura 2. Ubicación de rodales de restauración ecológica para el hábitat de <i>Eucryphia glutinosa</i> en el predio de Los Peñascos, comuna de Pinto, región de Ñuble.	15
Figura 3. Ubicación de rodales de restauración ecológica para el hábitat de <i>Eucryphia glutinosa</i> en el sitio Rayenco, comuna de Antuco, región del Biobío.	17
Figura 4. Ubicación de rodal y parcelas del ecosistema de referencia para la especie de <i>E. glutinosa</i> en el sitio El Valiente, comuna de San Carlos, región de Ñuble.	19
Figura 5. Ubicación de los tres sitios de RE del hábitat de <i>E. glutinosa</i> y su ecosistema de referencia, en la Región de Ñuble y Biobío.....	20
Figura 6. Variación de Humedad Relativa en los distintos sitios de restauración y sus monitoreos correspondientes.....	34
Figura 7. Variación de temperatura en los distintos predios y sus monitoreos correspondientes.	35
Figura 8. Índice de Diversidad de Shannon.	36
Figura 9. Análisis de comparación entre los predios midiendo su cercanía al ecosistema de referencia en cuanto a la composición vegetacional.	38
Figura 10. Análisis de comparación entre los predios midiendo su cercanía al ecosistema de referencia en cuanto a los parámetros estructurales de la vegetación.	39
Figura 11 Análisis de comparación entre Predios y sus monitoreos, además de visualizar acercamientos al ecosistema de referencia.	41

RESUMEN

Los ecosistemas naturales que se encuentran cercanos a zonas antrópicas son altamente vulnerables a la degradación y disminución de la biodiversidad por lo que es necesaria una restauración asistida. Por tal motivo, la restauración ecológica es una alternativa viable para recuperar ecosistemas degradados, sus servicios ecosistémicos y la biodiversidad. Dentro del marco de una restauración ecológica existen diversas estrategias que son aplicables para encaminar un ecosistema a la trayectoria de recuperación. El objetivo principal de este estudio fue analizar el grado de éxito de las estrategias de restauración ecológica del hábitat de *Eucryphia glutinosa* realizadas durante el 2021 en tres sitios del sur de Chile. Se realizaron análisis estadísticos ANOVA, Índice de Shannon, análisis de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) y Regresión Lineal Múltiple para evaluar la eficacia de las estrategias de restauración aplicadas en los tres sitios de estudio. Se detectaron diferencias estadísticamente significativas en variables biofísicas como humedad relativa y temperatura con respecto al ecosistema de referencia. En términos de variables composicionales, se evidenció alta diversidad de especies. El NMDS reveló patrones distintivos de agrupamiento, indicando una trayectoria de los sitios hacia la restauración del ecosistema. La evaluación de variables estructurales mediante NMDS sugirió que la línea base de predios se agrupaba cercana al ecosistema de referencia, destacando la heterogeneidad post-plantación en DAP y altura. En análisis

generales, NMDS para todos los indicadores reveló agrupamientos distintivos, resaltando la proximidad de Rayenco y Los Esteros al ecosistema de referencia. La regresión lineal múltiple no encontró significancia estadística en los indicadores que explican la sobrevivencia de *E. glutinosa*. Se concluye que las estrategias de restauración utilizadas han permitido recuperar ciertos atributos ecosistémicos clave, lo cual podría servir de modelo para futuras de acciones de restauración de hábitat de especies amenazadas.

ABSTRACT

Natural ecosystems that are close to anthropogenic areas are highly vulnerable to degradation and biodiversity decline, which is why assisted restoration is necessary. For this reason, ecological restoration is a viable alternative to recover degraded ecosystems, their ecosystem services and biodiversity. Within the framework of ecological restoration, there are several strategies that can be applied to put an ecosystem on the path to recovery. The main objective of this study was to analyze the degree of success of ecological restoration strategies for *Eucryphia glutinosa* habitat carried out during 2021 in three sites in southern Chile. Statistical analyses ANOVA, Shannon Index, Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS) analysis and Multiple Linear Regression were performed to evaluate the effectiveness of the restoration strategies applied in the three study sites. Statistically significant differences were detected in biophysical variables such as relative humidity and temperature with respect to the reference ecosystem. In terms of compositional variables, high species diversity was evident. NMDS revealed distinctive clustering patterns, indicating a trajectory of sites towards ecosystem restoration. The evaluation of structural variables by NMDS suggested that the baseline of sites clustered close to the reference ecosystem, highlighting post-planting heterogeneity in DBH and height. In general analyses, NMDS for all indicators revealed distinctive groupings, highlighting the proximity of Rayenco and Los Esteros to the reference ecosystem. Multiple linear

regression did not find statistical significance in the indicators that explain the survival of *E. glutinosa*. It is concluded that the restoration strategies used have allowed the recovery of certain key ecosystem attributes, which could serve as a model for future habitat restoration actions for threatened species.

I. INTRODUCCIÓN

Los humanos han transformado gran parte de la superficie del planeta en los últimos 300 años. La tala de bosques, las prácticas agrícolas de subsistencia, la intensificación de la producción agrícola y la expansión de los centros urbanos han cambiado drásticamente el paisaje (Aguayo et al. 2009). El ser humano a lo largo del tiempo ha generado que al menos un 75% de la superficie terrestre del planeta está experimentando presiones humanas medibles (Venter et al. 2016). La restauración de ecosistemas proporciona una oportunidad real y efectiva que optimiza la acción de poner fin y lograr revertir el proceso de degradación, mejorar los servicios ofrecidos por el ecosistema y recuperar la biodiversidad. Se estima que si se realiza una recuperación del 15% de las tierras convertidas en zonas prioritarias y más degradadas se podría evitar el 60% de las extinciones previstas y secuestrar 299 gigatoneladas de CO₂, el 30% del aumento total de CO₂ en la atmósfera desde la Revolución Industrial (Strassburg, et al, 2020). La necesidad de la recuperación se debe a las agravantes consecuencias de la expansión y el cambio climático, de esta manera, la restauración ecológica satisface un profundo deseo humano de recuperar algo de valor que se perdió (Clewett et al. 2007).

La restauración ecológica es el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (SER, 2016). Este

proceso es intencional y busca llevar a un ecosistema a una trayectoria ecológica de recuperación que permita la adaptación a cambios locales y globales, la persistencia y la evolución de las especies que lo componen (Echeverría et al. 2021). Sin embargo, cuando un ecosistema está muy alterado y es muy difícil tomar como referencia del original, es recomendable elegir un ecosistema de referencia (Vargas, 2011). Un ecosistema de referencia es definido como un modelo que representa una aproximación a las metas de restauración (SER, 2016). Este puede servir de modelo para la planificación de un proyecto de restauración ecológica y posteriormente, servir en la evaluación de ese proyecto (SER, 2004). Usualmente representa una versión no degradada del ecosistema completo, sin embargo, En ausencia de un ecosistema prístino y del mismo tipo que aún quede remanente cercano al del sitio objetivo, el modelo de referencia puede ser generado a partir de múltiples fuentes acerca de la biota y las condiciones pasadas y presentes del sitio y las condiciones que ocurren en o cerca del sitio; en conjunto con información sobre cambios anticipados en condiciones ambientales que pudiesen conducir a alteraciones en el ensamble biológico (SER, 2004). Esta referencia seleccionada podría ser la manifestación de uno de muchos estados posibles de la gama histórica de variación de ese ecosistema. La referencia refleja una combinación en particular de acontecimientos aleatorios que ocurrieron durante el desarrollo de un ecosistema (SER, 2004).

Para llevar a cabo este proceso de restauración del ecosistema degradado es necesario evaluar los factores ecológicos y físicos que determinan los límites de la composición, la estructura y función del ecosistema degradado (Aguirre et al. 2013). La regeneración natural, a veces denominada restauración “pasiva”, es a menudo el enfoque más rentable cuando el potencial de recuperación natural es alto. Sin embargo, cuando el potencial de regeneración natural está ausente o es bajo, generalmente es necesario restablecer o aumentar los organismos o las poblaciones agotadas a través de medios más activos, como la regeneración asistida o la reconstrucción, a veces denominada restauración “activa” (SER, 2019). Se sugiere que todas las técnicas y estrategias de restauración estén dirigidas hacia la recuperación de algunos y no todos los componentes básicos de la estructura, función y composición de especies de un ecosistema (Aguirre et al. 2013). Estas estrategias pueden ir orientada a la recuperación de diversas funciones y servicios del ecosistema tales como como el control de erosión, mejorar la calidad del agua, aumentar humedad del suelo, mejorar la calidad del parche, aumentar su riqueza y/o abundancia, mejorar conectividad de especies de fauna, etc (Holl, 2023), esto mediante acciones de restauración ecológica, brindando así ecosistemas para diversas especies.

Frecuentemente, el número de árboles plantados a menudo se toma como una medida de rendimiento en proyectos de revegetación, pero esto no indica el éxito de la plantación (Hobbs, 2003). El monitoreo de los procesos de restauración ecológica provee información sobre los cambios suscitados a partir de los

tratamientos de restauración aplicados, permitiendo evaluar la eficiencia e idoneidad de las estrategias de restauración empleadas y por ende estableciendo la base para la toma de decisiones respecto al manejo futuro del proceso (Vargas, 2008).

En Chile, las principales causas que dan origen a la degradación de ecosistemas nativos son la explotación forestal insostenible (por recolección excesiva de productos del bosque), el pastoreo excesivo, los incendios y la expansión de especies invasoras o plagas (Donoso et al. 2018). Estos factores como la expansión forestal incrementan la fragmentación del paisaje y en la configuración del paisaje, como el caso del bosque caducifolio Maulino en la Cordillera de la Costa que entre los años 1975 y 2000, hubo una reducción del área de bosque natural del 67% en el área de estudio (Echeverría et al. 2006). Un claro ejemplo de la vulnerabilidad de ciertas especies es *Eucryphia glutinosa*, más conocida como guindo santo, que se distribuye desde la provincia de Linares hasta la de Malleco (Retamales & Morales, 2022). Esta especie está clasificada como Vulnerable (VU) en Chile (MMA, 2022).

Las principales amenazas de la especie *E. glutinosa* tales como ramoneo por ganado, tala para habilitación, cortas ilegales y riesgo de incendio han llevado a la pérdida degradación del hábitat (Echeverría et al. 2014; Neira et al. 2014). Por esto, existe la necesidad imperiosa de aumentar los esfuerzos de restauración de la especie, por lo que, es necesario un análisis de las estrategias de manejo

aplicadas. Estas estrategias utilizadas pueden variar entre especies o zonas de recuperación, no obstante, a través del manejo de la estructura, la aplicación del sistema de manejo adecuado y las mejores prácticas, se favorece la conservación de la biodiversidad en bosques bajo manejo (Vargas, 2013).

El objetivo del presente estudio es analizar las acciones de restauración ecológica implementadas en tres sitios de restauración, llevados a cabo por Iniciativa Foresta Nativa (Foresta Nativa, 2015). En particular, se busca (i) identificar y describir las estrategias de manejo aplicadas en los sitios de restauración, (ii) analizar el grado de éxito de las acciones de restauración ecológicas realizadas en tres sitios de estudio mediante una relación entre la tasa de sobrevivencia de *E. glutinosa* y las variables biofísicas, composicionales y estructurales monitoreadas. (iii) Se busca aportar antecedentes que contribuyen a mejorar las estrategias de recuperación de especies amenazadas. Cada una de estas métricas revelan aspectos fundamentales de la organización y salud del ecosistema, proporcionando un mosaico detallado de su estructura tridimensional, densidad y capacidad regenerativa. Finalmente, se analizaron variables específicas para determinar la dirección de la restauración ecológica de la especie *Eucryphia glutinosa*.

II. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la especie

Árbol o arbusto endémico que se distribuye en la precordillera andina desde el sur de la VII Región (provincia de Linares, 36°05'S) hasta el norte de la IX Región (provincia de Malleco, 38°14'S) (Hechenleitner et al. 2005, Echeverría et al. 2014). Su rango altitudinal varía entre los 250 y 1800 m.s.n.m. sólo en la Cordillera de Los Andes. La especie se concentra en gran medida (96%) en la Región del Biobío (Echeverría et al. 2014). Esta especie se despliega cercano a cursos de agua en quebradas húmedas donde se desarrolla como un pequeño árbol en subpoblaciones bien dispersas y de baja densidad, y a mayores altitudes en lugares rocosos expuestos, xerofíticos, en donde forma densas subpoblaciones (Hechenleitner et al. 2005).

En los sectores donde *E. glutinosa* habita generalmente son áreas idoneas para *Austrocedrus chilensis* y *Prumnopitys andina*. Además participa de manera secundaria en el tipo forestal Roble-Rauli-Coihue (Rodríguez, 2004). Sus principales amenazas constan de ramoneo generado por ganado y por la evidencia de cortas para obtener sus flores u hojas. La especie no presenta mayores amenazas debido a su ubicación en zonas de difícil acceso en la cordillera andina. (Echeverría et al. 2014). Esta especie está categorizada como

Vulnerable (VU) bajo los criterios de extensión de presencia (B1), estando severamente fragmentada (a) y con una disminución continua de los aspectos de extensión de presencia (i), area, extensión y/o calidad del hábitat (iii) y el número de localidades o subpoblaciones (iv) (UICN, 2012). Por lo que su clasificación sería: **Vulnerable VUB1ab(i,iii,iv)** (Echeverría et al. 2014).

2.2 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende tres sitios de restauración ecológica de *E. glutinosa* (Figura 1) distribuidos entre la región de Ñuble y Bio-Bío.

2.2.1 Sitio Los Esteros.

Se ubica en la comuna de Quilaco, Provincia de Los Ángeles, región del Biobío. Corresponde a un rodal (1A) en donde la superficie a restaurar fue de 1,1 ha. El sitio es relativamente homogéneo en términos de la cobertura vegetal, condiciones topográficas e hídricas. En este sitio se establecieron cuatro parcelas de 500 m² de investigación para la recuperación del hábitat de *Eucryphia glutinosa*. La plantación de este predio se llevó a cabo en julio del 2021, donde un total de 4444 plantas fueron establecidas, de las cuales 2732 fueron individuos de *E. glutinosa* utilizando un método de fertilización con 20 gramos de basacote de 6M y bañadas previamente en terreno con una mezcla de Hidrosorb además

de un estimulante radicular. Además de la especie objetivo, se plantaron especies acompañantes tales como *Drymis winteri*, *Gevuina avellana*, *Nothofagus alpina* y *Podocarpus salignus*.

La línea base del sitio describe principalmente un bosque nativo, donde se registraron especies como *Aextoxicon punctatum*, *Drymis winteri*, *Lomatia hirsuta*, *Luma apiculata*, así como algunas especies pertenecientes al género *Nothofagus*, entre otras. Sin embargo, se ha observado la presencia de una especie exótica, el cerezo (*Prunus cerasus*), que ha sido identificada en el área. El sotobosque de la zona presenta una diversidad de formas de vida, que incluyen componentes herbáceos (seis especies), musgos (una especie), helechos (tres especies), plantas trepadoras (cuatro especies) y arbustos (seis especies).



Figura 1. Ubicación de los sitios de restauración ecológica para el hábitat de *Eucryphia glutinosa* en el predio Los Esteros, comuna de Quilaco, Región del Biobío.

2.2.2 Sitio Los Peñascos

Se ubica en la comuna de Pinto, provincia de Diguillín, región de Ñuble. Consta de siete rodales (1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 4A, 4B) donde el área a restaurar cubrió 5,2 ha. La zona en consideración se caracteriza por presentar una variabilidad topográfica notable, que abarca tanto áreas planas como zonas con pendientes pronunciadas. El predio en cuestión consta de siete parcelas fijas de investigación, cada una con una extensión de 500 m². Es importante destacar

que este predio alberga especies amenazadas que son objetivos principales de los esfuerzos de recuperación ecológica, entre las cuales se incluyen *Prumnopitys andina*, *Austrocedrus chilensis* y *Eucryphia glutinosa* (Echeverría L et al. 2022). La plantación se llevó a cabo en julio del 2021 en donde se establecieron un total de 22381 plantas, de las cuales 5918 corresponden a *P. andina* (Lleuque), 7463 a *A. chilensis* (Ciprés de la cordillera) y 1662 *E. glutinosa* (guindo santo). Utilizando un método de fertilización con 20 gramos de basacote de 6M y bañadas previamente en terreno con una mezcla de Hidrosorb además de un estimulante radicular. En cuanto a los rodales presentes en esta área, se observa una alta diversidad estructural.

La línea base describe una composición arbórea compuesta totalmente de especies nativas, esto en los rodales de *E. glutinosa* y *P. andina*. Sin embargo, en el caso de *A. chilensis*, en el sector designado para su restauración, se encontró una mayor presencia de especies exóticas, como *Populus alba* y *Oxalis acetocella*, entre otras. Las especies más comunes encontradas antes de las acciones de restauración fueron *Aextoxicon punctatum*, *Drymis winteri*, *Lomatia hirsuta*, *Luma apiculata* y algunas especies pertenecientes al género *Nothofagus*, entre otras (Echeverría et al. 2022).

En lo que respecta al sotobosque, se encontró una baja diversidad de formas de vida presentes en el área, incluyendo componentes herbáceos (dos especies),

musgos (una especie) y helechos (una especie), entre otros. Cada especie objetivo de restauración cuenta con sus respectivas especies acompañantes. En el caso del *E. glutinosa*, se incorporaron especies como *D. winteri*, *N. alpina*, *N. obliqua*, *Podocarpus salignus* y *P. andina*. En el caso del *P. andina*, las especies acompañantes incluyen *D. winteri*, *Lomatia dentata*, *N. dombeyi*, *N. obliqua*, *P. salignus* y *P. andina*. Por último, el *A. chilensis* presenta especies acompañantes como *L. hirsuta*, *N. alpina*, *N. dombeyi* y *N. obliqua*.

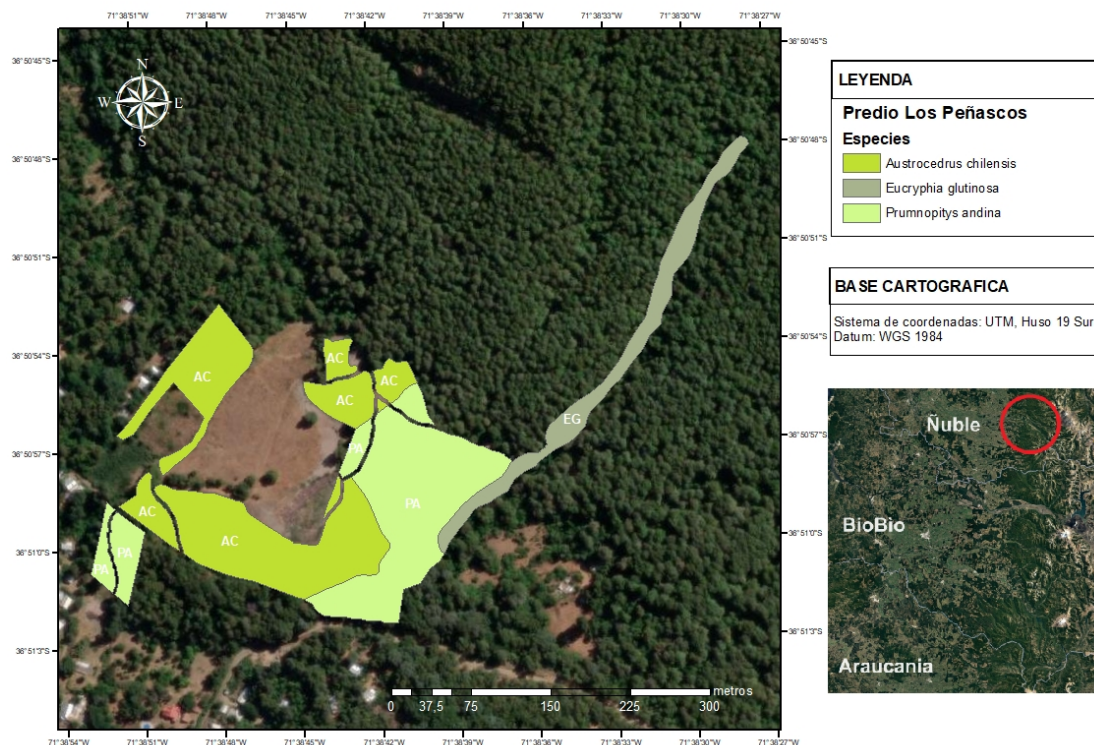


Figura 2. Ubicación de rodales de restauración ecológica para el hábitat de *Eucryphia glutinosa* en el predio de Los Peñascos, comuna de Pinto, región de Ñuble.

2.2.3 Sitio Rayenco

Ubicada en la comuna de Antuco, provincia del Biobío, región del Biobío. Consta de nueve rodales (1A, 1B, 1C, 2A, 3A, 3B, 4A, 4B, 5A), en donde el área a restaurar es un total de 25,2 ha.

La zona de estudio presenta una notable variabilidad topográfica debido a la presencia de áreas planas y sectores con pendientes considerables, atribuible a su ubicación en un valle y su cercanía a cursos de agua. En este predio en particular, se han establecido un total de cuatro parcelas de investigación, cada una con una extensión de 500 m². Dentro de este contexto, las especies objetivo de restauración son *A. chilensis*, *P. andina* y *E. glutinosa*, todas ellas consideradas especies amenazadas en Chile (MMA, 2022). La plantación en el predio se realizó en agosto del 2021 en donde se instauraron un total de 56316 plantas, de las cuales 7222 corresponden a *A. chilensis*, 9959 son de la especie *P. andina* y 3337 corresponden a *E. glutinosa*, utilizando un método de fertilización con 20 gramos de basacote de 6M y bañadas previamente en terreno con una mezcla de Hidrosorb además de un estimulante radicular.

Una característica distintiva de este sector es su alta diversidad estructural, en términos de cobertura arbórea descrita en la línea base, se observa la presencia

de especies como *D. winteri*, *L. hirsuta*, *L. dentata*, *P. andina*, *Gevuina avellana* y algunas especies del género *Nothofagus*. En cuanto al sotobosque, se ha encontrado una alta diversidad de tipos de vida presentes en la zona de estudio. Esto incluye una amplia variedad de plantas herbáceas (una especie), helechos (dos especies), musgos (una especie), trepadoras (tres especies), arbustos (cinco especies) y posiblemente hongos.



Figura 3. Ubicación de rodales de restauración ecológica para el hábitat de *Eucryphia glutinosa* en el sitio Rayenco, comuna de Antuco, región del Biobío.

2.3 Descripción del ecosistema de referencia

2.3.1 Ecosistema de referencia El Valiente

Ubicado en la comuna de San Fabián de Alico, provincia del San Carlos, región del Ñuble y consta de un rodal (1A) en donde el área total de la zona designada como el ecosistema de referencia de *Eucryphia glutinosa* es de 1 ha. Este predio al estar ubicado en sector cordillerano su variabilidad topográfica es alta, por lo que es común encontrar zonas de alta pendiente. En este predio se establecieron tres parcelas fijas de investigación, cada una de 500 m².

Por otro lado, el ecosistema en cuestión posee variabilidad estructural (alta heterogeneidad), dado por la presencia de diversas formas de vida en su sotobosque. En el estrato inferior la línea base describen arbustos, especies herbáceas, trepadoras, helechos y musgos, esto añade un nivel alto de heterogeneidad, lo que contribuye significativamente a la resiliencia y la funcionalidad global del ecosistema, proporcionando hábitats variados y nichos ecológicos para una amplia gama de organismos.

No se observan amenazas al ecosistema, más bien existen procesos endógenos propios del ecosistema. Esto se debe a que el área se encuentra situada en una

región de difícil acceso, donde las condiciones climáticas adversas, como las precipitaciones de nieve y los fuertes vientos, son los factores de caída de árboles más frecuentes. Dada su ubicación remota, los impactos humanos directos son limitados, y en su lugar, los elementos propios del ecosistema, como los eventos climáticos extremos, representan desafíos significativos para la preservación y la sostenibilidad de este entorno natural.

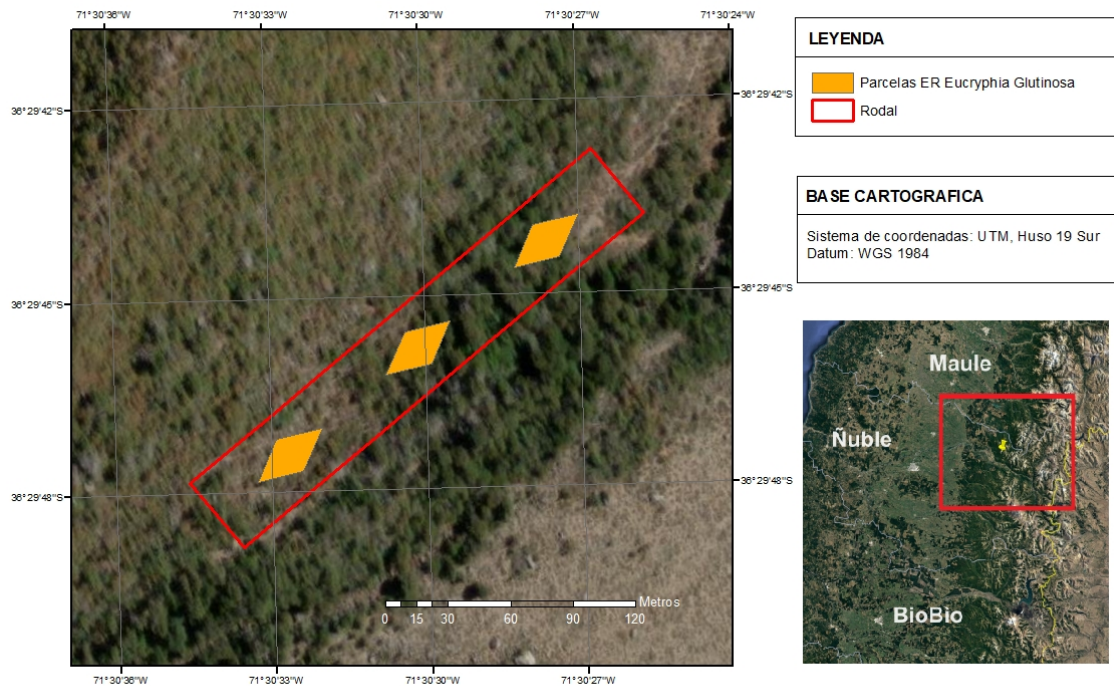


Figura 4. Ubicación de rodal y parcelas del ecosistema de referencia para la especie de *E. glutinosa* en el sitio El Valiente, comuna de San Carlos, región de Ñuble.

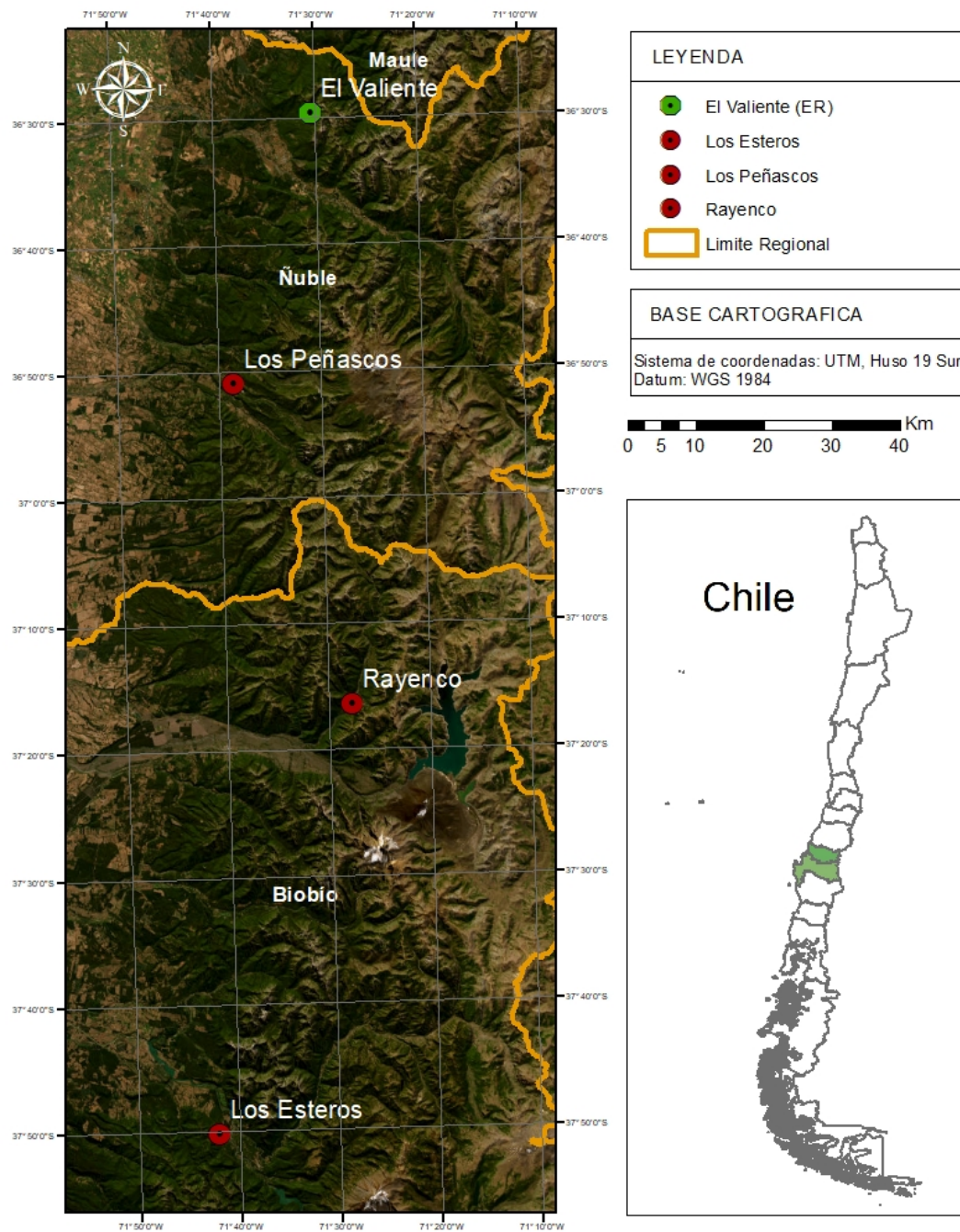


Figura 5. Ubicación de los tres sitios de RE del hábitat de *E. glutinosa* y su ecosistema de referencia, en la Región de Ñuble y Biobío.

2.4 Estrategias de manejo para la restauración ecológica

Las estrategias de manejo implementadas en el proceso de restauración ecológica en los tres predios bajo estudio fueron similares, lo que permite que los sitios sean comparables entre sí, teniendo en cuenta las particularidades inherentes a cada área. Las actividades realizadas en cada predio fueron:

a) Levantamiento de Línea base

b) Preparación del sitio

- Cercado perimetral: Malla Ursus de 85 cm y 3 hebras de alambres de púas, polines de Acacio cada 2,5 m y pie derecho cada 30 m.
- Roce de especies invasoras arbustivas con desbrozadora
- Corte o volteo de especies invasoras arbóreas con motosierra: elimina amenazas y competencia
- Esparcimiento en el suelo de MULCH (material biológico triturado): aporta recubrimiento y retención de humedad.
- Control de rebrote de especies exóticas: Mecánico (motosierra), químico (herbicidas) y biológico (manual).

c) Plantación

- Se plantaron un total de 137555 plantas en los tres sitios de restauración en donde principalmente correspondieron a *P. andina*, *A. chilensis* y *E. glutinosa* como especies objetivo. En especies

acompañantes algunas fueron *Gevuina avellana*, *Drimys winteri*, *Lomatia hirsuta*, *Lomatia dentata*, algunas especies del género *Nothofagus* entre otras.

- Fertilización con 20 gramos de basacote de 6M y bañadas previamente en terreno con una mezcla de Hidrosorb además de un estimulante radicular.
- Empresas: AFI Ltda. (Los Peñascos y Rayenco) y ASP SpA (Los Esteros)

La evaluación de éxito de las estrategias se hizo por medio de indicadores medidos tanto en la línea base como en los monitoreos posteriores, lo que permitió analizar los cambios a lo largo del tiempo y la tasa de éxito de la especie en el ecosistema.

2.5 Recopilación de datos

Los datos recopilados para los análisis subsiguientes comprenden información obtenida durante un trabajo de campo con variaciones temporales de la toma de muestras, recopiladas en el periodo primavera-verano en los años 2021 y 2022. Respecto al predio de Los Esteros (Figura 1), los datos pertinentes se obtuvieron del rodal 1A, en donde se ubican cuatro parcelas permanentes de investigación dirigidas a la restauración ecológica de *E. glutinosa*. Estas parcelas fueron

establecidas durante el levantamiento de la Línea Base (pre-restauración) recopilada en enero de 2021 y luego fueron usadas para los Monitoreos 1 y 2 (ambos post-restauración), obtenidos en enero y noviembre de 2022 respectivamente.

En cuanto a Los Peñascos (Figura 2), los datos recopilados corresponden al rodal 3A, en donde se ubicaron las dos parcelas permanentes de restauración ecológica de las especies objetivo. La línea base se levantó en enero de 2021, mientras que los monitoreos 1 y 2 se llevaron a cabo en enero y noviembre de 2022 respectivamente. En el Monitoreo 2 solo se muestreo la parcela 2 debido a la ausencia de individuos vivos en la primera. Respecto al predio de Rayenco la toma de datos incluyó al rodal 4B y 5A (Figura 3), donde se establecieron dos parcelas fijas de investigación. Sin embargo, únicamente se consideró la Línea Base realizada en enero del 2021, debido a que este predio se incluyó como zona de restauración ecológica de manera tardía. En enero del 2023 se realizó el monitoreo 1, pero al no ser medidas las variables utilizadas para el estudio no fue considerado.

Finalmente, el ecosistema de referencia El Valiente se obtuvo en base a una sola medición que se llevó a cabo en enero del 2023. Se recogieron los datos dentro del rodal 1A, en las 3 parcelas fijas de referencia al ecosistema de guindo santo (Figura 4).

Esta recopilación de datos de campo incluyó la identificación y registro de las especies plantadas en cada parcela, la evaluación de su estado de supervivencia y la documentación precisa del rodal y parcela en la que se encontraban los individuos. También se registraron otros parámetros relevantes, como el diámetro de pecho, la presencia de regeneración y presencia de nuevas amenazas que pudiesen afectar el desarrollo de la vegetación en cada predio de restauración ecológica.

2.6 Selección de variables de los predios de restauración ecológica de *E. glutinosa*

Los criterios de selección de los indicadores de análisis fueron, que sean críticas para el óptimo crecimiento y desarrollo de la especie. Se consideró indicadores de aspecto biofísico, composicional y estructural. Como consiguiente, las variables debían estar disponibles para los tres predios de restauración y para el ecosistema de referencia, caso contrario eran descartadas. Esto con el fin de evitar datos faltantes dentro del análisis estadístico, ya que el NMDS no trabaja con datos faltantes.

Tabla 1. Indicadores y métricas seleccionadas de los atributos biofísicos, composicionales y estructurales de los predios medidos y su ecosistema de referencia correspondiente.

Atributo	Indicador	Métrica	Tamaño de parcela	Frecuencia de medición
Condiciones biofísicas	Características del suelo	Temperatura y humedad ¹	2 x 2 m	Estacional
Composición vegetal	Riqueza por forma de vida (Árboles, arbustos, helechos, trepadoras, musgos y herbáceas)	Número de especies ²	20 x 25 m	Bianual
	Abundancia	Número de individuos ²	20 x 25 m	
Estructura vegetal	Diversidad estructural de las especies arbóreas	Altura y DAP ¹	20 x 25 m	Bianual
	Crecimiento de las especies plantadas	Altura y DAC ¹	20 x 25 m	
	Cobertura sotobosque	Porcentaje de cubrimiento del suelo por especies arbustivas y otras formas de vida	2 x 2 m	
	Dominancia	Área Basal ²	20 x 25 m	
	Densidad	Densidad Arbórea ²	20 x 25 m	
	Regeneración	Cantidad de individuos por m ²	2 x 2 m	

¹ Valor medio de la variable por parcela

² Valor total del conteo de individuos

2.7 Procesamiento de indicadores

2.7.1 Variables biofísicas

Se incluyeron las variables de temperatura y humedad del suelo. Se optó por calcular el promedio de las subparcelas por parcela en los Monitoreos 1 y 2 (medidos en enero y noviembre del 2022 para el caso de Los Esteros y los Peñascos y enero del 2021 para Rayenco), excluyendo la línea base debido a condiciones climáticas adversas que imposibilitaron la recopilación de datos en la parcela. Dado el reducido número de variables disponibles en los muestreos realizados, específicamente humedad y temperatura, se llevaron a cabo pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, conduciendo a una evaluación más completa mediante un ANOVA. A continuación, se generó un gráfico de barras que incorpora los promedios por predio y monitoreo de los coeficientes de humedad y temperatura, proporcionando así una representación visual de las fluctuaciones del indicador a lo largo del tiempo.

Posteriormente, se procedió a realizar un análisis exploratorio bivariado que permitió comprender la tendencia de las variables entre sí, independientemente de la ubicación geográfica. Este análisis, al prescindir de las restricciones zonales, permite identificar posibles relaciones o patrones que podrían haber quedado ocultos.

2.7.2 Variables de composición

Se consideró la riqueza y abundancia de diversas formas de vida, abarcando categorías como la vegetación arbórea, arbustiva, helechos, trepadoras, herbáceas y musgos por cada parcela y su monitoreo correspondiente. Este enfoque integral permitió capturar la complejidad de la biodiversidad presente en el ecosistema bajo investigación. En la fase de análisis, se optó por la aplicación de una herramienta de gran magnitud y versátil, el NMDS mediante el *software* R. El NMDS emplea una regresión monótona de mínimos cuadrados, por lo que la elección depende especialmente de la calidad métrica de los datos de partida (López González et al. 2010). La iniciativa de uso de esta técnica, al ser no métrica, confirió la ventaja de ser aplicable a matrices fundamentadas en diversos coeficientes de similitud (Palacio et al. 2020). Para los rangos de stress permitidos se consideraron como: stress < 0,2 (representación pobre), < 0,15 (buena representación), < 0,1 (muy buena representación) y <0,05 (excelente representación) (Clarke, 1993). Esta flexibilidad metodológica proporcionó un enfoque robusto para la comprensión de las relaciones y patrones presentes en la composición vegetativa.

Adicionalmente, se estimó el índice de diversidad de Shannon (Shannon et al. 1963) de todas las formas de vida, incluyendo el estrato arbóreo. Este índice, reconocido por su capacidad para cuantificar la riqueza de especies en un área

determinada, brindó una medida cuantitativa precisa de la diversidad biológica presente en los predios de estudio. Si una comunidad tiene baja diversidad (dominada por una especie), la incertidumbre de predicción es baja; lo más probable es que una especie muestreada aleatoriamente sea la especie dominante. Sin embargo, si la diversidad es alta, la incertidumbre es alta (Kiernan, 2023). La interpretación de los valores indica que los que se encuentren inferiores a dos se consideran bajos en diversidad y sobre tres son altos en diversidad (Shannon et al. 1963).

La fórmula en la que se basa y se calcula el índice de Shannon es (Jost, 2006):

$$\text{Entropía de Shannon: } H = - \sum p_i \ln p_i$$

Dónde: n_i = el número de individuos de la especie i y N = el número total de individuos de todas las especies.

2.7.3 Variables estructurales

Se aplicaron diversas variables que encapsulan la complejidad y diversidad estructural del ecosistema. Entre estas variables, se incluyeron medidas como el diámetro a la altura de pecho (DAP), diámetro a la altura de cuello (DAC), altura (H), densidad arbórea (p/ha), área basal (m^2), regeneración (p/m^2), y la cobertura de sotobosque (%). La obtención de los valores se llevó a cabo obteniendo un

promedio de los valores monitoreados por subparcela, llevándolos así a parcela, tanto así como en la Línea Base, Monitoreo 1 y Monitoreo 2. La elección de aplicar nuevamente el análisis estadístico de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) se fundamentó en su capacidad para revelar patrones complejos y relaciones no lineales entre estas variables estructurales.

El resultado del NMDS aplicado para las variables composicionales se obtuvo mediante un previo ordenamiento de variables, para los indicadores de DAC, DAP y altura se obtuvieron los coeficientes de variación de los mismos. Debido a que es un indicador más representativo de los cambios que hubieron a lo largo del tiempo en cada parcela de cada predio. Para los rangos de stress permitidos se consideraron como: $\text{stress} < 0,2$ (representación pobre), $< 0,15$ (buena representación), $< 0,1$ (muy buena representación) y $< 0,05$ (excelente representación) (Clarke, 1993). Sin embargo, dado que estas variables poseen unidades de medida distintas, se implementó un proceso de estandarización de datos. Este procedimiento aseguró la coherencia y comparabilidad entre las distintas métricas, permitiendo una interpretación más precisa y fidedigna de los resultados del NMDS.

2.7.4 Análisis complementarios

Con el afán de obtener una comprensión más holística del panorama y la efectividad de las iniciativas de restauración ecológica, se llevaron a cabo dos análisis complementarios. En primer lugar, se implementó un Análisis de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) a nivel global, abarcando todos los indicadores seleccionados. Este enfoque, diseñado meticulosamente, tenía como objetivo principal evaluar la proximidad relativa de los predios entre sí y su éxito en aproximarse al ecosistema de referencia. Una consideración importante durante este proceso fue la exclusión de la Línea Base de Los Peñascos, debido a las limitaciones de datos faltantes ocasionadas por condiciones climáticas adversas que impidieron la recopilación *in situ*. Por causa de que el análisis NMDS no admite elementos vacíos o NA se debió eliminar la fila completa, esto incluyendo variables composicionales y estructurales.

Dada la diversidad de unidades de medida en juego, se ejecutó una cuidadosa estandarización de la matriz de datos para, posteriormente, integrarla en el modelo NMDS en R. Para los rangos de stress permitidos se consideraron como: stress < 0,2 (representación pobre), < 0,15 (buena representación), < 0,1 (muy buena representación) y <0,05 (excelente representación) (Clarke, 1993). Esto permitió la representación gráfica de las relaciones complejas y no lineales entre

los indicadores, proporcionando una visión consolidada de la dinámica del sistema de restauración ecológica.

En paralelo, se desarrolló un análisis específico para dilucidar posibles factores o variables determinantes en la supervivencia de plantas de *E. glutinosa*, evaluada mediante los valores estimados con los individuos vivos en los monitoreos 1 y 2, por lo que se obtuvo el porcentaje de supervivencia de los predios en cuestión. Esta fue la variable predictora. Este análisis implicó la aplicación de regresiones lineales mediante el método Akaike (AIC) a cada variable en cada predio. El criterio de información de Akaike (An Information Criterion, AIC) proporciona un método simple y objetivo que selecciona el modelo más adecuado para caracterizar los datos experimentales. Este criterio, que se enmarca en el campo de la teoría de la información, se define como (Martinez et al. 2019):

$$AIC = -2 \log(L(\theta b)) + 2K$$

Donde $\log(L(\theta b))$ es el logaritmo de la máxima verosimilitud, que permite determinar los valores de los parámetros libres de un modelo estadístico, y K es el número de parámetros libres del modelo.

Esto con el fin de desentrañar la contribución relativa de cada factor a los resultados actuales de los esfuerzos de restauración ecológica. Esta aproximación estadística sofisticada proporcionó un panorama sobre qué aspectos del proceso de restauración están más intrínsecamente ligados al éxito en la supervivencia de *E. glutinosa*, informando de manera valiosa futuras estrategias y ajustes en la gestión de proyectos de restauración.

III. RESULTADOS

3.1 Variables Biofísicas: Humedad y temperatura

Se evidenció una diferencia estadísticamente significativa en las variables de humedad relativa y temperatura entre los distintos sitios de restauración, considerando tanto sus líneas base como los monitoreos 1 y 2 ($p < 0,05$ en ambos casos). Se determinó que, en la línea base, el predio de Los Esteros presentó, en promedio, valores más elevados para ambas variables en comparación con Los Peñascos durante su primer monitoreo de humedad relativa (5,7%) y en el segundo monitoreo para temperatura (15,93 °C). Este último monitoreo registró los valores promedio más bajos (Figura 6 y 7).

El análisis gráfico, elaborado mediante los promedios de temperatura y humedad relativa de los predios por medio de un eje temporal, reveló una fluctuación de los registros durante los sucesivos monitoreos en cada zona (Figura 6 y Figura 7). Adicionalmente, al realizar análisis comparativos con estos datos, se puso en evidencia que los predios experimentaron una disminución en la temperatura promedio tras la restauración ecológica de los ecosistemas. No obstante, estos cambios fueron de carácter estable y de magnitud moderada entre los predios, fenómeno atribuible a la homogeneidad de la varianza ($p = 0,17$).

En contraste, se identificó una diferencia significativa en la humedad relativa entre los diversos sitios. Dada la ausencia de homogeneidad de varianza para esta última variable, se complementó el análisis comparativo con una prueba robusta de igualdad de medias, específicamente la Welch ANOVA, la cual corroboró la existencia de disparidades entre los predios.

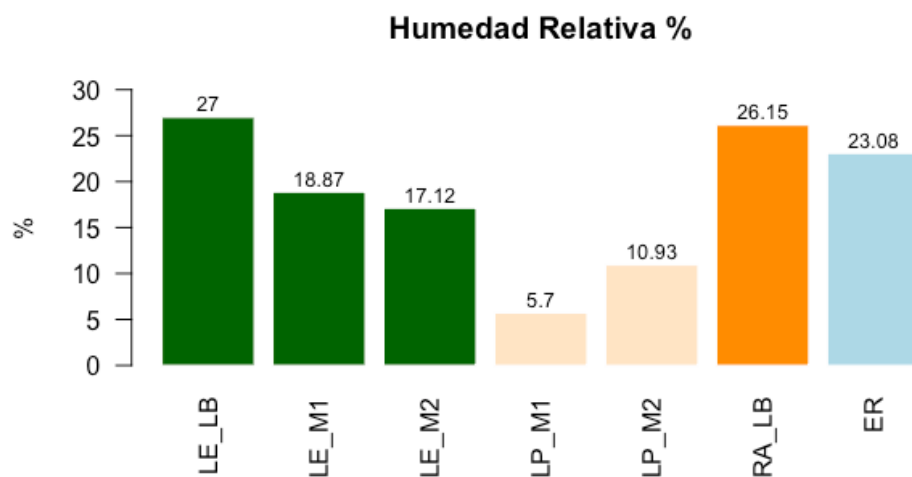


Figura 6. Variación de Humedad Relativa en los distintos sitios de restauración y sus monitoreos correspondientes.

LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente.

Para la humedad relativa los predios que mostraron mayor similitud al ecosistema de referencia fueron Los Esteros (LB) y Rayenco (LB). Sin embargo, a lo largo del monitoreo esta disminuye.

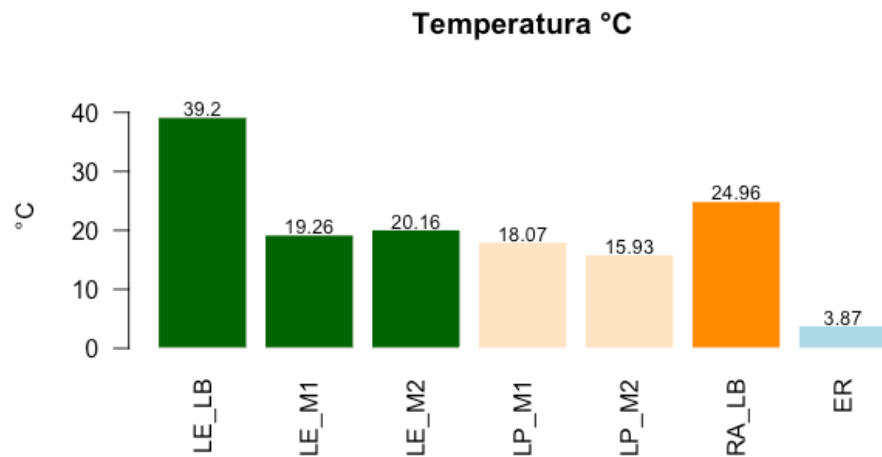


Figura 7. Variación de temperatura en los distintos predios y sus monitoreos correspondientes.

LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER: ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente.

En cuanto a la temperatura pre restauración, los sitios Los Esteros y Rayenco fueron los más altos (Figura 7). En este caso lo que más se asemejan al ecosistema de referencia son el predio de Los Peñascos en su monitoreo uno y dos.

3.2 Variables Composicionales: Riqueza y Abundancia

3.2.1 Índice de Diversidad de Shannon

Gran parte de las parcelas mostraron índices cercanos a dos o mayores que dos. Esto indica alta diversidad de especies, incluyendo formas de vida arbóreas, arbustivas, helechos, trepadoras, herbáceas y musgos, con un total de 60 especies contadas. Se encontraron diferencias significativas en tipos de vida arbóreas y arbustivas ($P>0,05$) de todos los predios del estudio.

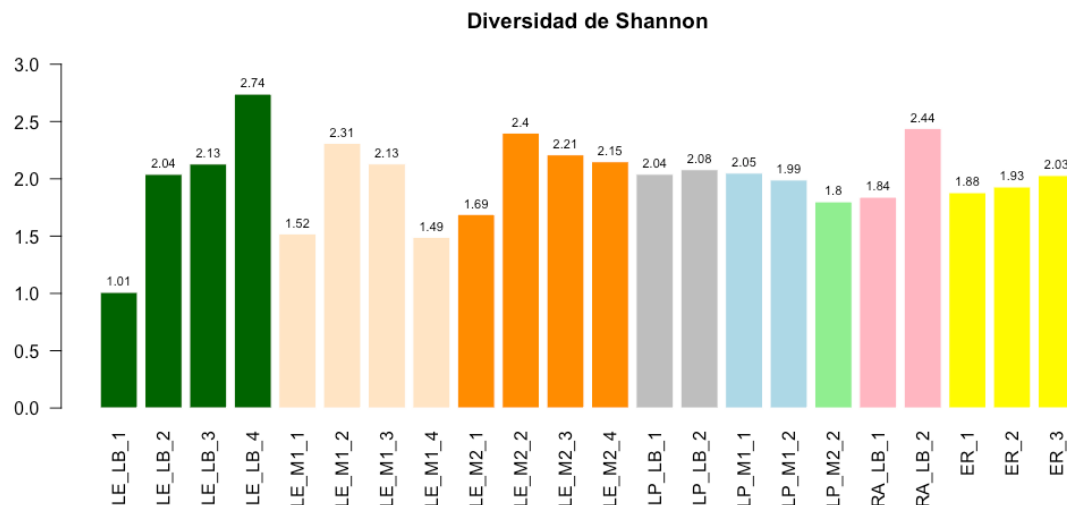


Figura 8. Índice de Diversidad de Shannon.

LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER: ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente. 1,2,3 y 4: número de parcela medida.

3.2.2 Análisis de la composición del ecosistema

Al llevar a cabo el análisis estadístico de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS), se derivó un parámetro crucial: el valor de stress. Este componente reviste importancia primordial al indicar el grado de ajuste del modelo y la confiabilidad inherente de los datos subyacentes. En este caso, el

resultado arrojó un valor de 0,09785387, estimado mediante el método de distancia de Bray-Curtis. Esta cifra, al estar significativamente por debajo de 1, sugiere un ajuste excepcionalmente sólido del modelo. Este nivel de ajuste, respaldado por el valor de stress obtenido, valida la solidez del modelo y, por ende, la integridad de las interpretaciones derivadas del análisis NMDS.

Se obtuvo un patrón distintivo de agrupamiento que se asocia de manera específica con los Monitoreos 1 y 2 tanto en Los Peñascos como en Los Esteros (Figura 19). Este agrupamiento, además, exhibió una notable proximidad al ecosistema de referencia. La cohesión de los datos de monitoreo de Los Peñascos y Los Esteros, especialmente en relación con el ecosistema de referencia, sugiere una convergencia de condiciones y dinámicas que son indicativas de un proceso restaurador exitoso.

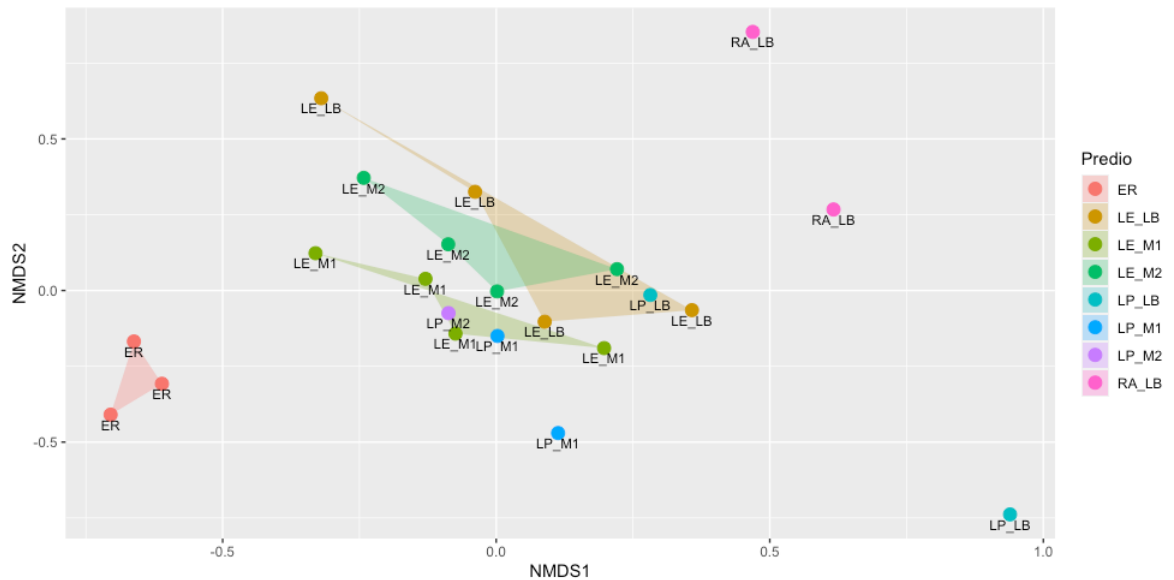


Figura 9. Análisis de comparación entre los predios midiendo su cercanía al ecosistema de referencia en cuanto a la composición vegetal.

LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER: ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente.

3.3 Variables Estructurales

3.3.1 Análisis de la estructura ecosistémica

El proceso de obtención del resultado del NMDS para las variables composicionales implicó un paso preliminar crucial: la organización sistemática de las variables. La corrección de las variables garantizó la coherencia y comparabilidad. El valor del stress obtenido, cifrado en 0,07602799, lo que significa un muy buen ajuste del modelo siendo este de alta confiabilidad, esto mediante el método de distancia Euclidiana utilizada.

En términos de agrupación de datos, el modelo reflejó patrones distintivos (Figura 10). Específicamente, los datos de la Línea Base de los tres predios de restauración ecológica que mostraron una tendencia a agruparse, revelando una proximidad significativa al ecosistema de referencia. En contraste, los datos correspondientes a los monitoreos 1 y 2 de los predios exhibieron una disposición más dispersa, observándose más lejano del ecosistema de referencia de El Valiente.

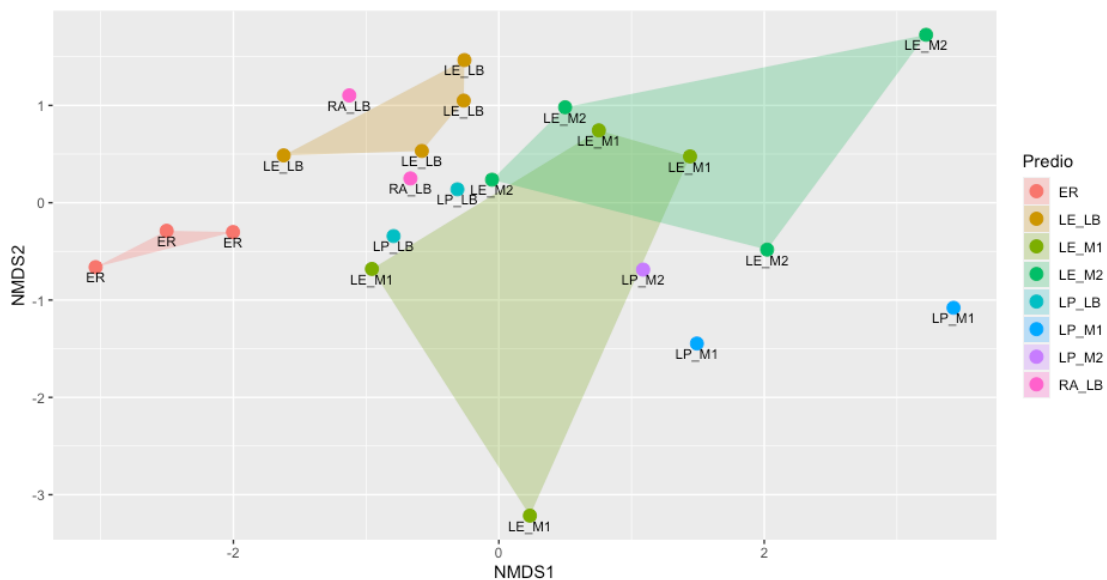


Figura 10. Análisis de comparación entre los predios midiendo su cercanía al ecosistema de referencia en cuanto a los parámetros estructurales de la vegetación.

LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER: ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente.

3.4 Análisis complementarios

3.4.1 Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) para todos los indicadores

Después de una previa estandarización de los datos, estos fueron incorporados al modelo de NMDS, cuyo rendimiento se tradujo en un indicador de stress de 0,07742897. Este valor indica un muy buen ajuste, consolidando la confiabilidad de los resultados, especialmente a través del método de distancia Euclidiana aplicado.

El análisis reveló que los predios de Rayenco y Los Esteros, al considerar sus líneas base, exhibieron una proximidad notoria al ecosistema de referencia, indicando un nivel significativo de semejanza (Figura 11). Aunque los datos de los monitoreos 1 y 2 de Los Peñascos y Los Esteros presentaron cierta dispersión, se observó una similitud relativa al ecosistema de referencia, sugiriendo un progreso alentador hacia el logro de los objetivos deseados a lo largo del tiempo.

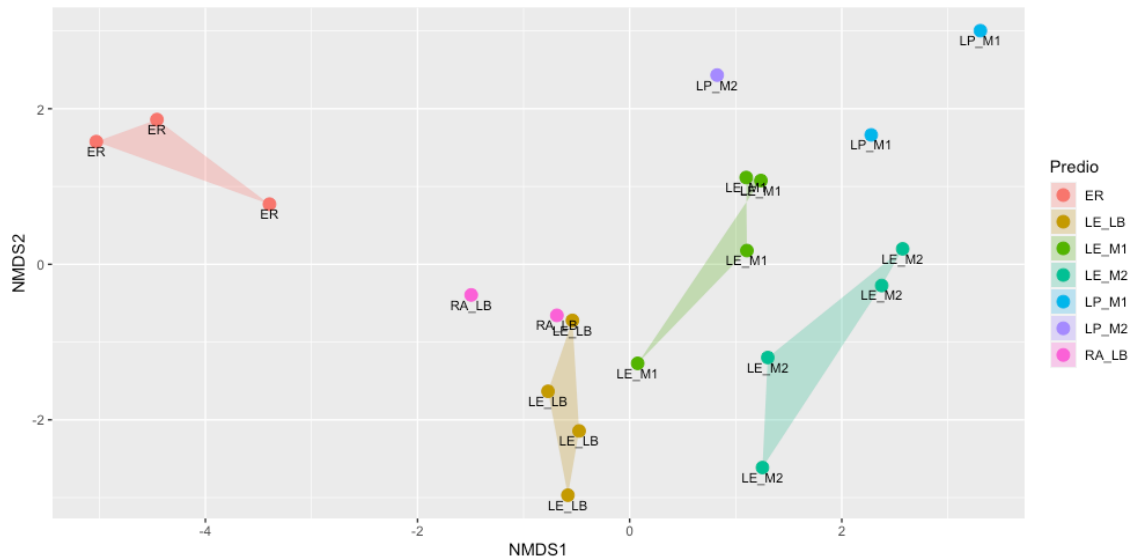


Figura 11 Análisis de comparación entre Predios y sus monitoreos, además de visualizar acercamientos al ecosistema de referencia.

LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER: ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente.

3.4.2 Influencia de variables en la sobrevivencia

Los resultados derivados del método Akaike muestran que ninguno de los coeficientes es estadísticamente significativo dentro de las tasas de sobrevivencia (Tabla 2) de *E. glutinosa*, con respecto al umbral preestablecido ($\Pr(>|t|)) > 0,05$, por lo que se desecharon todos los modelos propuestos. En este caso, un $\Pr(>|t|)$ indica que no hay suficiente evidencia para concluir que alguno de los coeficientes de regresión sea significativamente diferente de cero. Esto podría sugerir que, en el contexto del modelo, las variables predictoras no tienen un impacto estadísticamente significativo en la variable dependiente. Esto reafirma el uso de métodos estadísticos multivariados no lineales (NMDS)

Tabla 2. Porcentaje de sobrevivencia obtenidos para los sitios de restauración. LE: Los Esteros, LP: Los Peñascos, RA: Rayenco, ER: ecosistema de referencia, LB: línea base de los sitios, M1 y M2: Monitoreo 1 y 2, respectivamente. 1,2,3 y 4: número de parcela medida.

Parcela	Sobrevivencia %
LE_M1_1	77,42
LE_M1_2	71,58
LE_M1_3	73,24
LE_M1_4	76,92
LE_M2_1	74,19
LE_M2_2	46,32
LE_M2_3	73,24
LE_M2_4	61,54
LP_M1_1	94,37
LP_M1_2	72,22
LP_M2_2	42,59
RA_LB_1	83,87
RA_LB_2	53,16

IV. DISCUSIÓN

En los resultados se muestra una diferencia estadísticamente significativa en cuanto a la humedad relativa y temperatura para los predios. Para Los Esteros existió una disminución de la humedad relativa con respecto al tiempo, evidenciada en los monitoreos 1 y 2 post plantación. Esto es debido a que por lo general, un incremento en la abertura del dosel en un bosque conlleva a un aumento en ingreso de la luz solar, generando un impacto en las condiciones ambientales en las proximidades del suelo, manifestándose mediante el aumento de la temperatura y la humedad relativa (Hardwick, 2015). Por otro lado, en Los Peñascos se evidencia un aumento de un 5% de humedad, esto pudiéndose deber a factores como mayor cobertura de dosel (Hardwick, 2015). Los sitios que más se asemejan al ecosistema de referencia en cuanto a humedad relativa corresponderían a las líneas base de Rayenco y Los Esteros, con una diferencia de un 3% y un 4% al valor del ecosistema de referencia.

Para el caso de la temperatura se observa un descenso después de la plantación, con una diferencia de 20 °C para el caso de Los Esteros con respecto a su línea base (39 °C) y Los Peñascos con -3 °C con respecto a su monitoreo anterior (18°C). Sin embargo, el predio que muestra mayor similitud es Los Peñascos. Se observan casos o sitios específicos en donde la correlación es inversa (mayor humedad, menor temperatura) y en otras es positiva (mayor humedad, mayor

temperatura). Esto se puede explicar debido que la modificación de la cobertura del dosel puede inducir transformaciones en las condiciones ambientales, afectando la humedad, temperatura y la cantidad de luz que ingresa al bosque (Brown, 1993).

El Índice de diversidad de Shannon indicó una alta riqueza de especies, abarcando no solo aquellas del estrato arbóreo y arbustivo, sino también incluyendo formas de vida como helechos, trepadoras, herbáceas y musgos. A pesar de que las plantaciones son solo de especies arbóreas, se crean ambientes propicios para el crecimiento de todo tipo de formas de vida. Esto debido específicamente a la restauración ecológica llevada a cabo en los tres sitios de estudio por Foresta Nativa. La incorporación de especies en categorías de amenaza y especies acompañantes aumenta la diversidad de la flora de los sitios restaurados, incluyendo riqueza y abundancia. Este resultado sugiere con confianza que las estrategias de restauración implementadas para restaurar la composición vegetal han tenido un impacto positivo y significativo, fomentando la recuperación de una comunidad diversa y equilibrada de especies.

El modelo de NMDS referido a la composición de los predios de estudio demuestra de manera gráfica la cercanía al ecosistema de referencia de algunos sitios restaurados, mediante la representación de las proximidades entre un conjunto de elementos como distancias en un espacio de un número reducido de

dimensiones (López González et al. 2010). Para el predio de Los Esteros, se observó una cercanía en el monitoreo 1 y 2 al ecosistema de referencia lo que demuestra que el ecosistema se dirige a una trayectoria de recuperación. Para el caso de Los Peñascos la diferencia entre monitoreos es notoria. El monitoreo 1 ya muestra signos de tener éxito, sin embargo, el monitoreo 2 muestra aún más avance, igualándose a la tasa de éxito de Los Esteros. Esto indica que este predio también tuvo éxito en cuanto se trata de composición. Es posible que la modificación del dosel en los sitios de Los Esteros y Los Peñascos influya en el dinamismo en el bosque, lo que modifica la fenología del lugar y la composición de la misma (Koltunov et al. 2009). Rayenco no muestra similitud al ecosistema de referencia, sin embargo, no existe monitoreo posterior con el cual referenciar su avance por lo que aún no es completamente medible y comparable.

El análisis de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS) aplicado a los indicadores de estructura revela una dinámica notablemente diferente en comparación con la evaluación de la composición. En este contexto, los datos se agrupan de manera más cercana o similar al ecosistema de referencia, especialmente en las Líneas Base de cada predio y parte del monitoreo 1 de Los Esteros. No obstante, esta discrepancia no debe interpretarse como un indicador negativo, sino más bien como un resultado lógico y esperado. Posterior a la plantación, la heterogeneidad en el Diámetro a la Altura de Pecho (DAP) se incrementa sustancialmente, dado que la población incluye individuos con DAP

superior a 5 cm, DAP inferior a 3 cm y variaciones en la altura de las plántulas. La eliminación o plantación de especies cambia la composición y estructura del bosque de forma que puede alterar la función forestal y los intercambios biosfera-atmósfera de dióxido de carbono, vapor de agua y energía (Koltunov et al. 2009). La apertura del dosel es mayor en Los Esteros y Los Peñascos y se incrementa la luminosidad en sotobosque. Este factor ayuda a las plantas en alcanzar máximas alturas, ya que las plantas pueden desarrollar sus procesos fisiológicos adecuadamente (García, 2023).

Como es bien sabido, el eje estructural de la mayoría de los ecosistemas terrestres es la vegetación, tanto en diámetro como altura (Gil-Leguizamon et al. 2018). Cabe mencionar, que es el flujo de energía dentro de estos y la riqueza de interacciones inherentes lo que les proporciona sus cualidades particulares y funcionalidad (Gil-Leguizamon et al. 2018). Por lo tanto, es comprensible observar que los predios que exhiben una mayor diversidad estructural tienden a ubicarse más distantes de El Valiente en el espacio de las dimensiones evaluadas por el NMDS. Este patrón refleja la naturaleza dinámica y cambiante de las comunidades vegetales restauradas, subrayando la importancia de considerar la heterogeneidad estructural como un indicador positivo del proceso de recuperación ecológica.

Al realizar una evaluación más holística de los sistemas restaurados, se integran todas las variables contempladas en el modelo de este análisis. Es esencial destacar que en este modelo se excluyen todos los indicadores asociados a la Línea Base del predio Los Peñascos debido a la ausencia de datos de humedad y temperatura en este contexto específico. La omisión de estos datos se debe a la incompatibilidad del modelo NMDS con valores faltantes (NA), y la opción de reemplazarlos con cero podría inducir interpretaciones erróneas, ya que el modelo consideraría este valor como real, afectando la integridad y la interpretación del estudio.

En un análisis general en donde se incluyen tanto los aspectos biofísicos, composicionales y estructurales de los sitios de restauración, se determinó que los datos de la Línea Base de Rayenco y Los Esteros se agrupan cercanos al ecosistema de referencia (ER), mientras que los datos correspondientes a los monitoreos de Los Esteros y Los Peñascos exhiben una dispersión más pronunciada. Esta tendencia, similar al análisis de la estructura, indica no una deficiencia, sino una mayor heterogeneidad post restauración. Este patrón es indicativo del éxito de los esfuerzos de restauración ecológica y la eficacia de las estrategias de manejo implementadas para fomentar la recuperación y diversidad de los sistemas vegetales restaurados. Este diseño garantiza una estructura de edades en forma de generaciones sucesivas, y ayuda a preservar la heterogeneidad estructural (Rozas , 2005).

La meta principal sobre la conservación y el manejo de ecosistemas puede resumirse como la preservación de la integridad del ecosistema en relación a las necesidades humanas (Cuevas, 2010). La conservación se basa principalmente en la estabilidad ecológica y su relación con las perturbaciones de origen antropogénico, donde la estabilidad es caracterizada por dos principales componentes, la resistencia y la resiliencia (Cuevas, 2010). Esto debido principalmente a los atributos del ecosistema que se recuperan mediante las acciones de restauración. Posteriormente los atributos indirectos como la resiliencia, resistencia e integridad pueden utilizarse como indicadores de la salud de los ecosistemas (Ojeda Suárez et al. 2017). Estudios de monitoreo de la composición de especies de árboles en bosques deciduos y de coníferas a través del tiempo, muestran que la resiliencia es un buen indicador del estado del ecosistema, ya que en pocos años existe un incremento en la composición de especies por sucesión natural revelando que las perturbaciones naturales tienen poco efecto sobre las especies (Leak & Smith, 1996, Cuevas, 2010).

Los resultados obtenidos del método Akaike revelan que ninguno de los indicadores contemplados en el método presenta significancia estadística en relación con el índice de supervivencia (Martínez et al. 2019), pero todas las variables mostraron índices muy altos. Sin embargo, esto no significa necesariamente que los coeficientes no tengan importancia o relevancia dentro

de las tasas de sobrevivencia de *E. glutinosa*, sino, que no explica la variación de la variable respuesta.

La combinación de las estrategias de manejo aplicadas en los sitios de restauración demuestra que las acciones están encaminadas a una correcta trayectoria de recuperación del ecosistema. Este tipo de estudios ofrece demostraciones de la capacidad de recuperación natural de bosques perturbados mediante la eliminación y/o control de las limitaciones y factores de degradación del ecosistema, lo cual actualmente sustenta las acciones de regeneración asistida (Smith et al. 2015). Si el daño hubiese sido relativamente bajo y se retuviese la capa superficial del suelo, con marcos de tiempo suficientes y poblaciones cercanas para permitir la recolonización de plantas (SER, 2019) se hubiese podido aplicar la regeneración natural. Sin embargo, no es el caso de regeneración natural ni reconstrucción, en donde solo se aplica si el daño es alto y es necesario eliminar o revertir todas las causas de degradación y corregir todos los daños bióticos y abióticos para adaptarlos al ecosistema de referencia nativo identificado. Además, también es necesario reintroducir la totalidad o una parte importante de la biota deseable siempre que sea posible (SER, 2019).

4.1 Limitaciones para esta investigación

Debido a las condiciones climáticas para el caso de Los Peñascos, no se realizaron mediciones de temperatura y humedad relativa. Debido a esto como el modelo multivariado no paramétrico de datos no trabaja con datos faltantes (NA), se debió omitir la línea base y todas sus variables de este sitio para los análisis NMDS general.

Los ecosistemas naturales que se encuentran cercanas a zonas antrópicas son altamente vulnerables a factores como degradación y disminución de la biodiversidad (Venter et al. 2016). Además, estos impactos negativos generan pérdidas de los servicios ecosistémicos tales como regulación, provisión, cultural y de soporte, evitando que el ecosistema se recupere naturalmente y sea necesaria una restauración asistida. Por tal motivo, la restauración ecológica es una alternativa viable para recuperar ecosistemas degradados, servicios ecosistémicos y la biodiversidad (Celi, 2022), por lo que, es crucial abordar los resultados de los análisis realizados con cautela para evitar interpretaciones erróneas. Se debe tener en cuenta que los modelos de análisis presentan escenarios posibles basados en los datos proporcionados, pero no capturan la realidad en su totalidad por la inaccesibilidad a algunos elementos o los errores en los instrumentos de medida. La existencia de datos ausentes nunca debe impedir la aplicación del análisis multivariante (Pérez, 2004). Esto se debe a la desviación típica que es una denominación que se reserva a la muestra y a la

población, cuando se refiere a un parámetro estimado, la media, la tendencia u otro se denomina error estándar (Montero, 2016).

Mientras las perturbaciones no explicadas por el modelo tengan alguna forma definida puede significar que el modelo adolece de alguna falta de variable explicativa o de algún defecto estructural (Montero, 2016). La falta de significancia estadística de un factor en el análisis no implica necesariamente que en un escenario real carezca de importancia; se debe considerar que el sistema es un constante dinámico sujeto a la estocasticidad ambiental y a factores específicos de cada zona. Además, la limitación en la disponibilidad de datos a lo largo del tiempo dificulta obtener una visión temporal completa de cómo fluctúan los factores a lo largo de los años, lo que subraya la necesidad de interpretar los resultados con prudencia y considerar la complejidad y dinámica inherente de los sistemas naturales.

V. CONCLUSIONES

Las estrategias implementadas en la preparación del predio desempeñaron un papel crucial al proporcionar un entorno propicio para el establecimiento y crecimiento de las plántulas de la especie objetivo. Desde iniciado el proceso de restauración, se evidencia un incremento la riqueza y diversidad estructural a lo largo del tiempo refleja el éxito de las acciones de restauración, incluso a pesar de las inevitables pérdidas de individuos. La consideración de la estocasticidad ambiental resalta la existencia de un dinamismo constante y único en el ecosistema restaurado. Este reconocimiento subraya que todos los factores involucrados en el proceso de restauración son interdependientes y contribuyen al éxito global, formando un conjunto de variables que se correlacionan entre sí.

Esto indica que el enfoque de restauración aplicado en los predios de restauración ecológica permite que el hábitat degradado se mueva a la trayectoria deseada para la persistencia de la especie en el paisaje.

Esta interconexión de factores es fundamental para comprender la complejidad de los procesos de restauración ecológica y resalta la necesidad de adoptar enfoques integrales para garantizar el logro sostenible de los objetivos de conservación y biodiversidad.

VI. GLOSARIO

Área basal (AB): El área basal es una medida forestal utilizada para cuantificar la superficie total de sección transversal de los troncos de los árboles en un área determinada. Se expresa generalmente en metros cuadrados por hectárea (m^2/ha).

Diámetro de altura de cuello (DAC): El Diámetro a la Altura de Cuello (DAC) es una medida forestal que se refiere al diámetro de un árbol medido a una altura específica conocida como "altura de cuello". La altura de cuello generalmente se refiere a una altura por encima del nivel del suelo, pero por debajo del DAP (diámetro a la altura del pecho).

Diámetro de altura de pecho (DAP): Es una medida estándar en silvicultura y manejo forestal que se utiliza para evaluar el tamaño de los árboles. Este diámetro se mide a una altura específica del tronco, comúnmente a 1.30 metros (aproximadamente a la altura del pecho de una persona adulta).

Ecosistema de referencia (ER): Es un modelo que representa una aproximación a las metas de restauración.

Línea base (LB): Una línea base es una descripción detallada y cuantitativa de las condiciones naturales y los patrones de un ecosistema o área específica en un momento determinado, antes de que se realicen intervenciones humanas significativas o cambios ambientales notables. Sirve como un punto de referencia contra el cual se pueden comparar futuros cambios.

Monitoreo: Es un proceso sistemático y continuo de recopilación de datos para evaluar y entender los cambios en los componentes bióticos y abióticos de un ecosistema a lo largo del tiempo.

Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS): Es una técnica estadística utilizada para visualizar la similitud o disimilitud entre conjuntos de datos multivariados. Su objetivo principal es representar de manera gráfica y significativa la estructura de similitud entre muestras sin hacer supuestos específicos sobre la distribución de los datos. Es especialmente útil cuando los datos no cumplen con los requisitos de normalidad y linealidad que podrían necesitarse en otras técnicas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Aguayo, M., Pauchard, A., Azocar, G., & Parra, O. (2009). *Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje*. Revista chilena de historia natural, 4.

Aguirre M, N., Torres C, J., & Velasco-Linares, P. (2013). *Guía Para La Restauración Ecológica en los Páramos del Antisana*. Quito: Ministerio del Ambiente, Ecuador.

Brown, N. (1993). *The implications of climate and gap microclimate for seedling growth conditions in a Bornean lowland rain forest*. Journal of Tropical Ecology, 16.

Celi, O. (2022). *Propuesta de restauración ecológica de la quebrada Carapungo de Quito*. Quito: Universidad Tecnológica Indoamerica.

Clarke, R. (1993). *Nonparametric Multivariate Analyses of Changes in Community Structure*. Australian Journal of Ecology, 27.

Cuevas Reyes, P. (2010). *Importancia de la resiliencia biológica como posible indicador del estado de conservación de los ecosistemas: implicaciones en los planes de manejo y conservación de la biodiversidad*. Biológicas , 1-7.

Donoso, P., Promis, A., & Soto, D. (2018). *Silvicultura en bosques nativos: Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos*. Valdivia: Imprenta America.

Echeverría L, C., Gatica S, P., Roman S, S., Bordeu S, A., & Espinoza F, C. (2021). *Más allá de la deforestación: Restauración ecológica de bosques nativos en el Parque Nacional Nonguén, Chile*. Concepción: Universidad de Concepción.

Echeverría, C., & Rodríguez, R. (2014). *Caracterización de Eucryphia glutinosa, Citronella mucronata, Prumnopitys andina y Orites myrtoidea según los criterios de la UICN*. Concepción: Universidad de Concepción.

Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J., Lara, A., & Newton, A. (2006). *Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests*. ELSEVIER, 481–494.

Echeverría L., C., Aguayo A., M., & Gatica S., P. (2022). *Entregable 16. Informe de actividades de investigación 2. Plan de restauración ecológica de especies amenazadas: guindo santo, ciprés de la cordillera y lleuque en el marco de la RCA 10/1997 Central Hidroeléctrica Ralco*. Concepción: Iniciativa Foresta Nativa, Universidad de Concepción.

F. Clewell, A., & Aronson, J. (2007). *Ecological Restoration*. Washington, D.C: Island Press.

Foresta Nativa. (27 de 05 de 2015). *Foresta Nativa: Una iniciativa de la Universidad de Concepción*. Obtenido de Foresta Nativa: Una iniciativa de la Universidad de Concepción: <https://www.forestanativa.org/>

García, F. (2023). *Efecto de las condiciones edafoclimáticas en la regeneración natural de Clusia pseudomangle Planch & Triana (lalush), en el bosque montano Los Lanches, Chota*. Chota: Universidad Nacional Autónoma de Chota.

Gil-Leguizamon, P., Alvarado Fajardo, V., Parada Rendon, J., Rincon Puerta, D., Hernandez Velandia, D., Prado Castillo, L., . . . Reyes Camargo, J. (2018). Capítulo 5: Restauración Ecológica del bosque andino en la vertiente oriental del PNN SYA, HATO, Santander: Avances. En L. Prado Castillo, D. Caro Melgarejo, D. Rincon Puerta, J. Parada Rendon, & M. Morales Puentes, *Caminando entre huellas de Yariguies: La gente y la ciencia en la gestión temprana de la restauración ecológica del área protegida* (págs. 141-207). Boyaca: Universidad Pedagógica Y Tecnológica de Colombia.

Hardwick, S. R. (2015). *Interactions between vegetation and microclimate in a heterogeneous tropical landscape*. Agricultural and Forest Meteorology, 201, 187-195.

Hechenleitner V, P., Gardner, M., Thomas , P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless, P., & Martinez A, C. (2005). *Plantas Amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribucion, Conservacion y Propagacion*. Valdivia: Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. .

Hobbs, R. (2003). *Ecological management and restoration: Assessment, setting goals and measuring success*. Ecological Management & Restoration , 2.

Holl, K. (2023). *Introducción a la Restauración Ecológica*. Ciudad de México : Coplt-arXives UNAM.

Jost, L. (2006). *Entropy and Diversity*. OIKOS, 14.

Kiernan, D. (2023). *Biometria de Recursos Naturales (Kiernan)*. California: Universidad Estatal de California y Merlot.

Koltunov , A., Ustin, S., Asner, G., & Fung, I. (2009). *Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis*. ELSEVIER, 10.

Leak, W., & Smith, M. (1996). *Sixty years of management and natural disturbance in a New England forested landscape*. Forest Ecology and Management , 63-73.

López González , E., & Hidalgo Sánchez , R. (2010). *Escalamiento Multidimensional No Métrico. Un ejemplo con Remplendo el algoritmo SMACOF*. ESTUDIOS SOBRE EDUCACIÓN / VOL. 18, 27.

MMA. (27 de 06 de 2022). *Inventario nacional de especies de Chile*. Obtenido de Inventario nacional de especies de Chile: <http://especies.mma.gob.cl>

Martinez, D., Albin, J., Cabaleiro, J., Pena, T., Rivera, F., & Blanco, V. (2019). *El Criterio de Información de Akaike en la Obtención de Modelos Estadísticos de Rendimiento*. Jornadas de Paralelismo, 1-6.

Montero, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada*. España: Universidad de Granada.

Neira, E., Zamorano E, C., Cayuela, L., & Lara, A. (2014). *Evaluación del estado de conservación de Citronella mucronata, Eucryphia glutinosa y Persea lingue*. Valdivia: Bosque Nativo.

Ojeda Suárez, R., Spoor, M., & Estrada, M. (2017). *En índice de desempeño ambiental y la resiliencia social en los ecosistemas*. Universidad y Sociedad, 1-6.

Palacio, F., Apodaca, M., & Cricsi, J. (2020). *Análisis Multivariado Para Datos Biológicos*. Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de AZARA.

Perez L., C. (2004). *Técnicas de Análisis Multivariante de Datos*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.

Poeppig, E., & Endlicher, E. (s.f.). *Nova genera ac species plantarum, quas in regno Chilensi Peruviano et in terra Amazonica :annis MDCCCXXVII ad MDCCCXXXII*.

Retamales, H., & Morales, N. (2022). *Árboles de Chile: Taxonomía, ecología y conservación de todas las especies arbóreas nativas de Chile*. Santiago: Bosque Chileno.

Rodríguez, R. (2004). *Monografía Guindo Santo (Eucryphia glutinosa) especie con problemas de conservación en Chile*. Santiago: ENDESA.

Rozas , V. (2005). *Heterogeneidad estructural y patrones espaciales en un bosque caducifolio maduro: Implicaciones para la restauración y la gestión sostenible*. Pontevedra: Sociedad Española de Ciencias Forestales.

SER. (2016). *Estandares Internacionales para la practica de la restauracion ecologica - incluyendo principios y conceptos clave*. Washignton, D.C: Society for Ecological Restoration.

SER. (2004). *Principios de SER International sobre la restauración ecológica*. Tucson: Society for Ecological Restoration International.

SER. (2019). *Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica. Segunda edición*. Restoration Ecology, 27.

Shannon, C., & Weaver , W. (1963). *The Mathematical Theory Of Communication*. Illinois: Board of Trustees of t ho Umvorsity of Illinois.

Smith R, C., Gonzalez, M., Echeverría, C., & Lara, A. (2015). *Estado actual de la Restauración ecológica en Chile, perspectivas y desafíos*. Anuales del Instituto de la Patagonia.

Strassburg, B.B.N., Iribarrem, A., & Beyer, H.L. et al. (2020). *Global priority areas for ecosystem restoration*. Nature , 586, 724–729.

UICN. (2012). *Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN*. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: UICN.

Vargas, O. (2011). *Restauracion Ecológica: Biodiversidad y Conservación*. SciELO, 21.

Vargas Larreta, B. (2013). *Manual de mejores practicas de manejo forestal para la conservacion de la biodiversidad en ecosistemas templados de la region norte de Mexico*. Jalisco: Impresos Florida S.A.

Vargas, O. (2008). *Estrategias para la restauracion ecologica del bosque Altoandino El caso de la Reserva Forestal Municipal de Cogua, Cundinamarca*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.

Venter, O., Magrach, A., W. Sanderson, E., R. Allan, J., Beher, J., R. Jones, K., . . . EM Watson, J. (2016). *Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation*. Nature Communications, 11.

VIII. APÉNDICE

Anexo 1. Tabla de registro de datos de variables biofísicas, composicionales y estructurales

[illegible]

Anexo 2. Test de ANOVA para humedad relativa

	F	df1	df2	p
Humedad	15,33629	5	6,014798	0,0022828

Anexo 3. Test de ANOVA para temperatura

	F	df1	df2	p
Temperatura	68,29814	5	6,102858	0,0000288

