

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y MEDIOAMBIENTE
UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA



**Caracterización de los patrones espaciales de bosques originales no perturbados
en islas menores del Archipiélago de Chiloé, Región de Los Lagos.**

Actividad de Titulación presentada en la modalidad de Formulación, Diseño y/o Ejecución de Proyectos, como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero(a) en Recursos Naturales de la Universidad de La Frontera.

SAMANTHA ANAÍS GUZMÁN NAVARRO
PROFESOR GUÍA: RODRIGO IGNACIO VARGAS GAETE
TEMUCO – CHILE
21 DE ENERO 2025

INDICE

1. RESUMEN	5
2. SUMMARY.....	6
3. INTRODUCCIÓN	7
4. MARCO TEÓRICO	9
5. OBJETIVO GENERAL	12
6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
7. MATERIAL Y MÉTODOS	13
7.1 ÁREA DE ESTUDIO	13
7.2 TOMA DE DATOS	17
7.3 ANÁLISIS DE DATOS.....	17
7.3.1 Distribución espacial: K de Ripley.....	18
7.3.2 Identificación de núcleos de individuos: Algoritmo de Plotkin	19
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
8.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	21
8.1.1 Total de individuos	21
8.1.2 Grupos funcionales de tolerancia a la sombra.	25
8.2 IDENTIFICACIÓN DE NÚCLEOS DE ÁRBOLES	28
8.2.1 Total de individuos	28
8.2.2 Grupos funcionales de tolerancia a la sombra	36
8.2.3 Recomendaciones para la restauración con patrones espaciales en bosques insulares.....	42
9. CONCLUSIONES Y CUMPLIMIENTO DEL PERFIL PROFESIONAL.....	44
10. AGRADECIMIENTOS	47
12. ANEXOS Y APENDICES	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de especies para cada bosque y su riqueza respectivamente considerando individuos con DAP > 10 cm. Fuente: Elaboración propia.	15
Tabla 2. Abundancia absoluta y relativa para cada bosque considerando individuos con DAP > 10 cm. Fuente: Elaboración propia.....	15
Tabla 3. Análisis función K de Ripley para los bosques de Butachauques, Lemuy y Talcan. Patrones espaciales se constituyen en agrupación, aleatorio y dispersión, cada uno de estos presentan valores de distancia en metros.....	24
Tabla 4. Análisis función K de Ripley para los bosques de Butachauques, Lemuy y Talcan para grupo funcional de tolerancia a la sombra. Patrones espaciales se constituyen en agrupación, aleatorio y dispersión, cada uno de estos presentan valores de distancia en metros.....	27
Tabla 5. Distribución de los individuos agrupados en diferentes tamaños de núcleo en función del área buffer (m) para bosque de Butachauques.	29
Tabla 6. Distribución de los individuos agrupados en diferentes tamaños de núcleo en función del área buffer (m) para bosque de Lemuy.	29
Tabla 7. Distribución de los individuos agrupados en diferentes tamaños de núcleo en función del radio buffer (m) para bosque de Talcan.....	31
Tabla 8. Resumen sobre núcleos: Total de núcleos, individuos por núcleos y el área respectiva a los núcleos.	32
Tabla 9. Resumen sobre núcleos: Total de núcleos, individuos por núcleos y el área respectiva a los núcleos para grupo funcional de tolerancia a la sombra.....	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. El área de estudio pertenece a las tres islas menores del archipiélago de Chiloé: Isla Butachauques, Isla Lemuy e Isla Talcan. En el mapa se observa cada isla con su respectivo uso de suelo.	14
Figura 2. Diagrama del análisis de datos. Cada análisis se realizó para el total de individuos, como para los grupos funcionales de especies intolerantes, semitolerantes y tolerantes.	17
Figura 3. Algoritmo de Plotkin. Identificación de núcleos de individuos. Elaboración propia a partir de Plotkin et al. (2002).	19
Figura 4. Función K de Ripley para Bosque Butachauques.	22
Figura 5. Función K de Ripley para Bosque Lemuy.	22
Figura 6. Función K de Ripley para Bosque Talcan	23
Figura 7. Función K de Ripley para para los bosques de Butachauques, Lemuy y Talcan para grupo funcional de tolerancia a la sombra.....	26
Figura 8. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Butachauques, considerando individuos con un DAP mayor a 10 cm (n=1073). El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.	29
Figura 9. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Lemuy, considerando individuos con un DAP mayor a 10 cm (n=634). El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.	30
Figura 10. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Talcan, considerando individuos con un DAP mayor a 10 cm (n=930). El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.	31
Figura 11. Mapa de fustes con radio buffer de 1.5 m aplicado en bosque de referencia de Butachauques.	33
Figura 12. Mapa de fustes con radio buffer de 1.5 m aplicado en bosque de referencia de Lemuy.	34
Figura 13. Mapa de fustes con radio buffer de 1.5 m aplicado en bosque de referencia de Talcan.	35
Figura 14. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Butachauques, considerando grupo funcional de tolerancia a la sombra. El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.	37

Figura 15. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Lemuy considerando grupo funcional de tolerancia a la sombra. El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños..... 38

Figura 16. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Talcan, considerando grupo funcional de tolerancia a la sombra. El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños..... 39

1. RESUMEN

La presente investigación se centra en la caracterización de los patrones espaciales en bosques originales no perturbados de las islas menores del Archipiélago de Chiloé, con el objetivo de generar recomendaciones de restauración ecológica para bosques degradados. Este estudio se enmarca dentro del proyecto FIBN-CONAF 007/2019, enfocado en desarrollar métodos de restauración para fortalecer la resiliencia de bosques insulares siempreverdes.

El área de estudio incluyó las islas Butachauques, Lemuy y Talcan tomando en consideración relictos de bosques originales no perturbados como ecosistema de referencia. Se analizaron patrones espaciales utilizando herramientas estadísticas como la función K de Ripley y el algoritmo de Plotkin, considerando individuos arbóreos y grupos funcionales según tolerancia a la sombra. Estos análisis permitieron evaluar la distribución espacial, identificar núcleos de árboles y determinar tamaños y densidades de estos.

Los resultados evidenciaron que, en los tres bosques analizados, predominan patrones agrupados a distintas escalas espaciales, lo que refleja la heterogeneidad estructural propia de los ecosistemas de referencia. Los núcleos variaron en número, tamaño y cantidad de individuos entre los bosques, destacándose Lemuy por su mayor cantidad de núcleos con menor número de árboles, mientras que Talcan presentó núcleos más grandes y menos numerosos. Adicionalmente, se identificaron diferencias en la distribución de los grupos funcionales, destacando los individuos tolerantes a la sombra por su tendencia a formar núcleos más amplios.

Con base en estos hallazgos, se proponen recomendaciones prácticas para la restauración, como la incorporación de núcleos de plantación con 3 a 6 árboles por núcleo, el uso de grupos funcionales para promover la heterogeneidad estructural y la conectividad entre núcleos para evitar fragmentación. Estos enfoques buscan replicar la distribución natural observada en los ecosistemas de referencia y facilitar la recuperación de funciones ecológicas y servicios ecosistémicos en áreas degradadas.

Este trabajo destaca la importancia de considerar los patrones espaciales como un atributo clave en los planes de restauración, contribuyendo a una visión más integrada y efectiva en la gestión de los bosques insulares de Chile, además de aportar al desarrollo de estrategias replicables en otros contextos.

2. SUMMARY

This study focuses on the characterization of spatial patterns in undisturbed original forests of the smaller islands in the Chiloé Archipelago, aiming to generate recommendations for ecological restoration. The research is part of the FIBN-CONAF 007/2019 project, which seeks to develop restoration methods to enhance the resilience of evergreen island forests.

The study area included the islands of Butachauques, Lemuy, and Talcan, which represent reference ecosystems due to their biodiversity and absence of fragmentation caused by human activities. Spatial patterns were analyzed using Ripley's K function and Plotkin's algorithm, considering both tree individuals and their functional groups based on shade tolerance. These analyses allowed for the evaluation of spatial distributions, identification of tree clusters, and determination of their sizes and densities.

The results revealed that clustered patterns dominate at various spatial scales in all three forests, reflecting the structural heterogeneity characteristic of reference ecosystems. Clusters varied in number, size, and tree count among the forests, with Lemuy showing the highest number of clusters with fewer trees, while Talcan had larger but fewer clusters. Additionally, differences in the distribution of functional groups were identified, with shade-tolerant individuals forming larger clusters.

Based on these findings, practical recommendations for restoration are proposed, such as incorporating planting clusters with 3 to 6 trees per cluster, using functional groups to promote structural heterogeneity, and ensuring connectivity between clusters to avoid fragmentation. These approaches aim to replicate the natural distribution observed in reference ecosystems and facilitate the recovery of ecological functions and ecosystem services in degraded areas.

This work highlights the importance of considering spatial patterns as a key attribute in restoration plans, contributing to a more integrated and effective approach to managing Chile's island forests. Moreover, it offers replicable strategies for similar contexts elsewhere.

3. INTRODUCCIÓN

La presente actividad de titulación en modalidad formulación, diseño y/o ejecución de proyecto se enmarca en un proyecto del Fondo de Investigación del Bosque Nativo a cargo de CONAF, específicamente FIBN-CONAF 007/2019: “Métodos para la restauración de la capacidad de resiliencia de bosques siempreverdes insulares del sur de Chile” que tiene como objetivo general desarrollar métodos de restauración para recuperar la resiliencia de los bosques insulares siempreverdes de Chiloé con el fin de mantener funciones ecológicas y servicios ecosistémicos.

El trabajo se llevó a cabo asociado al primer objetivo específico: “Definir el estado de referencia de los bosques siempreverdes insulares y realizar un diagnóstico del estado actual de éstos en el área de estudio.”.

El proyecto fue llevado en el Instituto Forestal (INFOR) oficina Chiloé, en el Laboratorio de Bosques Insulares, quien es parte de INFOR Chiloé, bajo el alero del investigador Dr. Jan Bannister y su equipo de trabajo.

Se apoyó en cuanto al análisis y caracterización de los bosques de referencia para el marco del proyecto en islas menores de Chiloé considerando los patrones espaciales de los individuos arbóreos del estrato dominante como antecedente para contar con métodos para la restauración que consideren la distribución espacial de los bosques. Por lo tanto, las actividades que se ejecutaron fueron principalmente de análisis de datos para la obtención de información y resultados de forma que puedan ser usados para fines científicos y de investigación.

El presente informe está estructurado en diferentes secciones claves que permiten comprender y desarrollar el trabajo de investigación. En primer lugar, se presenta un marco teórico que contextualiza el proyecto y justifica la relevancia de llevar a cabo esta investigación. A continuación, se exponen los objetivos, tanto general como específicos, que guiarán el desarrollo del trabajo.

La siguiente sección detalla los métodos utilizados para el análisis de datos y la obtención de resultados, incluyendo una descripción completa del área de estudio del proyecto. Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos junto con su respectiva discusión, lo que permite interpretar y analizar los hallazgos de manera crítica.

Finalmente, se incluyen las conclusiones, en las cuales se reflexiona sobre los principales aportes del trabajo y se establece la relación del proyecto con el perfil de egreso de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales de la Universidad de La Frontera.

4. MARCO TEÓRICO

Los ecosistemas boscosos en Chile experimentan transformaciones y alteraciones debido a las presiones humanas que paulatinamente están en aumento en respuesta a las necesidades de la población. Estas presiones impactan negativamente en la estructura, dinámica, composición y servicios ecosistémicos de los bosques inhabilitando a estos de volver a recuperar estas características por si solos (SER 2004). Lo anterior se denomina degradación y puede ser provocada por disturbios de origen natural, antrópico o de origen mixto, sin embargo los disturbios realizados por el ser humano tienen un mayor impacto a causa del grado de intencionalidad.

En Chile, se estima que aproximadamente 383.000 hectáreas de bosques se encontrarían degradadas (Bahamondez et al. 2009, Informe País 2019). Las principales causas de esta degradación son el sobrepastoreo de ganado (Zamorano-Elgueta 2018), la tala selectiva (CONAF 2016, Reyes 2021), los incendios forestales (Alaniz 2019, McWethy et al. 2018) y la invasión de especies exóticas (Fuentes et al. 2020, Informe País 2019). Como menciona Echeverría et al. (2021) y Altamirano et al. (2020), la mayor pérdida de bosque nativo en los últimos 24 años se concentra en la zona centro sur afectando principalmente a las provincias de Llanquihue, Chiloé, Palena y a la región de Aysén.

El archipiélago de Chiloé se caracteriza por sus bosques nativos, sin embargo, los disturbios mencionados anteriormente van ganando terreno y fragmentan estos bosques, en su mayoría del tipo forestal siempreverde (Cáceres et al. 2023). Si bien la isla grande de Chiloé presenta una gran superficie de bosque nativo (579.581 ha) (CONAF 2013), las islas menores como Lemuy y Quinchao también presentan importantes remanentes de bosque nativo que se han visto fragmentados y degradados por las presiones antrópicas, principalmente por el uso de leña nativa para calefacción en hogares. En estas islas, el bosque, al contar con una superficie reducida, presenta un impacto significativamente elevado por hectárea (Cáceres et al. 2023).

La urgencia de restaurar se fortalece dada las perturbaciones que existen en la zona, asociadas al inminente crecimiento poblacional y las parcelaciones en diferentes zonas rurales del archipiélago (Aguilera y Blanco 2024). Junto a esto, la gran demanda de leña para calefacción, estimada en más de 670 mil m³/año (Reyes et al. 2022) puede perpetuar la degradación de los bosques nativos en las islas menores de Chiloé, incluso hasta llegar a escenarios irreversibles.

Para una restauración exitosa se debe considerar un ecosistema de referencia (ER), el cual servirá como modelo guía y posteriormente permitirá evaluar el proceso de la actividad de restauración contrastándolo con éste (SER 2004). En palabras simples se considerará al ER como el estado deseado y la meta de restauración del proyecto. El ER se puede encontrar en las cercanías de la zona degradada, como también puede estar más alejada e incluso no existir de manera sincrónica en cuanto al tiempo. La complejidad de comprensión total del ER va a depender de las situaciones anteriores, siendo el escenario más ventajoso la cercanía espacial y temporal del ER al área degradada.

El ER suele definirse a partir de atributos como la composición del bosque y su estructura, tanto horizontal como vertical, además de sus funciones ecológicas. Sin embargo, este enfoque a menudo simplifica la dinámica y la complejidad del ecosistema, reduciendo su análisis a métodos silvícolas orientados principalmente hacia la productividad forestal. Esto implica que se descuidan otros aspectos relevantes del bosque, como su heterogeneidad estructural o su capacidad para sostener funciones ecológicas clave (Puettmann et al. 2009).

Últimamente diferentes autores apuntan a aumentar las componentes de los ER e ir más allá que los atributos comúnmente utilizados en cuanto a estructura, composición y funcionalidad (Bannister et al. 2016), con el fin de acelerar la heterogeneidad estructural en los bosques restaurados (Wiggins et al. 2019). Es aquí donde se puede incorporar una nueva variable que enriquezca estos atributos y proporcione una amplia visión de los bosques que servirán como referencia en el proceso de restauración.

Churchill (2013) propone agregar a los atributos de los ecosistemas de referencia los patrones espaciales de los bosques y cómo se comportan en cuanto a su distribución, si hay una tendencia a agruparse o no. Esto busca imitar la variabilidad natural al momento de restaurar un área degradada, además de recuperar la resiliencia, funciones y servicios ecosistémicos, considerando que la distribución y patrones espaciales influyen en el desempeño emergente de un bosque (Gadow et al. 2012). Por lo tanto se puede complementar de mejor manera los planes de restauración, conociendo, en primer lugar, la composición con el fin de saber qué especies establecer, como segundo atributo, la estructura para priorizar la disposición en cuánto a características funcionales de las especies como tolerancia a la sombra o dominancia, en tercer lugar la funcionalidad del bosque para enfocar la restauración a recuperar algunas de estas y finalmente los patrones espaciales que aportan la variabilidad espacial y estructural del bosque, dejando entre ver un ecosistema natural o semejante al original.

Si bien la estadística espacial en los ecosistemas boscosos tiene una amplia gama de funciones y algoritmos aplicables a la ecología de bosques (Law et al. 2009), como por ejemplo para analizar dispersión o agrupamiento en los bosques con herramientas como K de Ripley o la función de correlación espacial de pares $g(r)$, por mencionar las más conocidas, cada una ofrece perspectivas diferentes. La función K de Ripley se centra en identificar patrones espaciales a múltiples escalas, evaluando si la distribución de los individuos es agrupada, dispersa o aleatoria, proporcionando así una visión global del ecosistema. En cambio, el enfoque de Plotkin complementa este análisis al caracterizar núcleos de agrupación, evaluando detalles como su tamaño, densidad y composición, lo que permite una interpretación más profunda de las interacciones locales y la estructura interna de los clústeres. Por lo tanto, aunque ambos enfoques son complementarios, se necesita integrar esta información con datos prácticos sobre los patrones espaciales en los ecosistemas boscosos, yendo más allá de la estadística general (Plotkin 2002).

Aunque la dinámica de los bosques abarca diversas características, principalmente la temporalidad, definida como los cambios en la estructura y composición de los bosques a lo largo del tiempo (Oliver y Larson 1990), para los objetivos de este proyecto se considerará el ecosistema de referencia como estático. Este enfoque permitirá analizar la distribución espacial en un periodo temporal fijo, comprendiendo que dicho ER es el resultado de múltiples procesos ocurridos a lo largo de los siglos.

Las recomendaciones derivadas de este análisis se basarán principalmente en la distribución espacial, utilizando los resultados como una guía práctica para llevar a cabo plantaciones en procesos de restauración, cuando sea necesario. Estas guías especificarán cuánto y cómo plantar, facilitando intervenciones más efectivas y ajustadas al contexto ecológico de los bosques insulares.

5. OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar los patrones espaciales en bosques originales no perturbados en las islas menores del Archipiélago de Chiloé.

6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el patrón espacial de bosques originales no perturbados en las islas menores del Archipiélago de Chiloé.
2. Caracterizar núcleos de agrupación, evaluando detalles como su tamaño, densidad y composición de los bosques no perturbados en las islas menores para el total de individuos y para grupos funcionales.
3. Desarrollar recomendaciones para la restauración con patrones espaciales para las islas menores del Archipiélago de Chiloé.

7. MATERIAL Y MÉTODOS

7.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende tres islas menores pertenecientes al Archipiélago de Chiloé, dos de ellas de la provincia de Chiloé y una de la provincia de Palena (Figura 1). Los bosques de estas islas se consideraron como relictos de bosques originales no perturbados que se utilizaron como ecosistemas de referencia para fines del proyecto y el presente estudio.

La isla Butachauques pertenece administrativamente a la comuna de Quemchi y se ubica al noreste del centro administrativo de esta, bajo el Golfo de Ancud. Posee 46 km² de superficie total, de las cuales el 60% aproximadamente está cubierta con bosque con 2771,94 ha. De esta cantidad 2094,78 ha (45,54% del total de superficie) corresponden a bosques renovals y sólo 677,16 ha (14,72% del total de superficie) a bosque adulto y adulto/renoval (CONAF, 2013).

La isla Lemuy es dependiente de la comuna de Puqueldón, comuna que abarca la totalidad de la isla administrativamente. Con una superficie total de 95,9 km² siendo la más grande de las 3 islas del área de estudio. Posee una menor cantidad de bosques, cubriendo el 37% aproximadamente del total de la isla con 3592,93 ha, de las cuales un 33% del total de superficie corresponde a bosque renoval y solamente un 4,5% a bosque adulto y adulto/renoval (CONAF, 2013).

La isla Talcan, a diferencia de las otras dos pertenece a la provincia de Palena, específicamente a la comuna de Chaitén. Con una superficie de 45,6 km² es la más pequeña de las 3 islas estudiadas. Posee en su totalidad 3880 ha de bosque, es decir el 85% aproximadamente de la superficie total de la isla. Dentro de este 85%, 2586,77 ha son de bosque adulto, 215,58 de bosques adulto/renoval, 562,37 de bosques achaparrados y 515,28 ha de bosques renovals (CONAF 2013).

Los bosques pertenecen al tipo forestal siempreverde, el cual según la división fitogeográfica que hace Veblen et al. (1983) identifica dos formaciones fisionómicas de bosque siempreverde, el norpatagónico y el valdiviano. Bannister & Donoso (2013) definen a los bosques de la isla de Lemuy como un bosque siempreverde del tipo valdiviano, mientras que a los de Talcan y Butachauques como siempreverde del tipo norpatagónico. Esta diferencia se puede hacer notoria en la composición que tienen, respecto las

especies arbóreas que poseen, como la diferencia entre tener *Nothofagus dombeyi* o *Nothofagus nitida* para el valdiviano y el norpatagónico respectivamente (Tabla 1).

El bosque de isla Butachauques presentó una riqueza de 10 especies, mientras que en el bosque de isla Lemuy es de 12 especies, Talcan contó con un total de 11 especies. Esta riqueza respectiva de cada bosque corresponde al dosel dominante de árboles, donde se consideraron los árboles con DAP > 10 cm. Del listado original sin filtrar el DAP (Anexo 1) se mantuvo la riqueza para Butachauques y Talcan, mientras que para Lemuy la riqueza disminuyó en tres especies.

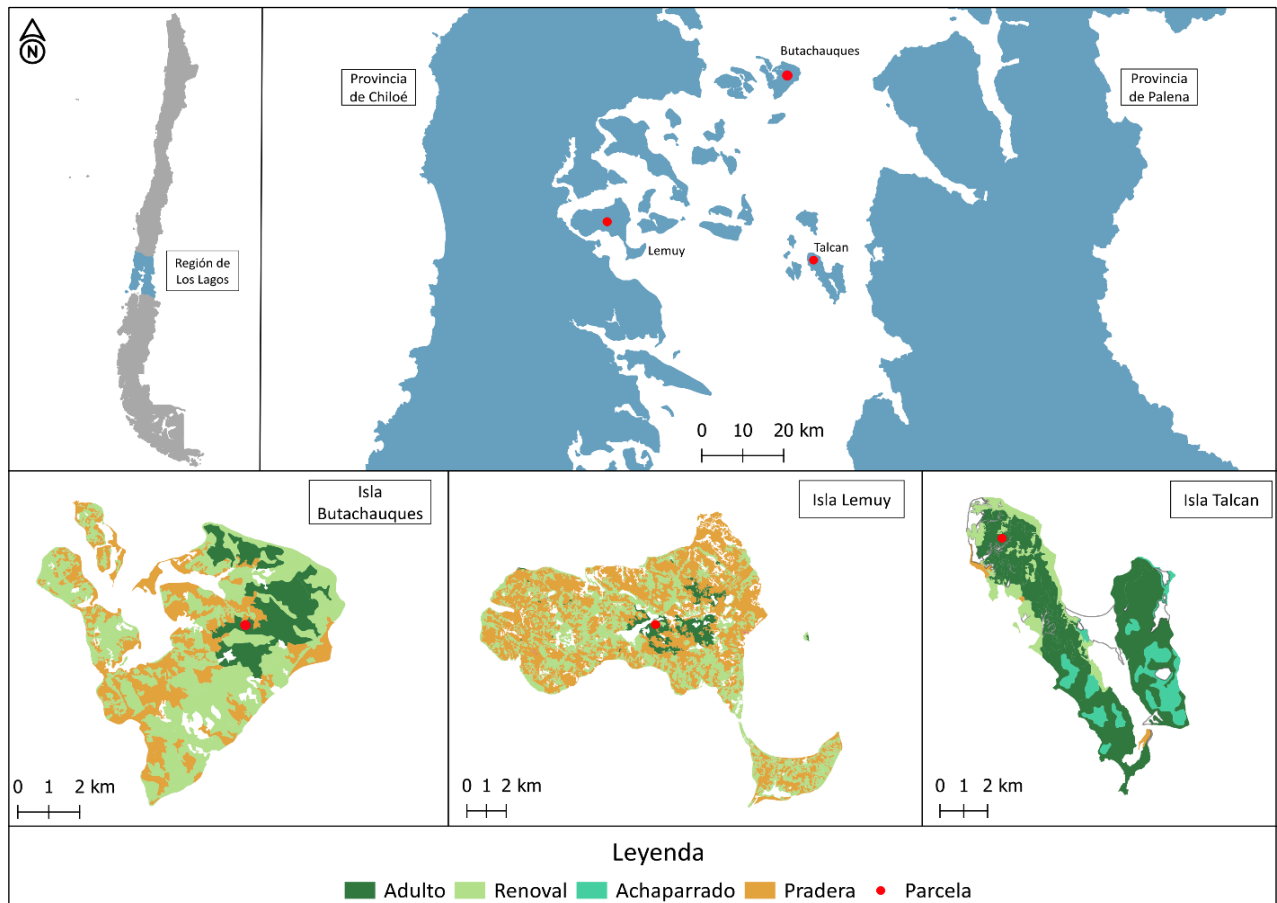


Figura 1. Área de estudio. El área de estudio pertenece a las tres islas menores del archipiélago de Chiloé: Isla Butachauques, Isla Lemuy e Isla Talcan. En el mapa se observa cada isla con su respectivo uso de suelo.

Tabla 1. Listado de especies para cada bosque y su riqueza respectivamente considerando individuos con DAP > 10 cm. Fuente: Elaboración propia.

Bosque	Butachauques	Lemuy	Talcan
	<i>Amomyrtus luma</i>	<i>Amomyrtus luma</i>	<i>Amomyrtus luma</i>
	<i>Amomyrtus meli</i>	<i>Caldcluvia paniculata</i>	<i>Crinodendron hookerianum</i>
	<i>Caldcluvia paniculata</i>	<i>Drimys winteri</i>	<i>Caldcluvia paniculata</i>
	<i>Drimys winteri</i>	<i>Eucryphia cordifolia</i>	<i>Crinodendron patagua</i>
	<i>Laureliopsis philippiana</i>	<i>Gevuina avellana</i>	<i>Drimys winteri</i>
	<i>Lomatia ferruginea</i>	<i>Lomatia hirsuta</i>	<i>Luma apiculata</i>
	<i>Myrceugenia parvifolia</i>	<i>Laureliopsis philippiana</i>	<i>Lomatia ferruginea</i>
	<i>Nothofagus nitida</i>	<i>Luma apiculata</i>	<i>Laureliopsis philippiana</i>
	<i>Raukua laetevirens</i>	<i>Nothofagus dombeyi</i>	<i>Myrceugenia parvifolia</i>
	<i>Tepualia stipularis</i>	<i>Raukua laetevirens</i>	<i>Nothofagus nitida</i>
		<i>Rhaphithamnus spinosus</i>	<i>Raukua laetevirens</i>
		<i>Weinmannia trichosperma</i>	
Riqueza	10	12	11

Cabe destacar que para la riqueza se consideraron sólo las especies que se lograron identificar, puesto que para cada bosque hubo una cantidad de individuos que no se logró identificar la especie y quedaron como “Sin identificación”.

En la Tabla 2 se muestra la cantidad de individuos por bosque que no se identificaron con una etiqueta de “Sin identificación”.

Tabla 2. Abundancia absoluta y relativa para cada bosque considerando individuos con DAP > 10 cm. Fuente: Elaboración propia.

Bosque	Especie	Densidad (arb/ha)	Abundancia relativa (%)
Butachauques	<i>A. luma</i>	445	41,47
	<i>D. winteri</i>	280	26,10
	<i>L. philippiana</i>	122	11,37
	<i>N. dombeyi</i>	97	9,04
	<i>C. paniculata</i>	77	7,18
	<i>R. laetevirens</i>	10	0,93
	<i>T. stipularis</i>	9	0,84
	<i>A. meli</i>	6	0,56
	<i>M. parvifolia</i>	3	0,28
	<i>L. ferruginea</i>	1	0,09
	Sin identificación	23	2,41
	Total	1073	100
Lemuy	<i>N. dombeyi</i>	319	50,32
	<i>L. hirsuta</i>	116	18,30
	<i>G. avellana</i>	56	8,83

	<i>C. paniculata</i>	41	6,47
	<i>E. cordifolia</i>	23	3,63
	<i>L. apiculata</i>	11	1,74
	<i>A. luma</i>	10	1,58
	<i>R. spinosus</i>	5	0,79
	<i>D. winteri</i>	3	0,47
	<i>L. philippiana</i>	3	0,47
	<i>W. trichosperma</i>	2	0,79
	<i>R. laetevirens</i>	2	0,32
	Sin identificación	43	6,78
	Total	634	100
Talcán	<i>A. luma</i>	546	58,71
	<i>D. winteri</i>	88	9,46
	<i>M. parvifolia</i>	64	6,88
	<i>L. philippiana</i>	56	6,02
	<i>C. paniculata</i>	50	5,38
	<i>C. patagua</i>	46	4,95
	<i>N. dombeyi</i>	40	4,30
	<i>C. hookerianum</i>	28	3,01
	<i>L. apiculata</i>	3	0,32
	<i>L. ferruginea</i>	2	0,22
	<i>R. laetevirens</i>	1	0,11
	Sin identificación	6	0,65
	Total	930	100

Para el bosque de la isla Butachauques se obtuvo una abundancia total de 1073 individuos con un mayor porcentaje de *Amomyrtus luma*, seguido de *Drimys winteri* y en tercer lugar *Laureliopsis philippiana*. Este bosque entre los 3 de referencia es el que presenta mayor abundancia.

En cuanto al bosque de Lemuy la abundancia total es de 634 individuos, teniendo la menor abundancia de los 3 bosques. Las especies que presentaron mayor cantidad de individuos son *Nothofagus dombeyi*, *Lomatia hirsuta* y *Gevuina avellana*.

Para el bosque de la isla Talcán, se registró una abundancia total de 930 individuos predominando en cantidad *Amomyrtus luma*, seguido de *Drimys winteri* y finalmente *Myrceugenia parvifolia*. En comparación con los otros dos bosques, este bosque presenta una abundancia intermedia.

Originalmente los bosques presentaban una mayor abundancia ya que se consideraban todos los individuos independiente del DAP medido (Anexo 2), sin embargo la abundancia disminuyó una vez que se contemplaron solamente a los árboles con un DAP mayor a 10 cm quedando finalmente con las mencionadas anteriormente.

7.2 TOMA DE DATOS

Los datos fueron colectados dentro del proyecto FIBN-CONAF 007/2019 durante los años 2019 y 2024.

En cada bosque se hicieron parcelas de 100 x 100 metros (1 hectárea) donde se muestrearon la totalidad de los individuos arbóreos, considerando: especie, DAP, altura, tolerancia a la sombra y posición a través de coordenadas cartesianas (x,y).

7.3 ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de datos se filtraron los individuos arbóreos que tenían un DAP mayor a 10 cm.

Se analizó en primer lugar la distribución espacial con la función K de Ripley y en segundo lugar se aplicó el algoritmo de Plotkin. Cada análisis se llevó a cabo tanto para la totalidad de individuos de cada bosque, como para los grupos funcionales pertenecientes según tolerancia a la sombra (Figura 2).

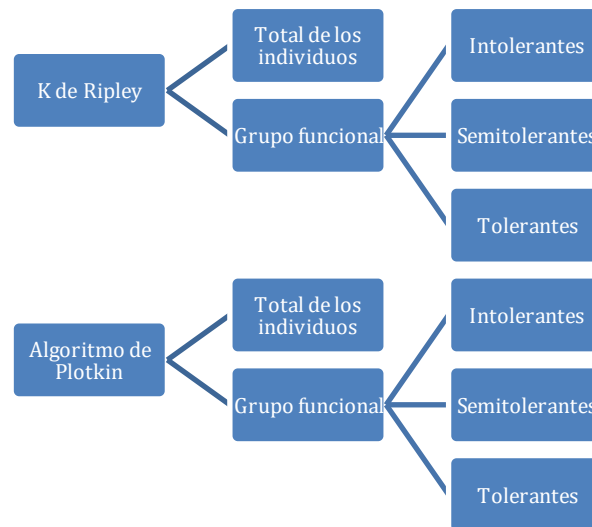


Figura 2. Diagrama del análisis de datos. Cada análisis se realizó para el total de individuos, como para los grupos funcionales de especies intolerantes, semitolerantes y tolerantes.

7.3.1 Distribución espacial: K de Ripley

La función K de Ripley calcula el promedio de árboles que se encuentran alrededor de cada árbol del conjunto de puntos, considerando distintas distancias según un radio variable “r”. En principio, busca caracterizar el tipo de patrón espacial dentro de un área con dos dimensiones de un patrón espacial de puntos (Ripley 1977).

La función K de Ripley se define mediante la siguiente fórmula:

$$\hat{K}(r) = \frac{A}{n(n-1)} \sum_i \sum_j I(d_{ij} \leq r) e_{ij} \quad (1)$$

Donde A es la superficie del área de estudio en metros cuadrados, n es el número total de árboles en esa área, y la doble sumatoria incluye todos los pares de puntos i y j, excluyendo j=i para evitar que un punto se considere a sí mismo. d_{ij} es la distancia entre el punto i y el punto j, y $I(d_{ij} \leq r)$ es una función indicadora que toma el valor de 1, si el vecino está dentro del radio r y 0 en caso contrario. Finalmente, e_{ij} es un factor que corrige los efectos de borde según la forma de la ventana de estudio, evitando sesgos en los resultados por puntos cercanos a los límites.

El análisis se realizó con la base de datos de cada bosque de manera simplificada, usando solamente la ubicación de cada árbol con variables de posición “x” y “y” mediante el software R Studio versión 4.4.1, se utilizó el paquete spatstat, específicamente la función Kest con aplicación de la función envelope para generar intervalos de confianza.

La función permitió evaluar si la distribución de los individuos arbóreos se ajustaba a un patrón aleatorio, agrupado o uniforme para distintas distancias, en este caso el uniforme se interpretó como dispersión de los árboles, siendo la contraparte de un patrón agrupado.

Los resultados se presentaron de dos maneras. Por un lado de manera gráfica donde se obtiene la K observada, la K teórica que se genera a partir de la aleatoriedad y dos niveles de confianza, uno superior y otro inferior respecto a la K teórica. Si la curva K observada se encuentra por encima del límite de confianza superior, los datos muestran un patrón agrupado a esa escala. Si la curva está por debajo del límite inferior, los datos presentan una distribución uniforme. Por otro lado, si la curva se encuentra dentro de los límites superior e inferior, los datos son aleatorios a dicha distancia.

Por otro lado, se obtuvo de manera tabulada el análisis de la función tomando en cuenta los tres posibles patrones que se podían obtener y en qué distancias se encuentran estos patrones.

7.3.2 Identificación de núcleos de individuos: Algoritmo de Plotkin

Para identificar los núcleos de agrupación de árboles en los diferentes bosques se usó un algoritmo de identificación de núcleos de individuos (Plotkin et al. 2002) que reúne a los individuos en diferentes núcleos respecto a una distancia o radio (r), por lo tanto, los árboles serán del mismo grupo en cuanto estos se encuentren a una distancia r o menor, considerando esta distancia a nivel fustal (Figura 3).

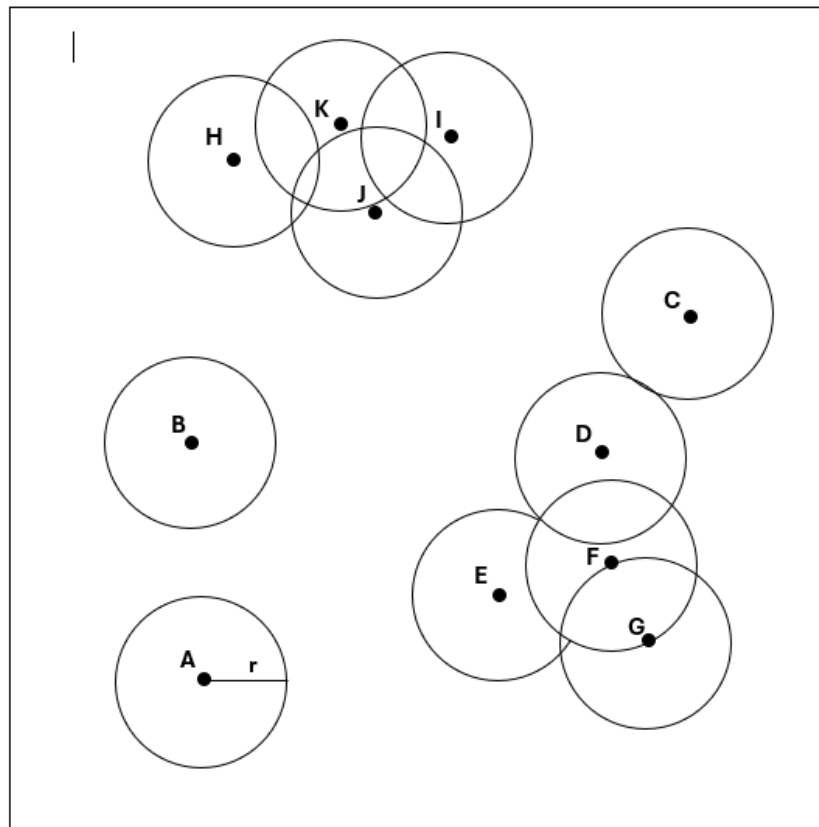


Figura 3. Algoritmo de Plotkin (Plotkin et al. 2002). Identificación de núcleos de individuos. Elaboración propia a partir de Plotkin et al. (2002). Cada letra representa un árbol con su ubicación en cuanto al fuste. “ r ” es el radio de distancia de análisis para el algoritmo. Los árboles que se encuentran a una distancia r o menor a esta se encuentran en un mismo grupo como sucede con C, D, E, F y G, al igual que con H, I, J y K.

El análisis se realizó en ArcMap versión 10.8 utilizando la base de datos de cada árbol dentro de la megaparcela, considerando las variables de posición “ x ” e “ y ” correspondientes a su ubicación espacial. Estos datos fueron procesados mediante herramientas específicas de análisis espacial disponibles en el software.

La elección del radio se generó a partir de una cálculo preliminar utilizando radios que aumentaban cada 0,5 m desde 1,5 m hasta los 3,5 m, puesto que a medida que el radio se acerca a números menores, en este caso 1, los árboles se tienden a quedar como individuos solos, mientras que al aumentar el radio los árboles van generando grupos, llegando así al radio de 3,5 m donde se tiende a generar un gran grupo que incluye a todos los individuos.

Se establecieron los tamaños de los núcleos en función de la cantidad de individuos presentes en cada uno, definiendo un total de 10 categorías de tamaños. Esta decisión se basó en las características del bosque y en aproximaciones iniciales, con el objetivo de evitar la generación de tamaños que pudieran comprometer la homogeneidad de los resultados.

Como primera condición se buscó que exista una mayor representación de tamaños de núcleo al seleccionar los diferentes radios preliminares, es decir que la cantidad de tamaños representados sea cercana a 10. Otra condición que se debía cumplir para elegir el radio adecuado era presentar homogeneidad en el porcentaje de árboles agrupados en cada tamaño buscando así una representación más equitativa y no se aglomeren en un gran grupo o uno pequeño.

Para la elección de radio del algoritmo de Plotkin en los grupos funcionales de tolerancia a la sombra se modificó la metodología puesto que no cumplía con las condiciones para los diferentes grupos y bosques.

Se partió evaluando de manera preliminar para cada grupo funcional de los tres bosques los diferentes radios antes propuestos, partiendo por 1,5 m hasta 3,5 m. Al observar que los radios no se lograban equiparar para todos los bosques y los grupos funcionales por las diferencias entre el comportamiento de estos mismos, se tomó la decisión de promediar por bosque los tres radios de los grupos funcionales, siguiendo las mismas condiciones anteriores: mayor representación de tamaños de núcleos y homogeneidad en el porcentaje de árboles agrupados en cada tamaño. En síntesis, con los criterios se seleccionó un radio óptimo para el grupo de las especies tolerantes, semitolerantes y tolerantes que posteriormente se promediaron a nivel de bosque, obteniendo un radio promedio para Butachauques, para Lemuy y para Talcan.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

8.1.1 Total de individuos

Al analizar la función K de Ripley, se observó una tendencia hacia una distribución agrupada de los individuos arbóreos en los tres bosques estudiados.

En el bosque de Butachauques, esta agrupación se evidenció entre los 0 y 5,8 m. Posteriormente, se observó una distribución aleatoria entre los 5,8 y 6,5 m, para luego regresar a una agrupación desde los 6,5 hasta los 22,4 m. En los últimos tres metros (22,4 a 25 m), la distribución volvió a ser aleatoria (Figura 4) (Tabla 3).

Por otro lado, en el bosque de Lemuy, la distribución agrupada se mantuvo de manera más consistente, abarcando desde los 0,4 hasta los 25 m, con excepción de una breve distancia de 0,4 m donde la distribución fue aleatoria (Figura 5) (Tabla 3).

Finalmente, en el bosque de Talcan, la agrupación predominó entre los 0 y 24 m, mientras que los últimos metros (24 a 25 m) mostraron una distribución aleatoria (Figura 6) (Tabla 3).

En general, los resultados indican una clara tendencia hacia una distribución agrupada en la mayoría de las distancias analizadas, como se observa tanto en las representaciones gráficas como en la tabla de análisis. Las distancias con distribución aleatoria son escasas y no predominan en comparación con la distribución agrupada. Respecto a la distribución dispersa que puede analizar la función K, no se encontraron resultados para esta.

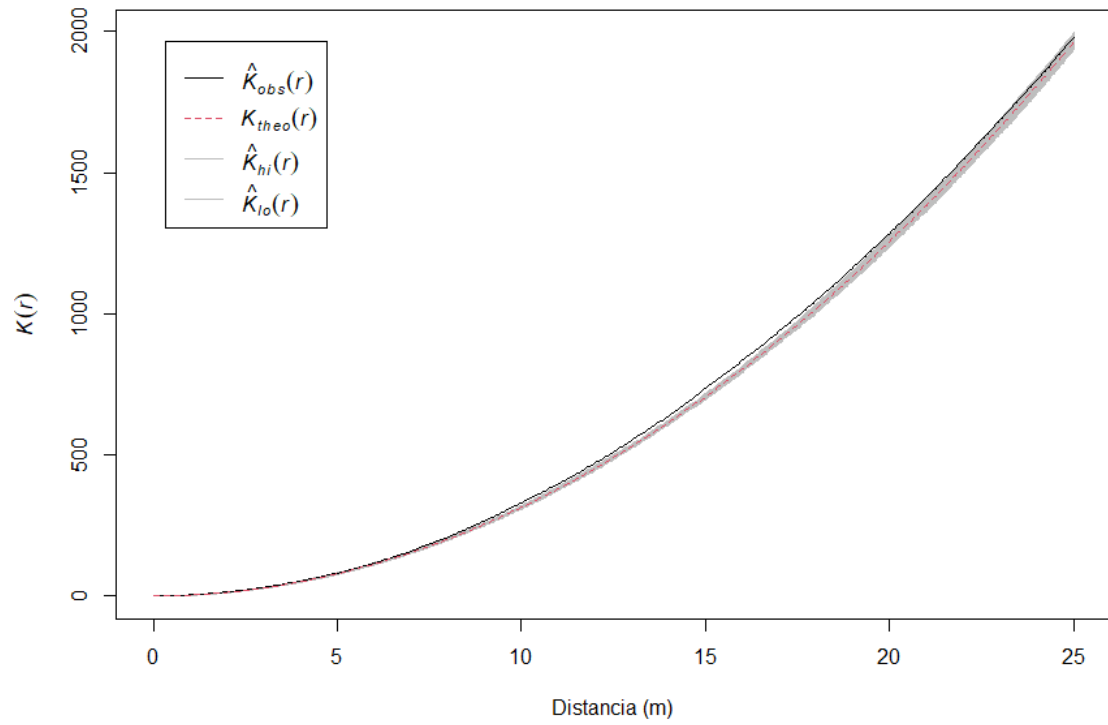


Figura 4. Función K de Ripley para Bosque Butachauques.

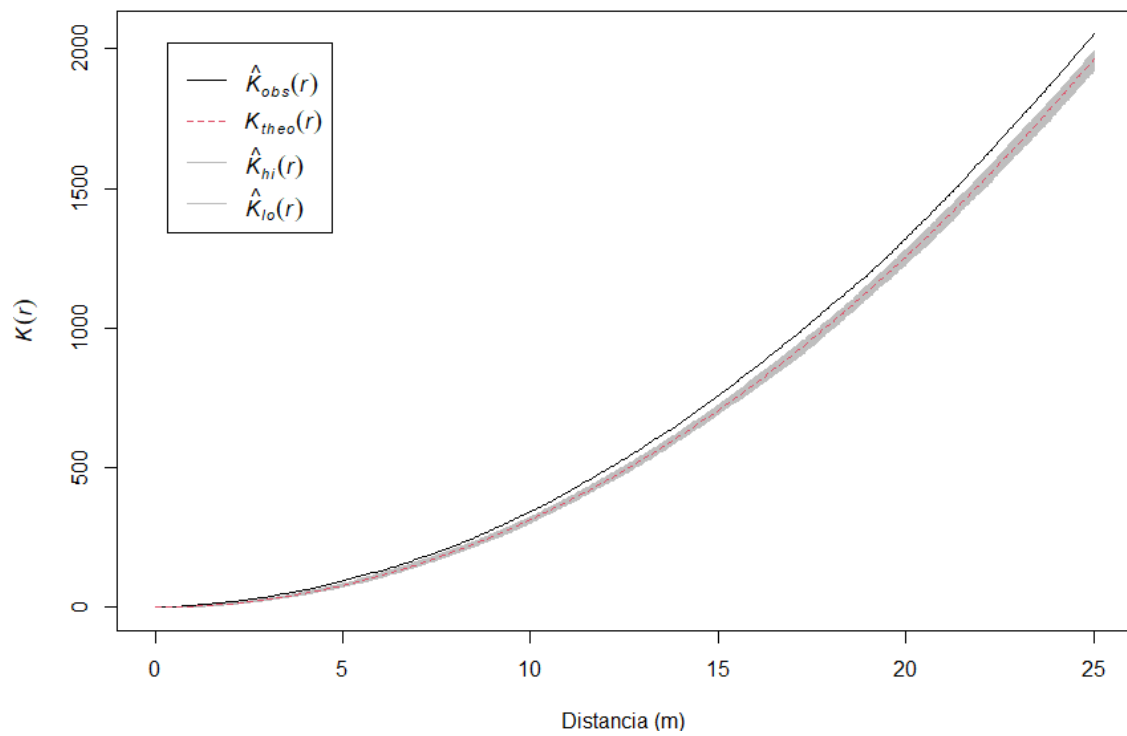


Figura 5. Función K de Ripley para Bosque Lemuy.

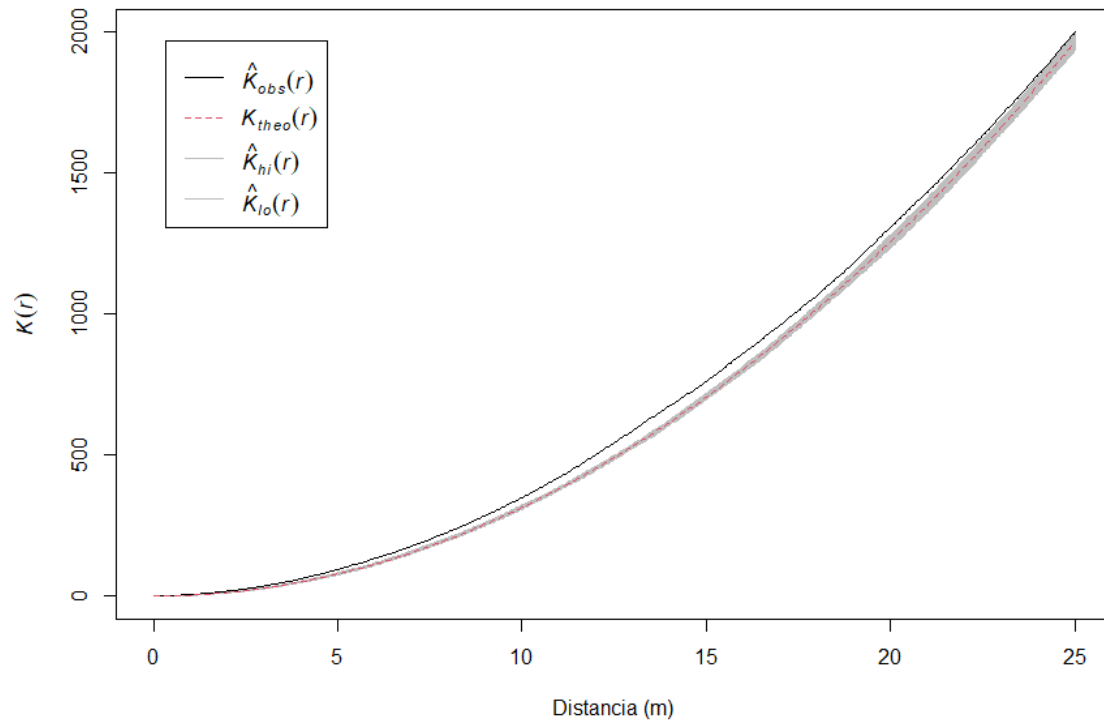


Figura 6. Función K de Ripley para Bosque Talcan.

Tabla 3. Análisis función K de Ripley para los bosques de Butachauques, Lemuy y Talcan. Patrones espaciales se constituyen en agrupación, aleatorio y dispersión, cada uno de estos presentan valores de distancia en metros.

Bosque	Agrupación (m)	Aleatorio (m)	Dispersión (m)
Butachauques	0 - 5,8	22 - 25	No existe
Lemuy	0,4 - 25	0 - 0,4	No existe
Talcan	0 - 24	24 - 25	No existe

8.1.2 Grupos funcionales de tolerancia a la sombra.

Al analizar la función K de Ripley considerando a los grupos funcionales de tolerancia a la sombra de los individuos arbóreos, se observó una tendencia predominante hacia la distribución agrupada en los tres bosques estudiados (Figura 7) (Tabla 4).

En el bosque de Butachauques, los individuos intolerantes presentaron una distribución agrupada entre los 2,7 y 25 m, mientras que entre los 0 y 2,7 m la distribución fue aleatoria. Los individuos semitolerantes mostraron agrupación en el rango de 0 a 17,6 m y aleatoriedad de 17,6 a 25 m. Finalmente, los tolerantes exhibieron agrupación en toda la distancia analizada (0 a 25 m), sin presencia de patrones aleatorios o de dispersión.

En el bosque de Lemuy, los intolerantes mostraron una distribución agrupada en el intervalo de 0,3 a 25 m, dejando solo un pequeño rango inicial (0 a 0,3 m) con una distribución aleatoria. Los individuos semitolerantes, por su parte, evidenciaron agrupación entre 0,4 y 25 m, salvo una breve sección aleatoria entre los 0 y 0,4 m. Para los individuos tolerantes, la agrupación predominó en los rangos de 0 a 8,2 m, 8,8 a 9,6 m y 9,7 a 10,7 m, mientras que se observó aleatoriedad en los intervalos de 8,3 a 8,6 m y 12,7 a 25 m.

Por último, en el bosque de Talcan, los individuos intolerantes presentaron agrupación desde 1,5 hasta 9,8 m, mientras que la distribución fue aleatoria entre los 0 y 1,5 m y 9,8 a 25 m. Los semitolerantes exhibieron agrupación desde los 0,4 hasta 25 m, dejando solo un intervalo inicial (0 a 0,4 m) con una distribución aleatoria. Los individuos tolerantes mostraron un patrón predominantemente agrupado desde los 0 hasta los 21,9 m, con aleatoriedad únicamente entre los 21,9 y 25 m.

En general, los resultados indican que la distribución agrupada es predominante en la mayoría de las distancias analizadas para los tres bosques, especialmente para los individuos semitolerantes y tolerantes. Los patrones de aleatoriedad, aunque presentes, se limitan a intervalos muy específicos y no representan la tendencia dominante.

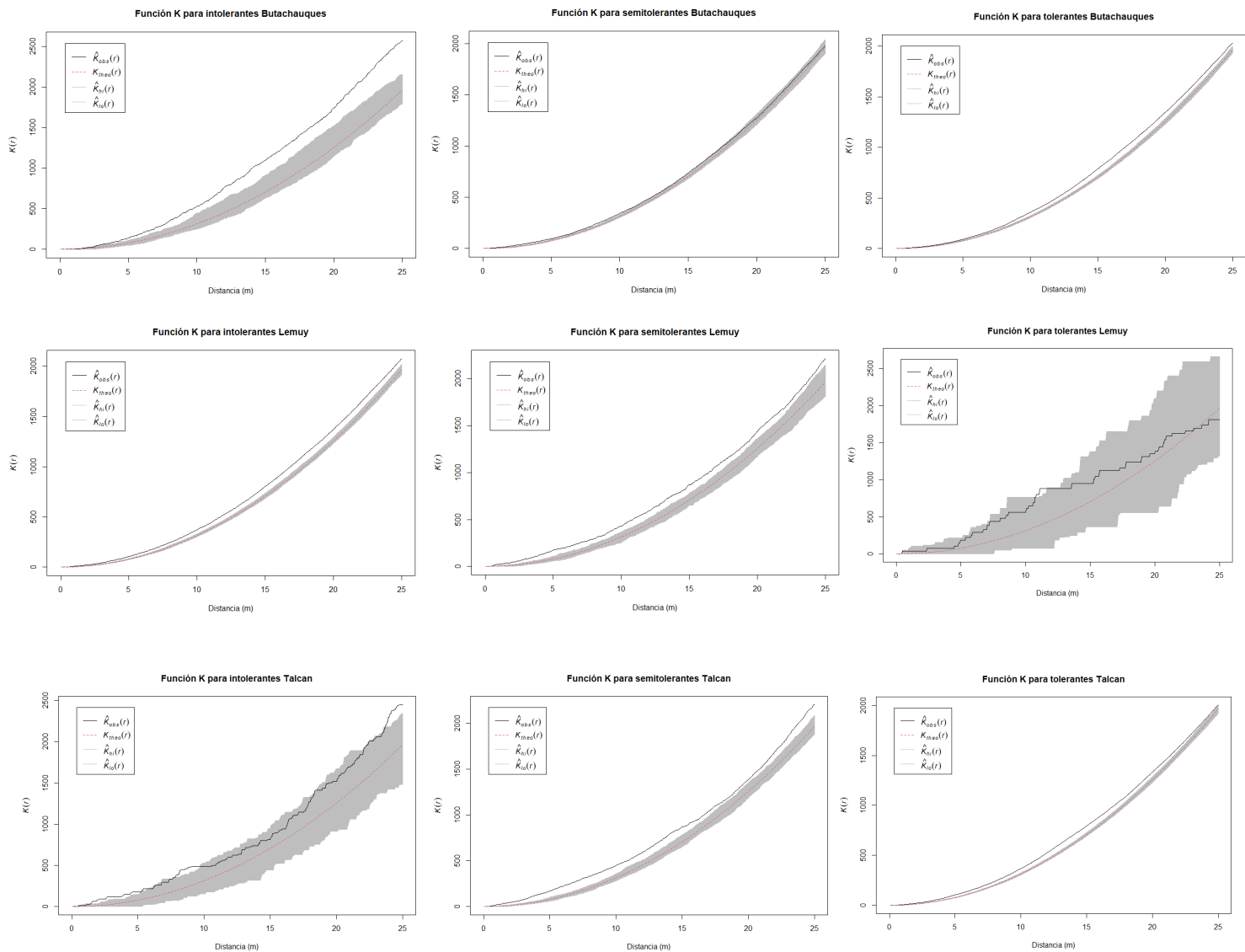


Figura 7. Función K de Ripley para para los bosques de Butachauques, Lemuy y Talcan para grupos funcionales de tolerancia a la sombra.

Tabla 4. Análisis función K de Ripley para los bosques de Butachauques, Lemuy y Talcan para grupo funcional de tolerancia a la sombra. Patrones espaciales se constituyen en agrupación, aleatorio y dispersión, cada uno de estos presentan valores de distancia en metros.

Bosque	Agrupación (m)	Aleatorio (m)	Dispersión (m)
Butachauques			
Intolerantes	2,7 - 25	0 - 2,7	No existe
Semitolerantes	0 - 17,6	17,6 - 25	No existe
Tolerantes	0 - 25	No existe	No existe
Lemuy			
Intolerantes	0,3 - 25	0 - 0,3	No existe
Semitolerantes	0,4 - 25	0 -0,4	No existe
Tolerantes	8 -8,2	0 - 8	No existe
	8 - 8,9	8,3 - 8,6	
		9 - 10,7	
	10,7 - 12,7	12,7 - 25	
Talcan			
Intolerantes	1,5 - 9,8	0 - 1,5	No existe
		9,8 - 25	
Semitolerantes	0,4 - 25	0 - 0,4	No existe
Tolerantes	0 - 21,9	21,9 - 25	

8.2 IDENTIFICACIÓN DE NÚCLEOS DE ÁRBOLES

8.2.1 Total de individuos

Al considerar diferentes radios buffer se obtuvieron variadas concentraciones de individuos en torno a los tamaños de núcleos que se establecieron.

Se observó que para el radio de 1,5 m había una mayor representación de los tamaños de núcleos en los tres bosques de referencia teniendo en Butachauques y Lemuy un total de 8 tamaños de los 10 (Tabla 5 y 6) (Figura 8 y 9) que se determinaron y en el caso de Talcan se obtuvieron 9 tamaños (Tabla 7) (Figura 10). A medida que se aumentaba el radio se constató que había menos tamaños de núcleos representados, llegando incluso a tener sólo un gran tamaño de núcleo que concentraba a todos los individuos como en el caso de la aplicación del radio mayor de 3,5 m en Butachauques y Talcan.

Otro aspecto a considerar es cómo se distribuyen los porcentajes de individuos agrupados en torno al tamaño del núcleo. Para el radio de 1,5 m en los tres bosques los individuos agrupados se distribuyeron de manera más equitativa en comparación de los radios mayores, dejando en cuenta que a medida que se aumenta el radio la distribución se va volviendo menos equitativa y hay tamaños de núcleos que concentran más individuos que otros de manera notable.

Tomando en consideración los dos fundamentos anteriores, dentro del espectro de radio buffer se tomó el radio de 1,5 m como el más apropiado para aplicar el algoritmo de Plotkin por tener mayor equidad de individuos por tamaño de núcleo y mayor representatividad de los tamaños de núcleo obteniendo así una distribución espacial y estructural más diversa.

Churchill (2016) empleó otro método para seleccionar el radio que consiste en el solapamiento de copas de las especies dominantes en su área de estudio, con datos bibliográficos como también con datos obtenidos en terreno se estimó la distancia máxima a la que los árboles entrelazan sus copas y comienzan a formar parches de dosel continuo, teniendo esta distancia se estima el radio para el uso de algoritmo de Plotkin, no obstante para este estudio no se contaban con datos suficientes de tamaño de copas para las especies dominantes como coihue, luma o canelo, por lo que se optó por una justificación a través de la distribución de la proporción de individuos por tamaño de núcleo y radio buffer como se pueden ver en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 5. Distribución de los individuos agrupados en diferentes tamaños de núcleo en función del área buffer (m) para bosque de Butachauques.

r	Tamaño del núcleo (Cantidad de árboles)									
	1	2-6	7-11	12-16	17-21	22-26	27-31	32-36	37-41	>41
Porcentaje de individuos agrupados										
1,5 m	6,2	21,4	14,8	21,2	5,1	4,3	2,7	0	0	24,2
2 m	1	4,1	1,4	1,2	1,9	0	2,9	0	0	87,5
2,5 m	0,2	1,3	0	0	0	0	0	0	0	98,5
3 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

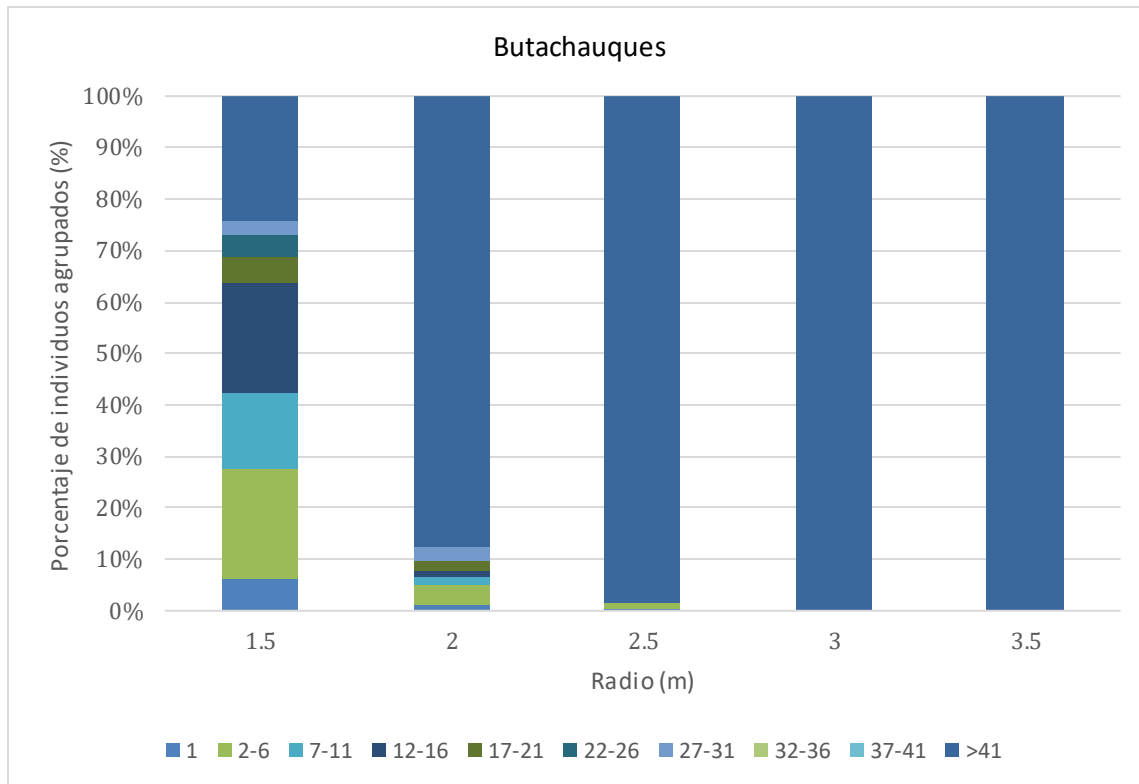


Figura 8. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Butachauques, considerando individuos con un DAP mayor a 10 cm (n=1073). El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.

Tabla 6. Distribución de los individuos agrupados en diferentes tamaños de núcleo en función del área buffer (m) para bosque de Lemuy.

r	Tamaño del núcleo (Cantidad de árboles)									
	1	2-6	7-11	12-16	17-21	22-26	27-31	32-36	37-41	>41
Porcentaje de individuos agrupados										
1,5 m	15,3	41,2	11,8	4,4	5,7	7,4	8,5	5,7	0	0
2 m	5,7	20,2	17,8	5,8	5,7	0	4,3	0	0	40,5
2,5 m	0,8	6,6	9,6	1,9	0	0	0	0	0	81,1
3 m	0,3	1,1	0	1,9	0	0	0	5,2	0	91,5
3,5 m	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	99,8

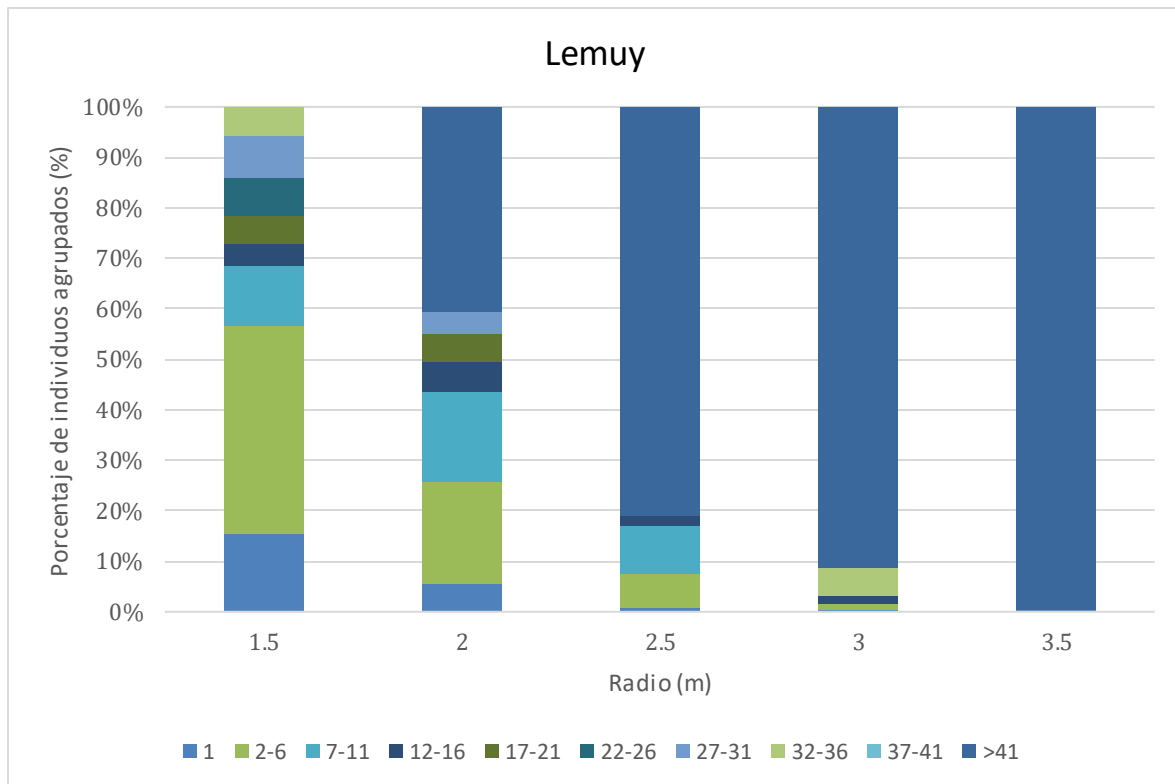


Figura 9. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Lemuy, considerando individuos con un DAP mayor a 10 cm (n=634). El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.

Tabla 7. Distribución de los individuos agrupados en diferentes tamaños de núcleo en función del radio buffer (m) para bosque de Talcan.

r	Tamaño del núcleo (Cantidad de árboles)									
	1	2-6	7-11	12-16	17-21	22-26	27-31	32-36	37-41	>41
Porcentaje de individuos agrupados										
1,5 m	5,59	22,15	16,99	10,97	4,09	13,23	6,24	3,55	0	17,20
2 m	1,61	5,38	2,8	1,29	0	2,58	0	0	0	86,34
2,5 m	0,43	0,65	0	1,9	0	2,58	0	0	0	95,05
3 m	0,22	0	0	0	0	0	0	0	0	99,78
3,5 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

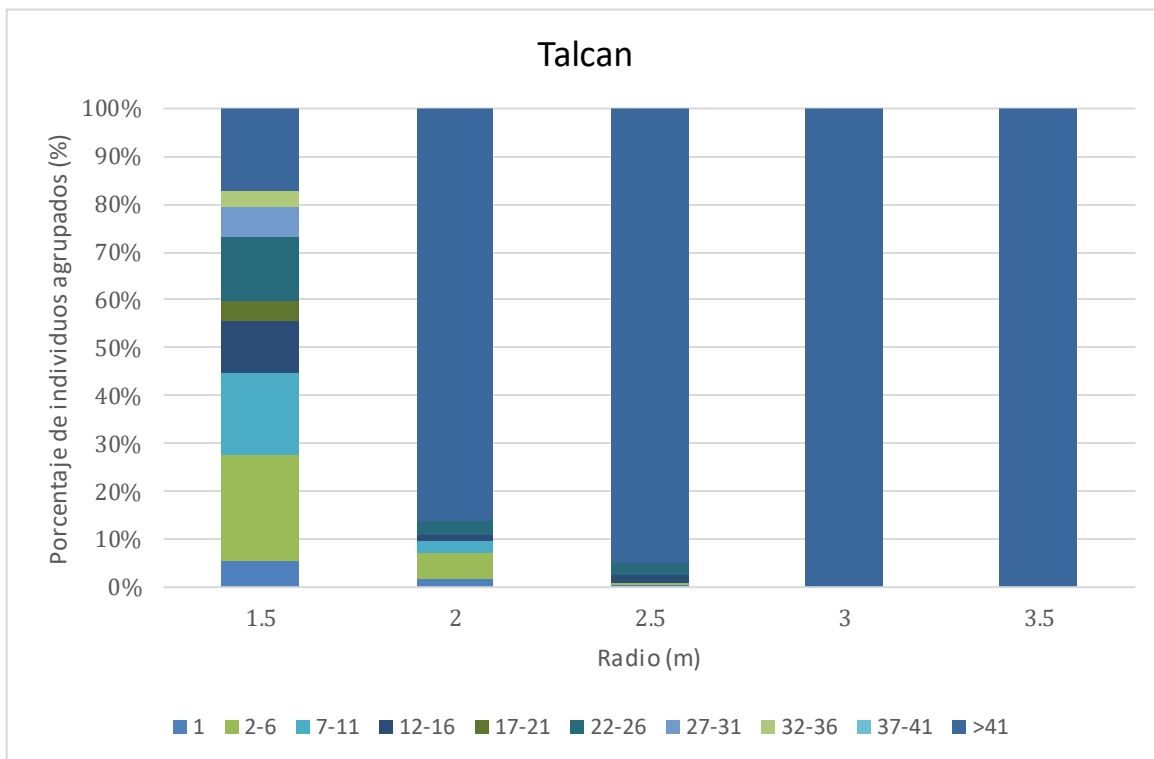


Figura 10. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Talcan, considerando individuos con un DAP mayor a 10 cm (n=930). El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.

El total de núcleos se concentran entre 160 y 200 núcleos para los tres bosques, con el mayor número para Lemuy, después le sigue Butachauques y finalmente Talcan con el menor número de núcleos. Respecto a la cantidad de individuos por grupo se promedió teniendo 6 individuos por grupo para Butachauques y Talcan mientras que para Lemuy hay un promedio de 3 individuos. Debido a la abundancia total por bosque se llegó a una gran cantidad de núcleos/ha pero que concentran un promedio de menos de 7 árboles, lo cual ajustándolo a un escala más pequeña puede replicarse al restaurar en un área deseada (Tabla 8).

En cuanto al área de los núcleos establecidos se tuvo un área promedio, con el menor de los tres bosques, de 16.6 m² para Lemuy, lo cual puede relacionarse con el promedio de individuos que igualmente es el menor entre los bosques.

Los núcleos tienen diferente cantidad de individuos, así como diferentes tamaños (Figura 11, 12 y 13), lo que entrega diversidad estructural al bosque. Ha sido posible encontrar las variables respecto a los núcleos en cuanto al total, cantidad de individuos y tamaños de estos para usar como guía para futuras plantaciones que sean con fines de restauración siguiendo el bosque de referencia en relación con la distribución espacial de los individuos arbóreos. Se puede encontrar la distribución sobre los individuos por núcleo y el área correspondiente a cada núcleo de forma más detallada en los Anexos 3, 4, 5 y 6.

Tabla 8. Resumen sobre núcleos: Total de núcleos, individuos por núcleos y el área respectiva a los núcleos.

Bosque	Núcleos			Área	
	Total de núcleos (núcleos/ha)	Promedio de individuos por núcleo	Rango (individuos/núcleo)	Área promedio (m ²)	Rango (m ²)
Butachauques	178	6 (± 10.76)	1 - 85	28.5 (± 45.8)	7.1 – 362.7
Lemuy	200	3 (± 4.8)	1 - 36	16.6 (± 21.7)	7.1 – 166.7
Talcan	161	6 (± 9.26)	1 - 72	27.1 (± 38.3)	7.1 – 302.9

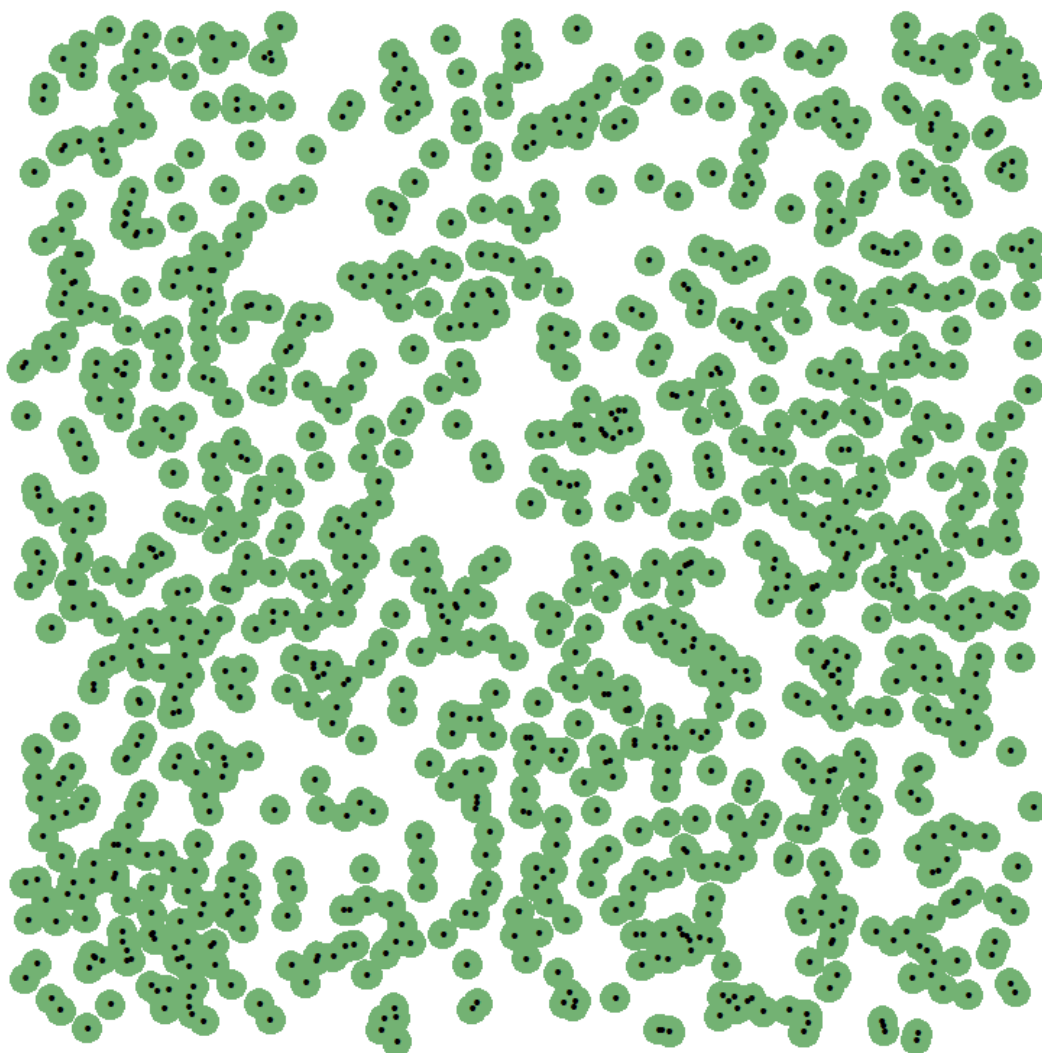


Figura 11. Mapa de fustes con radio buffer de 1.5 m aplicado en bosque de referencia de Butachauques.

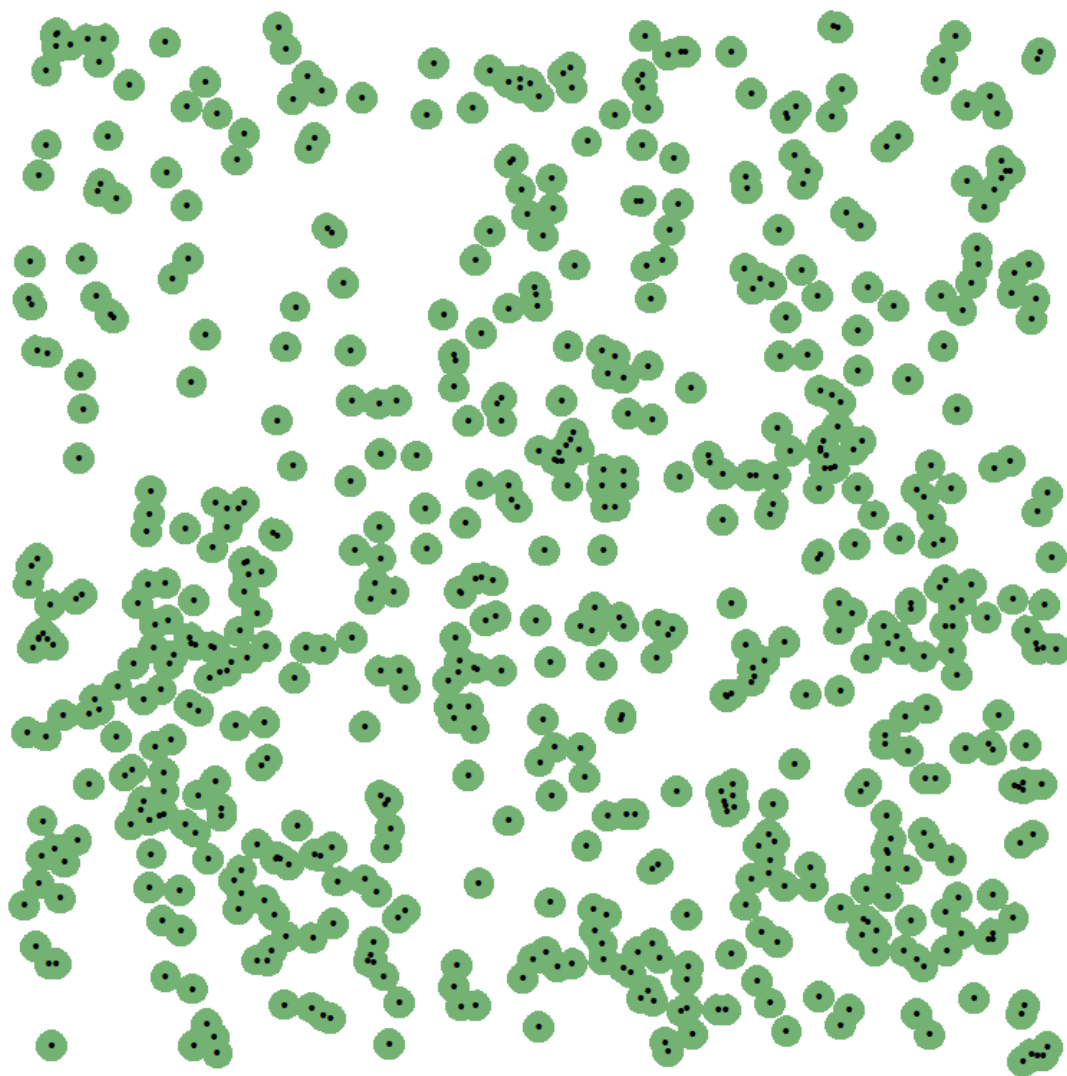


Figura 12. Mapa de fustes con radio buffer de 1.5 m aplicado en bosque de referencia de Lemuy.

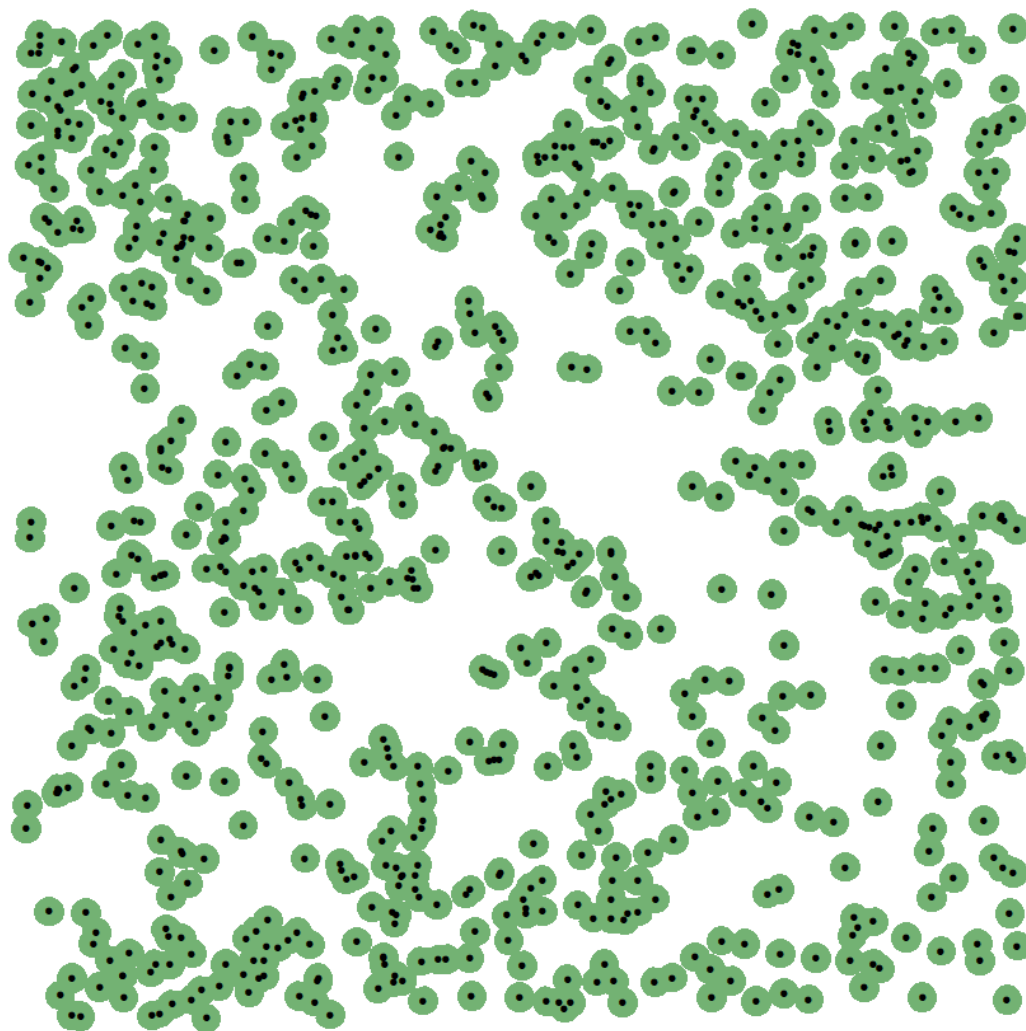


Figura 13. Mapa de fustes con radio buffer de 1.5 m aplicado en bosque de referencia de Talcan.

8.2.2 Grupos funcionales de tolerancia a la sombra

Se observó para los diferentes bosques que al aplicar los diferentes radios definidos la distribución del porcentaje de individuos agrupados variaba entre grupo funcional (intolerantes, semitolerantes y tolerantes) y además variaba entre los tres bosques (Figura 14, 15 y 16), lo que no permitió utilizar un radio estándar para todos los bosques.

Butachauques presentó mayor representación de tamaños de núcleos en el grupo funcional de las tolerantes, específicamente para el radio de 2 m con 9 de 10 tamaños representados (Figura 14 c), mientras que las intolerantes presentaron una baja representatividad de tamaños, llegando a 4 tamaños máximos representados para un radio de 3,5.

Lemuy presentó otro tipo de comportamiento respecto a la definición del radio a aplicar. Se obtuvo mayor representación de tamaños de núcleos en el grupo de las especies intolerantes llegando a tener una cantidad máxima de 7 tamaños representados en el radio de 2 metros (Figura 15 a). En cambio las especies tolerantes de Lemuy sólo tuvieron 2 tamaños representados, donde la distribución de estos dos tamaños es más homogénea en el radio de 2,5 m (Figura 15 c). Las Semitolerantes para este bosque tiene un comportamiento medio para los tres grupos funcionales, representando un máximo de 5 tamaños para el radio de 3,5 m (Figura 15 b).

En cuanto a Talcan, se vuelve a producir lo que sucedió con el bosque de Butachauques, la menor representación de tamaños se da en las especies intolerantes, mientras que en las tolerantes hay alta representación de tamaños. Para las intolerantes se alcanzó una representación máxima de 2 tamaños, de la cual se tomó por la homogeneidad de la distribución el radio de 2 m (Figura 16 a). En cambio en el grupo de las tolerantes se llegó a 8 tamaños representados, tanto en el radio de 1,5 m como en el de 2 m, sin embargo en este último los tamaños están distribuidos de manera más homogénea (Figura 16 c).

Finalmente, tras considerar el promedio por bosque, el algoritmo de Plotkin fue aplicado con diferentes radios para cada bosque. Se usó para Butachauques un radio de 2,7 m para las especies intolerantes, semitolerantes y tolerantes. Al igual que el bosque de Lemuy que se usó el mismo radio. En cambio para el bosque de Talcan se usó un radio de 2,3 m.

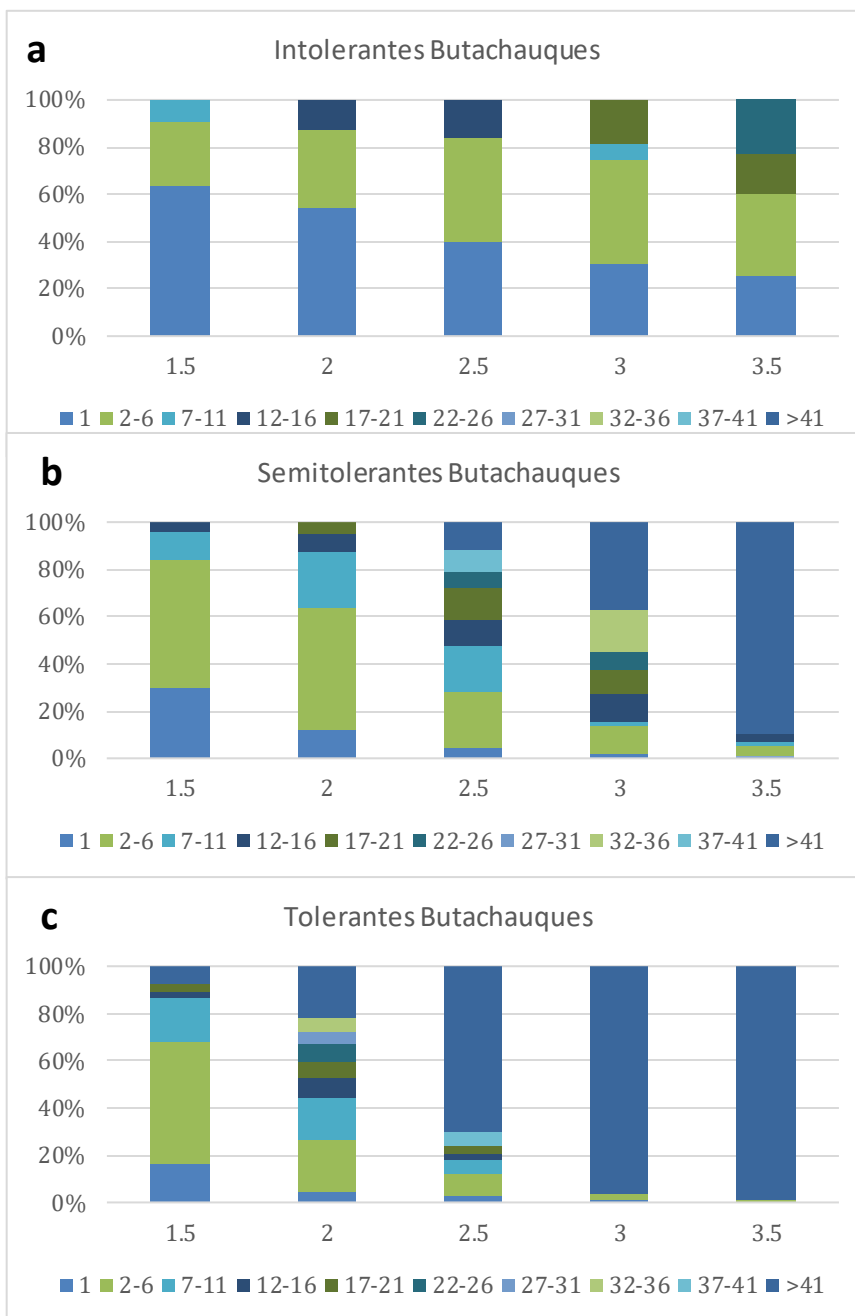


Figura 14. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Butachauques, considerando grupo funcional de tolerancia a la sombra. El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.

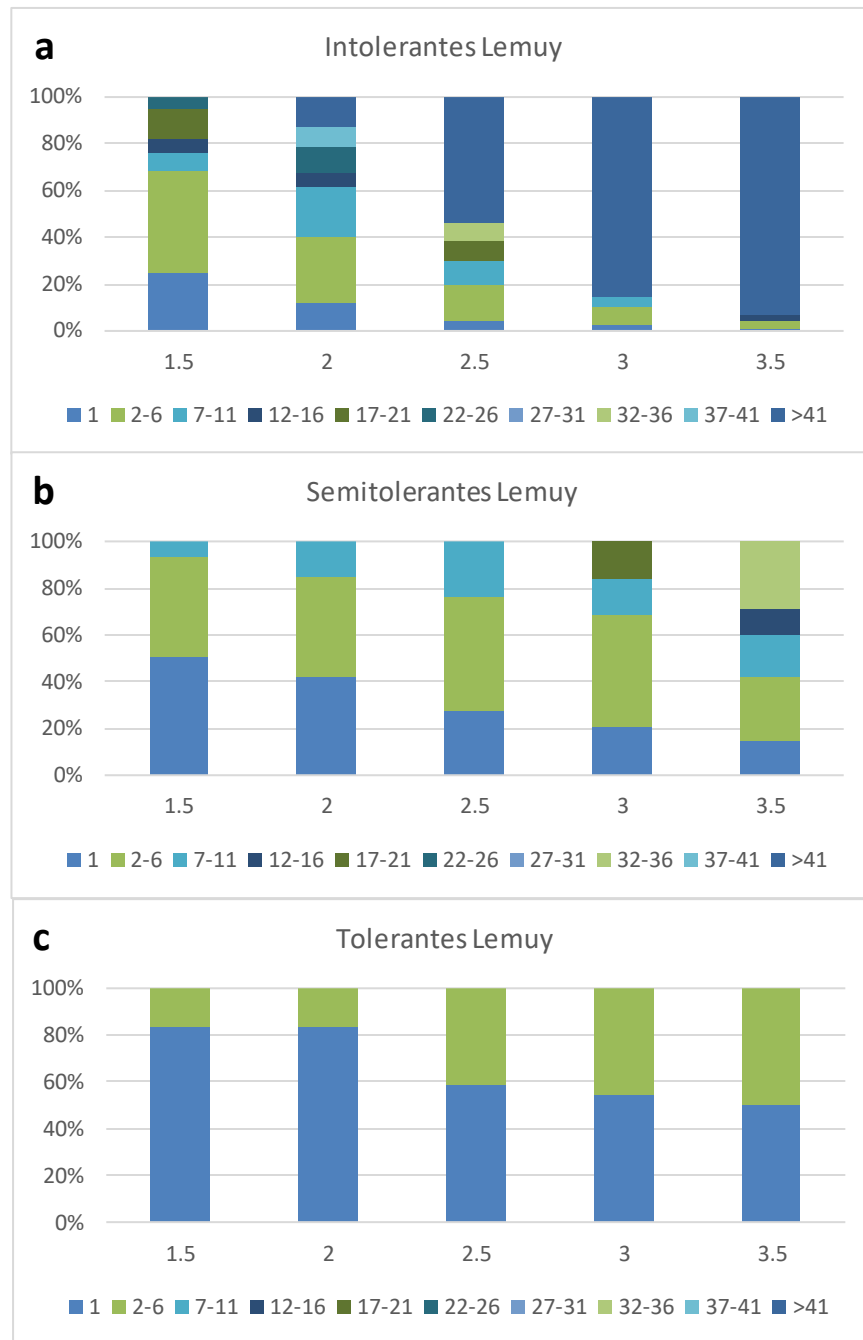


Figura 15. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Lemuy considerando grupo funcional de tolerancia a la sombra. El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.



Figura 16. Porcentaje de individuos agrupados en diferentes tamaños de grupos según radio (m) de buffer para el bosque Talcan, considerando grupo funcional de tolerancia a la sombra. El tamaño de los grupos está distribuido en intervalos de 5, obteniendo un total de 10 tamaños.

El total de núcleos registrados varía considerablemente entre los tres bosques (Tabla 9), en Butachauques y Lemuy liderando en cantidad total de núcleos con 50 y 56 núcleos respectivamente, mientras que Talcan tiene un menor número de núcleos, siendo 29 para intolerantes y 62 para semitolerantes. En todos los casos, los núcleos de tolerantes son menos frecuentes, con un máximo de 42 en Talcan.

En relación con el promedio de individuos por núcleo, se observa una clara variación entre los grupos funcionales. En Butachauques, los núcleos de tolerantes presentan un promedio notablemente alto de 27 individuos por núcleo, mientras que los intolerantes y semitolerantes tienen promedios mucho menores, de 2 y 7 individuos, respectivamente. En Lemuy, los intolerantes lideran con 9 individuos por núcleo, seguidos de los semitolerantes con 2 y los tolerantes con apenas 1 individuo. Talcan muestra un patrón similar, con los tolerantes destacando nuevamente por un promedio alto de 17 individuos por núcleo, frente a los semitolerantes (3) e intolerantes (1).

Respecto al área promedio de los núcleos, los valores varían de manera significativa entre los grupos y bosques. En Butachauques, los núcleos de tolerantes abarcan el mayor promedio de área con 309,2 m², mientras que los núcleos de intolerantes y semitolerantes tienen áreas mucho menores, de 37,6 m² y 103,2 m², respectivamente. En Lemuy, el área promedio más alta corresponde a los intolerantes con 120,4 m², seguida por los semitolerantes con 38,2 m² y los tolerantes con apenas 28,6 m². Talcan, por su parte, presenta áreas promedio menores en general, destacando nuevamente los núcleos de tolerantes con 145,7 m², seguidos por los semitolerantes con 32,1 m² y los intolerantes con 20,3 m².

El rango de área de los núcleos también muestra diferencias importantes. Los núcleos de tolerantes en Butachauques tienen el rango más amplio (22,9 - 5624,3 m²), lo que refleja una alta variabilidad en el tamaño de estos núcleos. En Lemuy, los rangos son menores, con un máximo de 22,9 - 1080 m² para los intolerantes, mientras que en Talcan los rangos también son más pequeños, con un máximo de 16,6 - 1786 m² para los tolerantes.

En general, los núcleos en los tres bosques presentan diferencias en cantidad, número de individuos y tamaño, lo que refleja una alta diversidad estructural. Esta información proporciona una base sólida para diseñar estrategias de restauración que busquen replicar la distribución espacial y la composición de los bosques de referencia, ajustando los parámetros según las condiciones locales y los objetivos de restauración.

Tabla 9. Resumen sobre núcleos: Total de núcleos, individuos por núcleos y el área respectiva a los núcleos para grupo funcional de tolerancia a la sombra.

Bosque		Núcleos		Área	
	Total de núcleos (núcleos/ha)	Promedio de individuos por núcleo	Rango (individuos/n úcleo)	Área promedio (m ²)	Rango (m ²)
Butachauques					
Intolerantes	50	2 (± 2,59)	1 - 17	37,6 (± 40)	22,9 - 154,3
Semitolerantes	50	7 (± 10,08)	1 - 48	103,2 (± 134,5)	22,9 - 707,5
Tolerantes	22	27 (± 108,39)	1 - 511	309,2 (± 1190,5)	22,9 - 5624,3
Lemuy					
Intolerantes	47	9 (± 21,66)	1 - 97	120,4 (± 246,8)	22,9 - 1080
Semitolerantes	56	2 (± 2,26)	1 - 11	38,2 (± 27,9)	22,9 - 176,8
Tolerantes	18	1 (± 0,59)	1 - 3	28,6 (± 12,2)	22,9 - 68
Talcan					
Intolerantes	29	1 (± 0,68)	1 - 3	20,3 (± 6,9)	16,6 - 41,5
Semitolerantes	62	3 (± 3)	1 - 10	32,1 (± 25,4)	16,6 - 133,4
Tolerantes	42	17 (± 43,03)	1 - 229	145,7 (± 333,6)	16,6 - 1786

8.2.3 Recomendaciones para la restauración con patrones espaciales en bosques insulares.

A partir de los resultados obtenidos se pueden desarrollar recomendaciones que incluya esta nueva característica estructural al momento de ejecutar planes de restauración.

Si bien los planes de restauración son procesos que requieren más que plantar árboles en altas densidades con sistemas de plantación que nacen desde la silvicultura y el manejo productivo de los bosques, una parte importante para el éxito de estos planes requiere finalmente establecer árboles en un área degradada para recuperar los aspectos estructurales y funcionales (Pinno et al. 2017).

Para bosques insulares que puedan considerarse ecosistemas de referencia, como los analizados en este trabajo, se recomienda, en primer lugar, diseñar plantaciones que incorporen núcleos de árboles. En segundo lugar, y basándose en los resultados obtenidos, cada núcleo debería incluir entre 3 y 6 árboles, siguiendo los promedios observados, con áreas ajustadas que vayan entre los 16 a 28 m². La cantidad de núcleos a implementar dependerá del tamaño total del área a restaurar, teniendo en cuenta que los tamaños propuestos aquí están ajustados para una hectárea.

Además, se sugiere integrar los grupos funcionales de tolerancia a la sombra en los diseños de plantación, con el objetivo de incrementar la heterogeneidad estructural de los bosques restaurados. Esta estrategia también abre la posibilidad de incorporar en futuros proyectos otros aspectos funcionales del ecosistema, como la dominancia de especies. Aunque en este estudio los grupos funcionales fueron analizados de manera independiente, se recomienda en futuros diseños evaluar combinaciones específicas entre especies, definiendo qué especies pueden plantarse juntas y cómo mezclar especies intolerantes, semitolerantes y tolerantes a la sombra.

Otro aspecto clave es garantizar la conectividad entre los núcleos, evitando que queden aislados y se conviertan en pequeños bosquetes dispersos dentro del área de restauración. Esto requiere adaptar cuidadosamente los diseños al tamaño y características del área real a restaurar, priorizando la cohesión del bosque para maximizar su funcionalidad ecológica y su capacidad para generar servicios ecosistémicos.

Contar con datos concretos permitirá llevar un diseño de plantación de forma práctica, puesto que no siempre quien establece las plantas en un sitio a restaurar es quien diseña o trabaja en la restauración de dicho terreno. Por lo tanto, los datos obtenidos sirven de guía para forestar de manera óptima y teniendo en cuenta un ecosistema de referencia, que si bien es estático, buscará acelerar la sucesión sumando los

patrones espaciales a sus características para llegar a la meta que se estableció al estudiar los bosques originales no perturbados de las islas menores de Chiloé como ecosistema de referencia para bosques insulares de Chile.

9. CONCLUSIONES Y CUMPLIMIENTO DEL PERFIL PROFESIONAL

Objetivo Específico 1. Evaluar el patrón espacial de bosques originales no perturbados en las islas menores del Archipiélago de Chiloé.

El análisis de los patrones espaciales mostró que los individuos arbóreos en los tres bosques presentan una distribución agrupada predominante. A través de la función K de Ripley, se identificaron diferencias en la agrupación según los grupos funcionales de tolerancia a la sombra. En Butachauques y Talcan, los individuos tolerantes a la sombra se agrupan de manera consistente en casi toda la distancia analizada, mientras que los semitolerantes e intolerantes presentan patrones más variables, alternando entre agrupación y aleatoriedad. En Lemuy, los individuos intolerantes muestran una tendencia más estable hacia la agrupación, lo que contrasta con los tolerantes, que exhiben patrones más dispersos. Estos resultados resaltan la importancia de incluir la variabilidad en los grupos funcionales como un atributo clave en el análisis de patrones espaciales y en la definición de ecosistemas de referencia para la restauración.

Objetivo Específico 2. Identificar número de núcleos, tamaños de los núcleos y cantidad de árboles por núcleo en los bosques no perturbados.

El análisis de los núcleos mostró que el número total, el tamaño y la cantidad de individuos varían entre bosques y grupos funcionales. En Butachauques, los núcleos de tolerantes son menos numerosos pero abarcan mayores áreas y concentran más individuos en comparación con los núcleos de semitolerantes e intolerantes, que son más pequeños y numerosos. En Lemuy, los núcleos de intolerantes dominan en cantidad y tamaño promedio, mientras que los tolerantes tienen núcleos más pequeños y escasos. Talcan presenta una tendencia similar a Butachauques, con núcleos más grandes y diversos en los tolerantes. Estas diferencias evidencian la relación entre los patrones espaciales y las características funcionales de los individuos, información que resulta esencial para diseñar restauraciones que emulen tanto la composición como la estructura natural de los bosques originales.

Objetivo específico 3. Desarrollar recomendaciones para la restauración con patrones espaciales para las islas menores del Archipiélago de Chiloé.

Los resultados de este proyecto permiten proponer recomendaciones que incorporan los patrones espaciales en los planes de restauración, destacando las plantaciones de núcleos, con números de núcleos, cantidad de árboles por núcleos y área de estos de manera concreta. La integración de grupos funcionales de tolerancia a la sombra es clave para aumentar la heterogeneidad estructural y funcional, promoviendo la resiliencia y similitud con los ecosistemas de referencia.

Garantizar la conectividad entre núcleos es esencial para evitar la fragmentación y favorecer procesos ecológicos como la sucesión. Los datos generados ofrecen una guía práctica para establecer plantaciones basadas en los bosques originales de las islas menores del Archipiélago de Chiloé, acelerando la recuperación de características estructurales y funcionales en áreas degradadas. Este enfoque refuerza la eficacia y sostenibilidad de los planes de restauración para bosques insulares en Chile.

Lo presentado en este trabajo enfatiza la necesidad de unir teoría y práctica en la restauración ecológica, asegurando que los diseños no solo sean efectivos, sino también replicables en diferentes áreas y características de los sitios. Al sumar patrones espaciales a las características de los ecosistemas de referencia, se puede acelerar la sucesión ecológica y avanzar hacia la meta de recuperar bosques que puedan compararse a los ecosistemas de referencia. Este enfoque no solo mejora la eficacia de los planes de restauración, sino que también contribuye a la conservación y sostenibilidad de los bosques insulares de Chile.

Cumplimiento de perfil profesional.

La restauración ecológica es una disciplina que está considerada en la malla curricular de Ingeniería en Recursos Naturales de la Universidad de La Frontera e implica el trabajo con los diferentes recursos naturales, principalmente en la recuperación de estos a través de diferentes métodos e iniciativas mediante una planificación. Esto sumado a la investigación puede generar conocimiento nuevo e incrementar la información en el área. Por lo tanto, desarrollar un trabajo de investigación en esta área permitió en primer lugar la familiarización con la investigación y llevarla a cabo de forma práctica en una institución y un proyecto de investigación FIBN-CONAF, donde se pudo aplicar conocimientos adquiridos en la formación académica como la ecología y la modelación de esta, entre otras habilidades de análisis de datos ambientales. Para luego llevar estos análisis a posibles soluciones que contribuyan a la

recuperación de bosques en una zona con gran patrimonio natural como lo es Chiloé y a la conservación de los recursos naturales que coexisten en los bosques insulares, además de sus funciones ecológicas y servicios ecosistémicos.

10. AGRADECIMIENTOS

A mi hijo Joaquín.

Todo esto es por y para él. Me salvaste en todas las formas en que se puede salvar a alguien.

Sin ánimos de que vivas con esta carga, pero eres el motor de mi vida y de este proceso.

A mi madre Patricia

Por sus sacrificios y entrega completa e incondicional.

Por permitir desarrollarme académicamente en lo que me hace feliz.

A mis amigos y amigas de la universidad y de Ancud.

Por acompañarme, leerme, apoyarme y aliviarme la carga cuando todo se volvía abrumante.

A Jan Bannister y profesor Rodrigo Vargas.

Por guiarme en este proceso, por enseñarme sobre el vasto y lindo mundo de la restauración y la investigación. Por sus conocimientos, sugerencias, correcciones y comprensión.

A INFOR Chiloé

A Natalia Cáceres, Francisca Meneses, Enrique Villalobos, Natalia Carrasco y Felipe Barrientos.

Por acogerme y darme un espacio seguro y lleno de conocimientos para desarrollarme como practicante y tesista.

A mi abuela Ana y tía Katia.

Por ayudarme cuando más lo necesité.

A todos agradezco profundamente.

Finalmente, dejo una frase que me ayudó día a día:

“Tus comienzos serán humildes pero tu futuro será próspero”

- Min Yoongi

11. BIBLIOGRAFIA

- Aguilera, P., Blanco, G. 2024. Historia Ambiental con Perspectiva Relacional: La Territorialización de la Cuenca del Río Chepu, Chiloé, Chile 1982-2022
- Alaniz, A. J., & Carvajal, M. A. 2019. Chile: Environmental History, Perspectives and Challenges. Nova Science Publishers.
- Altamirano, A., Miranda, A., Aplin, P., Carrasco, J., Catalán, G., Cayuela, L., Fuentes-Castillo, T. et al. 2020. Natural forests loss and tree plantations: large-scale tree cover loss differentiation in a threatened biodiversity hotspot. *Environmental Research Letters*, 15(12): 124055.
- Bahamóndez, V., Martin Stuenkel, M., Müller-Using, S., Rojas Ponce, Y., & Vergara Asenjo, G. 2009. Case studies on measuring and assessing forest degradation. An operational approach to forest degradation. *Forest Resources Assessment Working Paper* 158.
- Bannister, J.R. & Donoso, P.J. (2013). Forest Typification to Characterize the Structure and Composition of Oldgrowth Evergreen Forests on Chiloe Island, North Patagonia (Chile). *Forests*, 2013(4): 1087-1105. <https://doi.org/10.3390/f4041087>
- Cáceres Novoa, N., Meneses Jiménez, F., Fuenzalida Carrión, J., Vidal Ojeda, O., & Bannister Hepp, J. (2024). Diagnóstico del estado actual de los bosques nativos de las islas menores de la región de Los Lagos, Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 29(3), 21–44. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.597>
- CONAF. 2016. Nivel de Referencia de Emisiones Forestales / Nivel de Referencia Forestal Subnacional de Chile. Corporación Nacional Forestal.
- Echeverría, C., Gatica, P., Román, S., Bordeu, A. & Espinoza, C. 2021. Más allá de la deforestación: Restauración ecológica de bosques nativos en el Parque Nacional Nonguén, Chile. Primera Edición. Universidad de Concepción. 123 p.

- Fuentes, N., Marticorena, A., Saldaña, A., Jerez, V., Ortiz, J. C., Victoriano, P., Moreno, R. A., Larraín, J., Villaseñor-Parada, C., & Palfner, G. 2020. Multi-taxa inventory of naturalized species in Chile. *NeoBiota*, 60, 25-41.
- Gadow K., C. Zhang, C. Wehenkel, A. Pommerening, J.J. Corral-Rivas, M. Korol, *et al.* 2012. Forest Structure and Diversity. 23: 29-83.
- Informe País. 2019. Estado del Medio Ambiente en Chile 2018. Santiago, Chile.
- McWethy, D. B., Pauchard, A., García, R. A., Holz, A., González, M. E., Veblen, T. T., Stahl, J., & Currey, B. 2018. Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLOS ONE*, 13 (8).
- Oliver, C., Larson, B. (1990). *Forest stand dynamics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Pinno, B. D., Schoonmaker, A., Yücel, Ç. K., & Albricht, R. (2017). Cluster planting: Early enhancement of structural diversity in a reclaimed boreal forest. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation*, 6(2), 37–50. <https://doi.org/10.21000/JASMR17020037>
- Puettmann K., C. Messier, K. Coates. 2009. *A Critique of Silviculture: Managing For Complexity*. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press.
- Oliver, C., Larson, B. (1990). *Forest stand dynamics*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Reyes, R. 2021. *Promotores socioeconómicos de la pérdida y degradación del bosque nativo en Chile*. FAO, MINAGRI.
- Reyes, R., Sanhueza, R., Schueftan, A. 2022. Consumo de leña y otros biocombustibles sólidos en la región de Los Lagos: fuerte presión sobre bosques que crecen en suelos frágiles. En: *Informes técnicos BES, Bosques -Energía -Sociedad*, Año 8. N° 15. Diciembre 2022. Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM. Instituto Forestal, Chile. p. 35.
- Ripley B.D. 1977. Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)* 39(2): 172-212.
- Society for Ecological Restoration (SER) International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas. 2004. Principios de SER International sobre la restauración ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International.

Veblen, T.T., Schlegel, F. & Oltremari, J. (1983). "Temperate broad leaved evergreen forests of SouthAmerica". In: Ovington, J.D. (Edit.). Temperate broad-leaved evergreen forest. Elsevier, Amsterdam. Pp: 5–31.

Zamorano-Elgueta, C. 2018. ¿Silvopastoreo en los bosques templados del sur de Chile? Perspectivas para un manejo forestal y ganadero sustentable. En Silvicultura en bosques nativos experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos. (Pablo J. Donoso, Álvaro Promis y Daniel P. Soto, pp. 157-167).

12. ANEXOS Y APENDICES

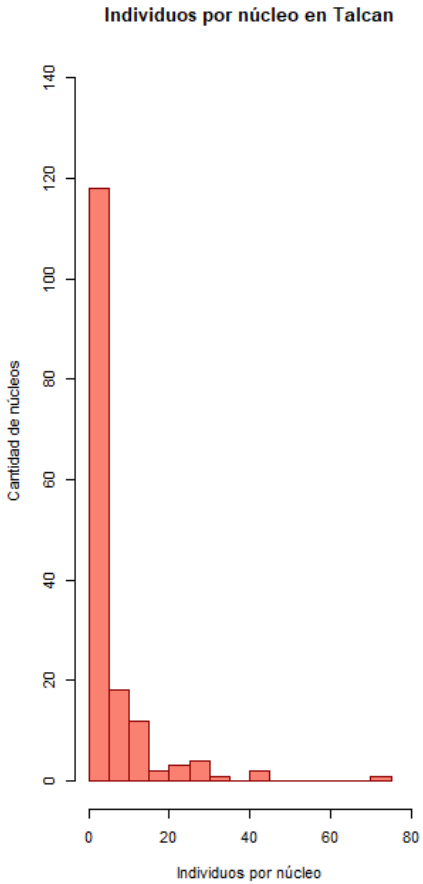
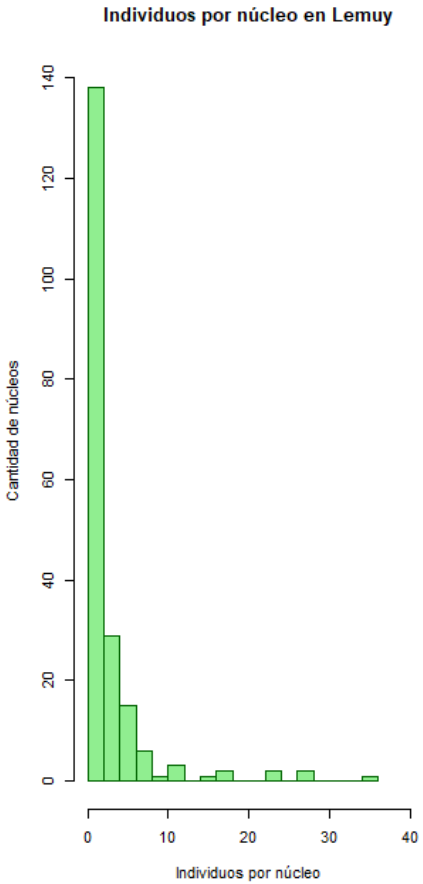
Anexo 1. Listado de especies para cada bosque y su riqueza respectivamente sin aplicar el filtro de DAP > 10 cm.

Bosque	Butachauques	Lemuy	Talcan
		Amomyrtus luma	
		Aristotelia chilensis	
	Amomyrtus luma	Azara lanceolata	Amomyrtus luma
	Amomyrtus meli	Caldcluvia paniculata	Crinodendron hookerianum
	Caldcluvia paniculata	Crinodendron patagua	Caldcluvia paniculata
	Drimys winteri	Drimys winteri	Crinodendron patagua
	Laureliopsis philipiana	Eucryphia cordifolia	Drimys winteri
	Lomatia ferruginea	Gevuina avellana	Luma apiculata
	Myrceugenia parvifolia	Lomatia hirsuta	Lomatia ferruginea
	Nothofagus dombeyi	Laureliopsis philipiana	Laureliopsis philipiana
	Raukua laetevirens	Luma apiculata	Myrceugenia parvifolia
	Tepualia stipularis	Nothofagus dombeyi	Nothofagus dombeyi
		Raukua laetevirens	Raukua laetevirens
		Rhaphithamnus spinosus	
		Weinmannia trichosperma	
Riqueza	10	15	11

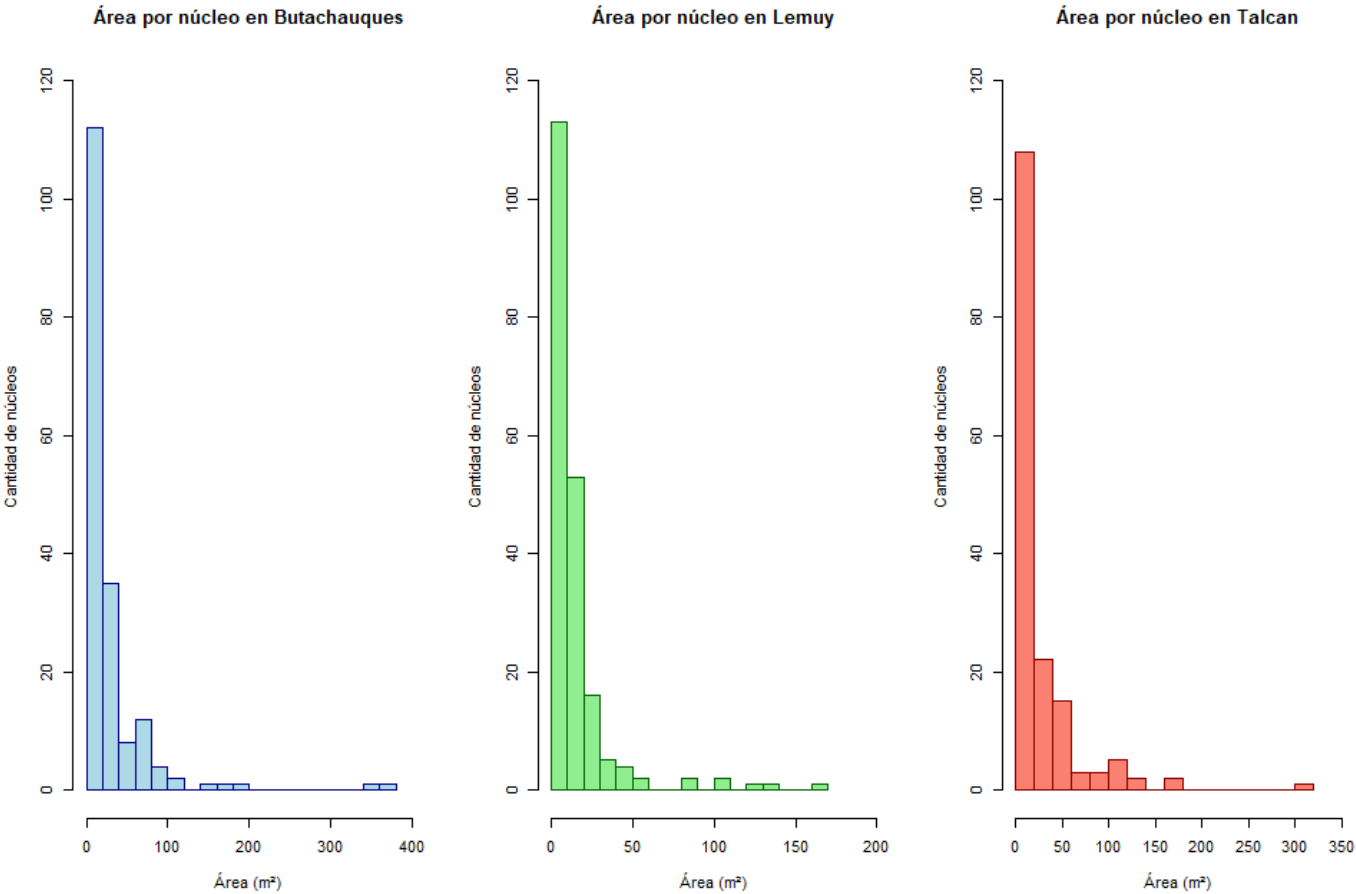
Anexo 2. Abundancia absoluta y relativa por especie para cada bosque sin aplicar el filtro de DAP > 10 cm.

Bosque	Especie	Abundancia absoluta	Abundancia relativa (%)
Butachauques	A. luma	946	53.18
	D. winteri	311	17.48
	L. phillipiana	240	13.49
	C. paniculata	116	6.52
	N. dombeyi	100	5.62
	T. stipularis	13	0.73
	R. laetevirens	12	0.67
	M. parvifolia	9	0.51
	A. meli	6	0.34
	L. ferruginea	1	0.06
	Sin identificación	25	1.41
	Total	1779	100
Lemuy	N. dombeyi	465	31.78
	L. hirsuta	276	18.87
	L. apiculata	196	13.40
	G. avellana	111	7.59
	C. paniculata	94	6.43
	A. luma	80	5.47
	E. cordifolia	29	1.44
	D. winteri	23	1.57
	R. spinosus	18	1.23
	W. trichosperma	10	0.68
	C. patagua	4	0.27
	R. laetevirens	4	0.27
	L. phillipiana	3	0.21
	A. chilensis	2	0.14
	A. lanceolata	1	0.07
	Sin identificación	147	10.05
	Total	1463	100
Talcan	A. luma	889	55.53
	M. parvifolia	198	12.37
	D. winteri	114	7.12
	C. patagua	106	6.62
	L. phillipiana	89	5.56
	C. paniculata	77	4.81
	C. hookerianum	65	4.06
	N. dombeyi	44	2.75
	L. apiculata	6	0.37
	L. ferruginea	4	0.25
	R. laetevirens	1	0.06
	Sin identificación	8	0.5
	Total	1601	100

Anexo 3. Cantidad de núcleos con relación a la cantidad de individuos por núcleos evaluados en bosques de referencia de islas menores de Chiloé.

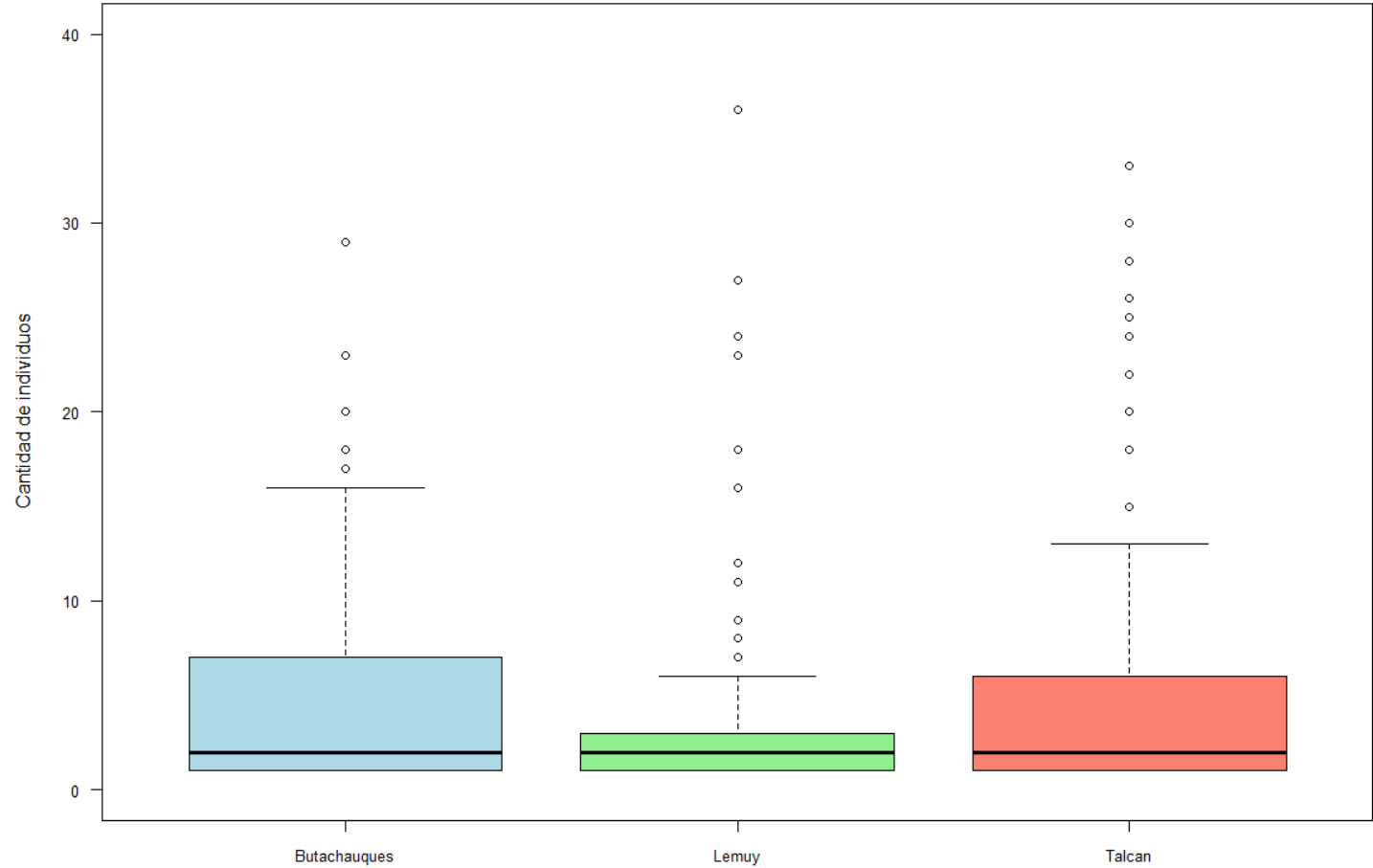


Anexo 4. Cantidad de núcleos en función al área (m²) en cada bosque de referencia.



Anexo 5. Distribución total de la cantidad de individuos por núcleo para cada bosque de referencia.

Individuos por núcleo para cada bosque de referencia



Anexo 6. Distribución del área (m²) por núcleo para cada bosque de referencia.

