



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS -ESCUELA DE PREGRADO

**“Variación geográfica de la distribución altitudinal de  
*Kageneckia angustifolia* (D.Don): Uso de Google Earth como  
herramienta de muestreo”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de: **Biólogo con mención en Medio Ambiente**

**Luciano Andrés Arrau Arrau**

Director del Seminario de Título: Dr. Ramiro Osciel Bustamante Araya

Co-Director del Seminario de Título: MSc. Ignacio Núñez Hidalgo

Julio 2022

Santiago – Chile



## **INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO**

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el Sr.:

**Luciano Andrés Arrau Arrau**

**“VARIACIÓN GEOGRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN ALTITUDINAL DE  
KAGENECKIA ANGUSTIFOLIA(D.DON): USO DE GOOGLE EARTH COMO  
HERRAMIENTA DE MUESTREO”**

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Biólogo con Mención en Medio Ambiente.

**Director Seminario de Título**

Dr. Ramiro O. Bustamante Araya

**Co-director Seminario de Título**

Msc. Ignacio Núñez Hidalgo

**Comisión Revisora y Evaluadora:**

**Presidente Comisión**

Dr. Luis Felipe Hinojosa

**Evaluador**

Dra. Milén Duarte

Santiago de Chile, julio de 2022

## BIOGRAFÍA



### **Luciano Arrau Arrau**

Nací el 21 de agosto de 1994, un inusual día en Santiago de Chile, convirtiéndome en el “conchito” de la familia. Transité por varios colegios durante la educación básica, para asentarme finalmente en el querido Liceo José Toribio Medina, el famoso Liceo 7 de Ñuñoa, donde tuve maravillosos profesores/as de Ciencias, Historia y Artes que continuaron impulsando y promoviendo mis intereses e inquietudes intelectuales. Mis papás, Marcelo Arrau e Isabel Arrau, han sido importantísimos desde que era niño para descubrir y potenciar el interés y fascinación por la Naturaleza. Cada una de las veces que fuimos al Quillayal, en el Cajón del Maipo, como también en otros sectores cordilleranos, mi papá me mostraba como cierta avispa realizaba su rito de cazar arañas, además de buscar alacranes bajo las rocas. Mientras, con mi mamá buscábamos plantas con variadas formas tanto al borde del río como en las laderas. Ese influjo de situaciones, de búsquedas en la lectura y en la experiencia en la Naturaleza, marcó una impronta que me motivó a estudiar Biología Ambiental. Con esos intereses en mente, una vez llegado el momento, me integré al laboratorio de mi querido profesor Ramiro Bustamante, quién acogió mis ganas de estudiar un árbol cordillerano, el Frangel.

## DEDICATORIA

*Dedicado a mis padres y a mi hermano por el apoyo incondicional y profundo amor que siempre me han entregado, son uno de los refugios más importantes de mi vida.*

*A ti, Frangel*

*Vigía y guardián de la entrada al altoandino*

*Apacible y añoso señor de las alturas*

*Con tu copa cenicienta y tu corteza resquebrajada*

*Recibes y cobijas a todo aquello que busca compañía y silencio*

*Dulce niño y niña, viejito y viejita, a ti, te dedico estas palabras.*

## AGRADECIMIENTOS

Primero, quiero agradecer a mi tutor, maestro y amigo Ramiro Bustamante, por su apoyo constante, sus consejos, y sensibilidad que en varias ocasiones me ayudaron a salir de mantos de dudas y confusión que no pocas veces arreciaron durante la realización de este seminario. Nunca me deja de asombrar como la guía rigurosa, pero también empática y cariñosa nos ayuda a entender y descubrir realidades que no eran distinguibles a primera vista. Por eso y más, muchas gracias Profe.

A mi cotutor, Ignacio Núñez-Hidalgo, por mostrarme aplicaciones desconocidas de los increíbles satélites, por su paciencia, y, sobre todo, por motivarme a incursionar en herramientas y métodos novedosos, para poder explorar y entender más el fascinante planeta en que vivimos.

A las y los integrantes del laboratorio de Ecología Geográfica, Ronny, Estefy, Pancho, Milén, Paula, Sari, Nico V., entre muchos/as más, por el apoyo en terreno, el compañerismo, buena conversa, y, sobre todo, un ambiente cálido y amistoso, donde siempre me sentí cómodo y relajado para trabajar y estar.

A mi papá Marcelo, por apoyarme y acompañarme siempre en mis ansias infinitas de aprender, saber y conocer más. Por mostrarme a la *Pepsis limbata* comiendo una araña pollito a orilla del Maipo, por transmitirme el amor por el conocimiento y por los libros. Todas estas experiencias me han marcado a fuego, y me hacen buena parte de lo que soy hoy.

A mi mamá Isabel, por cada uno de los regaloneos, de los mapas repletos de detalles que amaba cuando era niño y que tanto me impulsaron a querer explorar y descubrir, por apoyarme para mis viajes y ganas de conocer, por impulsarme a ser feliz, y, sobre todo, por tanto cobijo y amor que siempre me ha dado.

A mi hermano Cristián, por ser un ejemplo para mí de constancia, cariño, empatía, talento y perseverancia a pesar de las dificultades. Eres increíble, y sólo deseo que sigamos creciendo y logremos vivir en plenitud.

A Mukti, mi gato, por todo el amor, juegos y galopes que tanta alegría me dan.

A mis amigos y amigas que hice en la U, que durante años nos hemos acompañado, dado alegrías, consejo y apoyo cuando más lo necesité. Al Tally, Koki, Claudio, Dieter, Romi, Gloria, entre otros, por conversaciones sobre mil cosas, por acompañarnos durante pandemias, estallidos sociales, fiestas, viajes y más. Tantas personas valiosas que he conocido estos increíbles años. Por eso y más, mil gracias. Sigamos acompañándonos.

A cada una de las personas con las que durante años he conversado, imaginado nuevos (y antiguos) mundos, encontrado nuevas ideas, amores y proyectos.

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b>	
<b>BIOGRAFÍA</b> .....	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2.-Objetivos</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1.- Objetivo general:</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.- Objetivos específicos:</b> .....	<b>11</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1.- Especie de estudio</b> .....	<b>12</b>
<b>3.2- Área de estudio</b> .....	<b>14</b>
<b>3.3.1.- Método de Muestreo</b> .....	<b>15</b>
<b>3.3.2-Validación del método de muestreo</b> .....	<b>16</b>
<b>3.4.-Estimación de las curvas de distribución de <i>Kageneckia angustifolia</i></b> <b>en el gradiente altitudinal</b> .....	<b>16</b>
<b>3.5.-Temperatura y límite arbóreo</b> .....	<b>17</b>
<b>3.6.- Análisis estadístico</b> .....	<b>20</b>
<b>4.- RESULTADOS</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1.-Caracterización de la distribución altitudinal de <i>K. angustifolia</i> a lo</b> <b>largo de su gradiente de distribución latitudinal.</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1.1.-Validación del método de muestreo.</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1.2.- Resultados del muestreo de la especie a través de transectas.</b> .....	<b>22</b>
<b>4.2.- Estimación del límite arbóreo a partir de curvas de respuesta de los</b> <b>modelos HOF.</b> .....	<b>23</b>
<b>4.3.- Modelo estadístico para evaluar relación entre Límite arbóreo</b> <b>observado y otras variables explicativas.</b> .....	<b>25</b>
<b>5.-DISCUSIÓN</b> .....	<b>28</b>
<b>6.-CONCLUSIÓN</b> .....	<b>35</b>

<b>7.- BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>36</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>41</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

### LISTA TABLAS

<b>Tabla I.</b> Matriz de confusión para establecer la precisión del método de muestreo.....	<b>22</b>
<b>Tabla II.</b> Resultados del GLM para Límite arbóreo observado (LAO) en función de la T° media, Índice de continentalidad, “Región” y la interacción entre T° media y el Í. de continentalidad.....	<b>25</b>

### LISTA TABLAS ANEXO

<b>Tabla I.</b> Individuos con los que se validó el método de estudio. Se describe la ID del punto, la especie correspondiente, y el valor de georreferencia.....	<b>51</b>
<b>Tabla II.</b> Conjunto de transectas en que se observaron presencias de <i>K. angustifolia</i> . Se indica la identidad de cada una de las transectas, los límites arbóreos observados para cada una de estas, y los límites arbóreos predichos a partir de lo determinado por los modelos HOF.....	<b>52</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

### LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diferentes conceptos del rango altitudinal de distribución de los bosques.....	<b>6</b>
<b>Figura 2.</b> Representación esquemática del efecto de elevación de masa en sistemas montañosos .....	<b>9</b>
<b>Figura 3.</b> Hábito y forma de copa de <i>Kageneckia angustifolia</i> .....	<b>12</b>
<b>Figura 4.</b> Flor masculina de <i>Kageneckia angustifolia</i> .....	<b>13</b>
<b>Figura 5.</b> Área de estudio .....	<b>14</b>
<b>Figura 6.-</b> Ejemplo de Modelo HOF asociado a una transecta.....	<b>23</b>
<b>Figura 7.</b> Variación del límite arbóreo observado y límite arbóreo predicho de <i>Kageneckia angustifolia</i> en un gradiente Latitudinal.....	<b>24</b>
<b>Figura 8.</b> Boxplot límite arbóreo observado de <i>K. angustifolia</i> en las 3 Regiones en que se subdividió área de estudio.....	<b>26</b>
<b>Figura 9.</b> Variación del límite arbóreo observado en función de la T° media de la estación de crecimiento.....	<b>27</b>
<b>Figura 10.</b> Variación del límite arbóreo observado en función del índice de continentalidad.....	<b>27</b>

### LISTA DE FIGURAS ANEXO

<b>Figura 1.</b> Paleta de colores de referencia, para identificar presencia de <i>K. angustifolia</i> en el gradiente altitudinal a través de Google Earth Pro.....	<b>41</b>
<b>Figura 2.</b> Modelo de elevación digital del área de estudio.....	<b>41</b>
<b>Figura 3.</b> Método de procesamiento del conjunto de imágenes Landsat-8 para calcular la Temperatura a nivel del suelo (LST).....	<b>42</b>
<b>Figura 4.</b> T° media estación de crecimiento (Noviembre2016-Junio2017) para toda el área de estudio, obtenida del parámetro LST.....	<b>43</b>
<b>Figura 5.</b> Área de validación del método de muestreo.....	<b>44</b>
<b>Figura 6.</b> Individuos con que se validó el método de muestreo.....	<b>48</b>
<b>Figura 7,</b> Conjunto de 32 modelos HOF a partir de los cuales se calculó el límite arbóreo predicho para cada una de las transectas con ocurrencias de la especie.....	<b>50</b>

## RESUMEN

El límite arbóreo corresponde a la altitud que marca la separación de dos formaciones vegetacionales: bosque nativo y vegetación altoandina, siendo la temperatura el factor principal que explica esta zona de transición. Debido a la variación latitudinal de la temperatura, la altitud que define el límite arbóreo decrece conforme el aumento de la latitud. *Kageneckia angustifolia*, especie arbórea nativa de Chile Central, que marca el límite arbóreo en los Andes mediterráneos junto a otras especies, constituye un buen modelo para poner a prueba esta predicción. La caracterización de la distribución geográfica de una especie es difícil de realizar sólo a través de trabajo de campo. En este caso, caracterizar el límite arbóreo de *K. angustifolia*, que habita zonas remotas o de difícil acceso, es una tarea desafiante y costosa si sólo se considera trabajo de campo. Afortunadamente, se pueden resolver este tipo de problemas a través del uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica, que han jugado un importante rol en el modelamiento y visualización de los patrones de distribución de especies. Para caracterizar la distribución del límite arbóreo de esta especie en su gradiente latitudinal, se utilizó en primer lugar Google Earth para medir el límite arbóreo de esta especie en dicho rango a través de un conjunto de transectas. Segundo, con la información de cada transecta, se construyeron modelos HOF para la estimación del límite arbóreo. Tercero, a través de sensores remotos se obtuvieron los valores de temperatura además del índice de continentalidad asociados al límite arbóreo de cada transecta, para evaluar la correlación entre tales variables y este ecotono. El resultado más importante de este estudio es la existencia de una relación no lineal entre el límite arbóreo y la latitud, siendo mayor altitud de éste en la zona central del rango de distribución de la especie, para luego decrecer hacia el Sur de su distribución; este

resultado es levemente diferente a lo esperado, sin embargo, abre la posibilidad de analizar las implicancias de este resultado en términos de que no existiría un patrón idéntico para el límite altitudinal de los árboles, con comportamientos que varían según la especie, topografía y clima. El modelo estadístico construido reafirma lo descrito en literatura sobre el comportamiento del límite arbóreo en función de la latitud ( $p$ -valor $<0.05$ ), sin embargo, no se logró establecer una correlación estadística robusta entre este límite, la temperatura y continentalidad ( $p$ -valor $>0.05$ ), en contraste con la literatura, y lo sugerido sobre este último factor, el que podría explicar parte de la complejidad de las respuestas en nuestro país. Con los hallazgos realizados, se destaca la necesidad de considerar la latitud geográfica en la determinación de los límites altitudinales para las especies arbóreas. El uso integrado de Google Earth junto a sensores remotos, puede ser adecuado para estudiar este tipo de fenómenos de gran escala espacial, contribuyendo con ello a una potente aproximación para comprender las causas que dan forma a la distribución de las especies arbóreas en torno a su límite altitudinal.

## ABSTRACT.

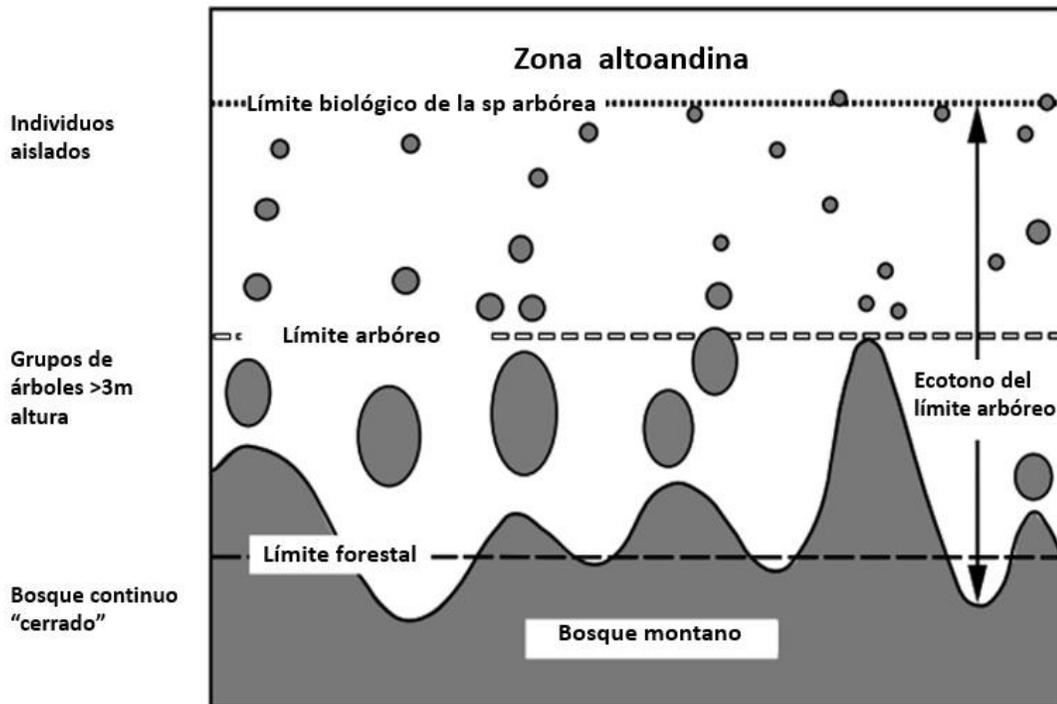
The treeline corresponds to the altitude that marks the separation between two vegetational formations: Native forest and alpine vegetation, with the temperature the main factor that explains this transition zone. Because of latitudinal variation of temperature, the altitude that define the treeline decreases with increasing latitude. *Kageneckia angustifolia*, a tree species native to Central Chile, which marks the tree line in the Mediterranean Andes together with other species, constitute an adequate model to proof this prediction. The characterization of geographical distribution of a specie is difficult to perform only through field work. In this case, to characterize the treeline of *K. angustifolia*, which inhabits in remote areas with difficult access, it is a challenging and expensive task if only field work is considered. Fortunately, these issues can be solved using remote sensing and geographical information systems, who have played an important role on modelling and visualisation of species distribution patterns. First, to characterize the treeline distribution of this species along its latitudinal gradient, Google Earth was used to measure the treeline through a set of transects. Second, with the information of each transect, HOF models were built to estimate the treeline. In third place, through remote sensors, temperature values and continentality index associated with the treeline, were obtained to evaluate the correlation between those variables and this ecotone. The main result of this study is the existence of a no-linear relation between treeline and latitude, being higher in the central zone of the distribution range of the species, and then decreasing towards the south of its distribution; this result is slightly different than expected, however, it opens the possibility to analyse the implications of this result in terms of there being no identical pattern for the altitudinal limit of trees, with behaviour varying according to species, topography and climate. The statistical model

constructed reaffirms what is described in the literature on the behaviour of the treeline as a function of latitude ( $p\text{-value} < 0.05$ ), however, it was not possible to establish a robust statistical correlation between this ecotone, temperature and continentality ( $p\text{-value} > 0.05$ ), in contrast to the literature, and what was suggested about this last factor, which could explain part of the complexity of the responses in our country. The findings highlight the need to consider geographical latitude in the determination of altitudinal limits for tree species. The integrated use of Google Earth together with remote sensing may be suitable for studying such large-scale spatial phenomena, thus contributing to a powerful approach to understanding the causes shaping the distribution of tree species around their altitudinal limit.

## INTRODUCCIÓN

El límite arbóreo superior o límite altitudinal superior que alcanzan los árboles es uno de los límites vegetacionales más conspicuos alrededor del planeta (Arno, 1984; Körner, 1998), y marca de manera muy notable dos zonas vegetacionales observadas en el gradiente altitudinal: el bosque continuo cerrado y la zona alpina/altoandina (en inglés, “Alpine zone”) en la cual, entre otras características, no hay presencia arbórea (Körner & Paulsen, 2004). Existen diversas definiciones de qué es el límite arbóreo, considerando diferentes perspectivas: demográfica (Cullen y col., 2001; Cuevas, 2000, Germino y col., 2002), ecofisiológica (Cavieres & Piper, 2004; Körner & Paulsen, 2004; Körner, 2012; Paulsen & Körner, 2014; Fajardo & Piper, 2014; Piper y col., 2016), entre otras. En términos generales este límite correspondería a la altitud a la cual dejan de crecer los árboles como tal y adoptan un hábito “achaparrado” y/o arbustivo (“krummholz” Körner, 1999; Körner, 2012).

Una característica de este límite es que nunca es abrupto; de hecho, desde una abundancia más a menos continua, los árboles se empiezan a aislar formando grupos o bien individuos aislados hacia altitudes mayores, conformando así un rango altitudinal complejo que se puede representar de acuerdo con la Figura 1 (Körner, 1998; Körner, 2012).

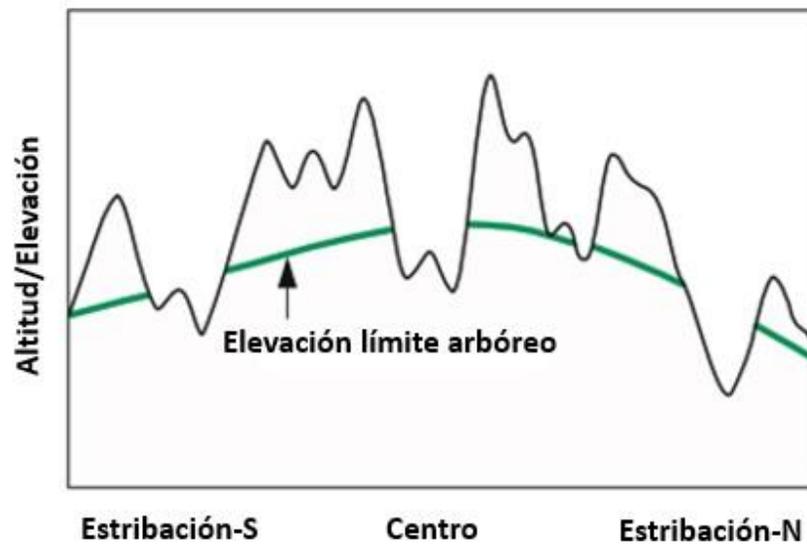


**Figura 1.** Diferentes conceptos del rango altitudinal de distribución de los bosques. Modificado de Körner y Paulsen (2004)

La mayor cantidad de investigaciones sobre límites arbóreos se concentra en zonas templadas del hemisferio norte, principalmente Norteamérica y Europa central. En contraste, existen menos estudios realizados en zonas tropicales, subtropicales, o zonas “mediterráneas” como es el caso de los límites arbóreos de Chile central, entre otros (Körner, 1998; Piper y col., 2016), siendo una de las causas del bajo poder explicativo de los modelos generados (Paulsen & Körner, 2014) para predecir o explicar este fenómeno biogeográfico. Tales modelos se sostienen a partir de información bioclimática como  $T^{\circ}$ , precipitación, entre otras variables, que han sido obtenidas principalmente de zonas templadas del hemisferio norte (Paulsen & Körner, 2014).

Una de las principales razones de la existencia de este ecotono que han sido descritas en literatura, es la relación que hay entre el descenso continuo de la temperatura conforme aumenta la altitud, lo que implica que, a cierta altitud, ocurra una severa limitación fisiológica, impidiendo el crecimiento y/o reproducción de las especies arbóreas (Cavieres & Piper, 2004; Körner, 1999; Körner, 2012; Fajardo & Piper, 2014). Además, tal patrón de variación de la temperatura respecto de la altitud (Von Humboldt & Bonpland, 2010; Körner, 2012; Luebert & Pliscoff, 2019), también se replica en el gradiente latitudinal, con un comportamiento decreciente de la temperatura conforme se incrementa la latitud (Körner, 2012; Luebert & Pliscoff, 2019). Esta variación climática va a determinar que, a su vez, el límite arbóreo decrezca conforme se incremente la latitud, con las menores altitudes alcanzadas en zonas boreales, como en Suecia, donde el límite arbóreo bordea los 650 m.s.n.m., hasta sobre los 5,400 m.s.n.m. en los Andes bolivianos y chilenos (clima subtropical), con el límite arbóreo de *Polylepis tarapacana* alcanzando altitudes por sobre los 4800 m.s.n.m. (Troll, 1973; Körner, 2012). Otro factor que puede afectar el límite arbóreo es la “continentalidad” (Körner, 2012), que corresponde a la magnitud de la amplitud térmica entre temperaturas extremas (máximas y mínimas) (Supan, 1884), que es regulada por la presencia de masas de agua que, en este caso, corresponde a la cercanía de las montañas respecto del océano Pacífico. En ese sentido, dado que la continentalidad afecta la amplitud térmica y con ello la elevación de las  $T^\circ$ , la altitud que puede alcanzar el límite arbóreo puede incrementarse sustantivamente en áreas donde la magnitud de la continentalidad es elevada, y por ende, mayores  $T^\circ$  (Körner, 2012), en comparación a áreas en que las  $T^\circ$  son menores, producto de la influencia de sistemas acuáticos de gran magnitud, como es el caso de lagos, mares interiores u océanos. A partir de lo anterior, los índices de continentalidad pueden ser de utilidad cuando se busca predecir la altitud del límite arbóreo que pueda

alcanzar una especie, dadas ciertas condiciones geográficas y climáticas. Uno de los mejores ejemplos para ilustrar esto, es el concepto de “Efecto de elevación de masa”, (*“massenerhebungseffekt”*, en alemán, como fue acuñado originalmente), el que hace referencia a cómo la distancia al mar, la elevación y área de los sistemas montañosos, influye en el límite arbóreo. Este efecto se puede observar hacia los rangos centrales de ciertos sistemas montañosos, los que actúan como un biombo climático, con condiciones climáticas más áridas y cálidas (climas con elevado índice de continentalidad), con los límites arbóreos alcanzando mayores altitudes, como en el límites arbóreos en el centro de los Himalayas (4.500-4.700 m.s.n.m.), o el Altiplano andino boliviano (>4.800 m.s.n.m .), respecto a lo que ocurre en los vertientes de tales sistemas montañosos que están expuestas a mayor pluviosidad y menores temperaturas, donde el límite arbóreo alcanza una menor altitud (entre 3.600 – 3.800 m.s.n.m. en las vertiente Este y Oeste de los Himalayas, y cerca de los 3.800 m.s.n.m. en los Andes amazónicos bolivianos) (Körner, 2012), lo que queda ilustrado en la Figura 2.



**Figura 2.** Representación esquemática del efecto de elevación de masa o “*massenerhebungseffekt*” en un sistema montañoso de gran envergadura. Se observa como en las vertientes de exposición Norte y Sur (o Este y Oeste, dependiendo del sistema montañoso), el límite arbóreo está más deprimido, respecto a lo observado en la zona central del sistema, donde el límite arbóreo alcanza su mayor elevación. Modificado de Körner (2012).

En los Andes mediterráneos de Chile, la especie que marca el límite arbóreo superior es *Kageneckia angustifolia*, “olivillo de montaña”, “Frangel” o “Pulpica” (Muñoz-Schick y col., 2000; Ministerio del Medio Ambiente, 2012; Luebert & Pliscoff, 2019). Como especie que marca el límite arbóreo, se puede utilizar como un indicador de cambio climático en los Andes mediterráneos de Chile central (Barichivich y col., 2009), considerando las proyecciones de incremento de las T° globales en el corto, mediano y largo plazo producto de la actividad antrópica global (Zhang y col., 2001; IPCC, 2021), y con ello el posible desplazamiento de este ecotono en el gradiente altitudinal (Harsch y col., 2009).

La caracterización de la distribución geográfica de una especie es difícil de realizar sólo a través de trabajo de campo. En este caso, caracterizar el límite arbóreo de especies

que habitan en zonas remotas o de difícil acceso es una tarea desafiante y costosa. Afortunadamente, existen técnicas y herramientas que permiten resolver este tipo de problemas a través del uso de sensores remotos. Los Sistemas de información geográfica (SIG) han jugado un importante rol en el modelamiento y visualización de los patrones de distribución de especies (Zhang & Gruenwald, 2008; Vogiatzakis y col., 2006). Considerando lo anterior, a través de Google Earth, se puede visualizar, analizar y caracterizar patrones de distribución espacial como lo es el límite arbóreo, sobre todo en áreas remotas y de difícil acceso, transformando a estas herramientas en una fuente de información muy adecuada y de bajo costo para estudios biogeográficos (Luoto y col., 2004; Cayuela y col., 2006; Lassau & Hochuli, 2007; Mishra & Mainali, 2017). La plataforma Google Earth, ha sido utilizada previamente por varios investigadores para obtener imágenes de límites arbóreos alrededor del mundo (Paulsen & Körner, 2014; Alatalo & Ferrarini, 2017; Jacob y col., 2017), siendo un recurso de fácil uso y acceso. Considerando lo anterior, mediante el uso de esta clase de herramientas, es posible caracterizar la distribución de una especie que habita áreas remotas y de difícil acceso, como es el caso de *Kageneckia angustifolia*.

## **2.-Objetivos**

### **2.1.- Objetivo general:**

Caracterizar la variación geográfica del límite arbóreo de *Kageneckia angustifolia*, a lo largo de su rango de distribución geográfica y evaluar posibles patrones climáticos que determinen la posición de este límite.

### **2.2.- Objetivos específicos:**

- 1) Evaluar la precisión de la metodología de muestreo a través del trabajo en terreno.
- 2) Caracterizar y modelar la distribución altitudinal de *K. angustifolia* a lo largo de su gradiente latitudinal de distribución mediante la utilización de sistemas de información geográfica.
- 3) Estimar el límite arbóreo de *K. angustifolia* a lo largo de un su gradiente de distribución latitudinal, a través de curvas de respuesta HOF.
- 4) Establecer la relación existente entre el límite arbóreo de *Kageneckia angustifolia* en función de latitud, continentalidad y temperatura.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1.- Especie de estudio

En este trabajo, la especie estudiada corresponde a *Kageneckia angustifolia* D. Don., árbol pequeño, de 3-7 metros de altura (Rodríguez y col.,1983; Córdova, 2001), semideciduo, dioico, de copa redondeada y compacta. Hojas lineales o lineal-oblongas, coriáceas, brillantes, aserradas. Flores blancas, masculinas en panojas axilares, femeninas con ovario pentalobulado (Ministerio del Medio Ambiente, 2012). Hábito y flores detallados en la Figura 3 y 4 respectivamente.



**Figura 3.** Hábito y forma de copa de *Kageneckia angustifolia*. (Foto de Carlos Ivovich)  
Recuperado de: <https://www.flickr.com/photos/civovic/6255969734/in/photostream/>

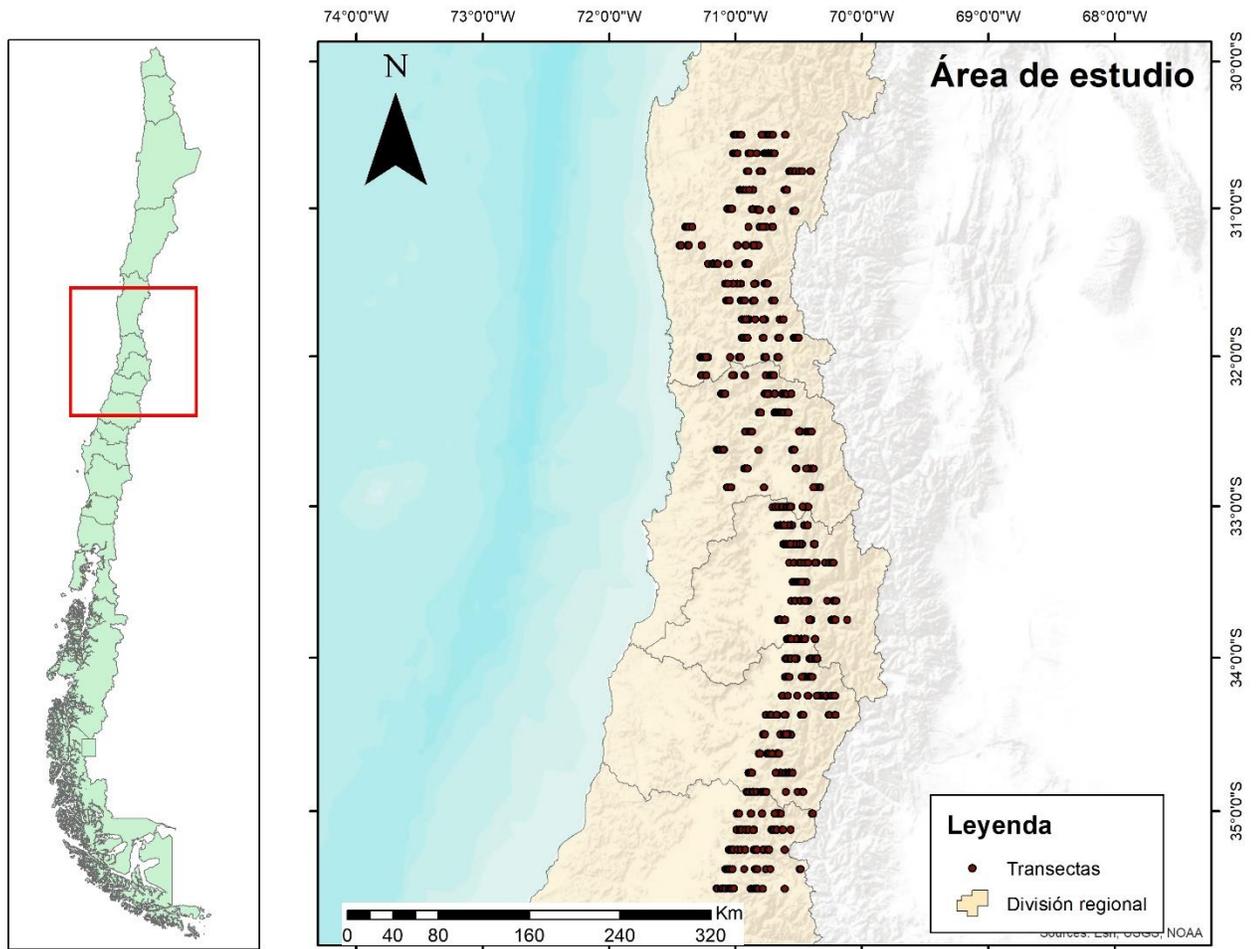


**Figura 4.** Flor masculina de *Kageneckia angustifolia*. (Foto de Lucía Abello) Recuperado de: <https://www.flickr.com/photos/lucianativa/8104078637>

Esta especie endémica de Chile habita quebradas y faldeos de cerros de la cordillera andina (1.500 a 3.000 m.s.n.m.), donde forma pequeños bosques. En la Cordillera de la costa, no forma bosquetes y se observan ejemplares aislados (Rodríguez y col., 1983; Luebert & Pliscoff, 2019). Su rango de distribución latitudinal está entre los 30°22' y 35°05'S, es decir, desde la Provincia de Limarí (IV Región) hasta la Provincia de Talca (VII Región) (Barichivich y col., 2009). *K. angustifolia*, es una especie que actualmente está categorizada como “Casi amenazada” (Ministerio del Medio Ambiente, 2012), aunque “Vulnerable” en una buena parte de su distribución (Región de Coquimbo y Metropolitana), debido principalmente a la presión antrópica por pastoreo y uso de leña (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

### 3.2- Área de estudio

El área de estudio (Figura 5) comprende las regiones de Chile en donde se han descrito poblaciones de *K. angustifolia*, esto es, desde la IV Región de Coquimbo, hasta la VII Región del Maule.



**Figura 5.** Área de estudio dónde se realizaron las transectas, entre los 30°30'S y los 35°30'S, desde la IV Región de Coquimbo hasta la VII Región del Maule. Se señalan las latitudes en grados (°) y el Norte geográfico se señala con una flecha. Las líneas entre cada una de las regiones corresponden a la separación administrativa regional que se ha establecido en Chile. Por otro lado, los círculos de color rojo corresponden a cada uno de los 24 puntos por transecta en que se buscó identificar a *K. angustifolia*.

### 3.3.1.- Método de Muestreo

A través de Google Earth Pro (v 7.3.4.8248, 2021), se definió el área de muestreo como la comprendida entre los 30°30'S y los 35°30'S (Figura 5). Utilizando también el mismo software, se construyeron transectas en dirección Oeste-Este, equidistantes entre ellas por 7 (7') arcos de minuto aproximadamente, lo que equivale a una distancia de ~12.95 km. El número total de transectas fue de 41. El rango altitudinal que abarcaron las transectas fue desde los 700 m.s.n.m. hasta los 3.000 m.s.n.m.; en cada transecta, se distribuyeron 24 puntos de muestreo, separados entre si cada 100 metros en el rango altitudinal mencionado

Para identificar la presencia o ausencia de la especie, se consideró un ancho de 100 metros para cada transecta y se asignó el valor de 1(uno) o 0(cero) en caso de presencia o ausencia respectivamente. Para diferenciar a *K. angustifolia* de otras especies arborescentes o arbustivas, se estableció que la coloración de su copa corresponde a un color “verde ceniciento” (RGB: (102, 194, 164), (65,171, 93) y (35, 139, 69); ver Figura 1, paleta de colores de referencia, Anexo), además de presentar copas uniformes y redondeadas, junto con una distribución espacial en que no forman bosquetes densos, observándose grupos de individuos agrupados en “parches” boscosos o bosquetes (Ministerio del Medio Ambiente, 2012), fácilmente distinguibles en imágenes satelitales como las de Google Earth. El límite arbóreo observado para efectos de esta metodología se definió como la última presencia observada de la especie en el rango altitudinal establecido para cada transecta.

### 3.3.2-Validación del método de muestreo

Este método de muestreo fue validado en terreno, en el S.N. Yerba Loca, en agosto de 2019. A través de Google Earth, se definieron 35 puntos asociados cada uno de ellos a una planta que se estableció correspondería a *Kageneckia angustifolia*. Posteriormente, en terreno, para cada uno de estos puntos previamente georreferenciados, se comprobó que efectivamente correspondiera o no a la especie objetivo. En cuanto a los valores de altitud del límite arbóreo observados en Google Earth, estos fueron validados y corregidos a partir de un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) obtenido desde la plataforma Google Earth Engine (Jarvis y col., 2008; Gorelick y col., 2017), estableciendo como valores definitivos del límite arbóreo los asociados al modelo de elevación digital.

La precisión del método de muestreo se establece por medio de una matriz de confusión, la cual permite estimar la probabilidad de detectar a *K. angustifolia*, dado que efectivamente es *K. angustifolia*. Esto queda expresado de la siguiente forma:

$$\text{Precisión} = \frac{\text{K. angustifolia comprobados en terreno}}{\text{Total clasificados como K. angustifolia}}$$

### 3.4.-Estimación de las curvas de distribución de *Kageneckia angustifolia* en el gradiente altitudinal

A partir de los datos de presencias y ausencias obtenidos en Google Earth Pro, se generaron modelos Huissman-Olff-Fresco (HOF) para cada transecta; estos modelos estadísticos utilizan la regresión logística para inferir la curva de distribución más probable de la especie, evaluando la probabilidad de presencia de la especie en un gradiente ambiental (Huisman y col., 1993). Las curvas HOF se construyeron utilizando el software RStudio, a través del paquete “eHOF” (Jansen y col., 2013). Con estos modelos, se estimó la probabilidad de ocurrencia o presencia de la especie en el

gradiente altitudinal de cada transecta. Los datos de presencias y ausencias se usaron como variable respuesta, y el gradiente altitudinal corresponde a la variable explicativa. Por cada uno de los modelos HOF, se obtuvieron los siguientes parámetros (1) Óptimo, el cual hace referencia al punto máximo de cada curva, es decir, altitud en donde se encuentra el valor máximo de probabilidad de presencia de la especie; (2) Puntos de inflexión, que corresponden a los valores en el cual la curva cambia de forma cóncava a una convexa, o viceversa; (3) Borde central, que representa el rango de valores de Altitud en donde la probabilidad de presencia ha alcanzado el 60% de su valor máximo; (4) Borde externo, que representa la altitud donde la probabilidad de presencia alcanza el 14% de su valor máximo (Heegaard, 2002). Considerando que el Borde central y el Borde externo, representan medidas de distancia en ambas direcciones respecto al óptimo (Heegaard, 2002), se optó por utilizar principalmente el valor del borde externo (“Outer Border”) para evaluar el borde predicho de la especie, ya que este es considerado como el límite del borde de distribución según Heegaard (2002), más allá del cual no se observarán presencias de la especie. El límite arbóreo predicho (LAP) por cada modelo HOF, se obtuvo a partir del parámetro “Outer Border”, definido previamente.

### **3.5.-Temperatura y límite arbóreo**

La temperatura asociada al límite arbóreo de cada una de las transectas se obtuvo a partir de la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick y col., 2017), una plataforma de procesamiento y análisis en nube que permite procesar imágenes satelitales, derivadas de la observación de la superficie terrestre. El protocolo propuesto por Ermida y col. (2020) fue el utilizado para determinar la temperatura de la superficie terrestre (LST). Este último, es uno de los principales parámetros en el estudio y análisis del balance energético y de masa entre la atmósfera y el suelo, en particular, en la estimación de la evapotranspiración y el estrés hídrico a los que puede verse expuesta

la vegetación (Anderson y col., 1997; Sánchez y col., 2008). La teledetección en el infrarrojo térmico es un método adecuado para obtener la T° para grandes extensiones de la superficie terrestre con diferentes resoluciones espaciales y periodicidades temporales (Galve, 2014). El cálculo de LST se define como:

$$LST = A_i \frac{T_b}{\varepsilon} + B_i \frac{1}{\varepsilon} + C_i$$

Donde “T<sub>b</sub>”, corresponde a la temperatura asociada al brillo de TOA (límite de la atmósfera, “Top Of Atmosphere” en inglés) en el canal TIR (canal asociado al sensor remoto térmico asociado al espectro infrarrojo), “ε” corresponde a la emisividad de la superficie (el suelo) para el mismo canal. Los coeficientes A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub> y C<sub>i</sub> se determinan a partir de regresiones lineales de las simulaciones de transferencia radiativa realizadas para 10 clases de TCWV (en español, Total de Vapor de Agua en la Columna de Aire) (I = 1, . . . , 10), de 0 a 6 cm en pasos de 0,6 cm, asignándose a la última clase valores de TCWV superiores a 6 cm (Ermida y col., 2020). El procedimiento para la obtención de LST, está ilustrado en la Figura 3, Anexo, mientras que la visualización de las T° en el área de estudio, están ilustradas en la Figura 4, Anexo.

Se utilizó GEE para la obtención de la temperatura, principalmente porque el tamaño de la grilla o píxel desde el cual se obtiene este dato es lo suficientemente preciso, con cada grilla de 30x30 metros, en comparación al tamaño de grillas de variables climáticas otorgadas por plataformas como WORDCLIM o similares, donde las grillas de menor tamaño son de aproximadamente 900x900 metros, ~1 km<sup>2</sup> (Fick & Hijmans, 2017). Esto es especialmente importante cuando se trata de evaluar la variabilidad de una variable climática como la temperatura en un gradiente altitudinal, asociado a un límite

biogeográfico como el límite arbóreo, que varía entre pendientes de exposición de forma más reducida, acotada e incluso abrupta, y, por ende, estas diferencias son más susceptibles de capturar a partir de grillas climáticas más pequeñas. Las imágenes satelitales utilizadas para obtener la LST provienen del sensor Landsat 8, con tiempos de revisita cada 16 días (Simonetti y col., 2015)

Se utilizó la temperatura media de la estación de crecimiento (obtenido desde LST) debido a que es uno de los principales parámetros bioclimáticos utilizados asociados al estudio del límite arbóreo (Körner, 2012). El período temporal utilizado fue entre los meses de noviembre del año 2016 a junio del año 2017, período correspondiente a la temporada de crecimiento de *Kageneckia angustifolia*. Por otro lado, para calcular el índice de continentalidad simple ( $T^{\circ}$  media mes más cálido –  $T^{\circ}$  media mes más frío) (Luebert & Pliscoff, 2019), se utilizaron las  $T^{\circ}$  correspondientes al mes de enero y julio de 2015, más cálido y frío del año respectivamente. ya que para el intervalo antes mencionado de 2016 y 2017, tales meses tenían información térmica incompleta en las imágenes satelitales utilizadas. El mapa de las  $T^{\circ}$  media del área de estudio, está adjunta en Anexo (Figura 4).

En cuanto al procesamiento del archivo ráster correspondiente a la  $T^{\circ}$  media, fue realizado en un sistema de información geográfica (ArcMap 10.4). Este procesamiento consistió en 2 etapas: La primera fue a través de un solapamiento de los puntos asociados al límite arbóreo para cada uno de las transectas (archivo shapefile), con la capa ráster correspondiente de  $T^{\circ}$  (Figura 4, Anexo). Después del solapamiento entre el shapefile y la capa ráster, para cada uno de los límites arbóreos del conjunto de transectas, se extrajo el valor de  $T^{\circ}$  asociado utilizando la herramienta “Extract values to point”. Posteriormente, tales datos de  $T^{\circ}$  asociados al límite arbóreo fueron exportados

a una hoja de cálculo del software Excel (versión 2206), para luego ser analizados en el software RStudio, a través de un modelo estadístico.

### **3.6.- Análisis estadístico**

Se utilizó un modelo lineal generalizado (GLM por sus siglas en inglés), para evaluar estadísticamente si existe una relación negativa entre el límite arbóreo observado y la latitud. Se incorporaron al modelo la T° media de la estación de crecimiento, la variable “Región” (Norte, Centro y Sur), el índice de continentalidad(IC) y la interacción entre la variable T° y el índice de continentalidad. Con el objetivo de evaluar posibles quiebres en la relación entre límite arbóreo y latitud, esta última fue anidada en el factor categórico “Región”, dividiendo el rango latitudinal (~555 km) en 3 Regiones (~185 km de extensión c/u): Norte (30°30’-32°07’S), Centro (32°15’-33°52’S) y Sur (34°-35°07’S.) Esta división fue realizada porque existen diferencias topográficas importantes entre el rango de distribución Norte, zona de los valles transversales (con un valle longitudinal en la práctica inexistente) (Börgel, 1975), en comparación a la zona central de su rango de distribución, con un valle central que aparece y se expande consistentemente a partir de la Región Metropolitana, rodeado por el macizo andino y cordillera costera de considerable altura(Börgel, 1975). Por último, para la zona sur de su distribución, el valle central alcanza una mayor extensión, junto a un descenso de las altitudes alcanzadas por la C. de los Andes (Börgel, 1975).

El análisis estadístico se realizó usando el software R Studio (versión 2022.02.3+492 "Prairie Trillium"), por medio del paquete “lme4” (Bates y col., 2015). Las temperaturas para calcular el índice de continentalidad también fueron obtenidas desde Google Earth Engine (GEE; Gorelick y col., 2017). El modelo es el que se describe a continuación:

$$L.A.O = Tmedia(^{\circ}C) + \acute{I}C + Region + Tmedia(^{\circ}C) * \acute{I}C + error.$$

Para este modelo se utilizó la distribución probabilística "Gamma", con la función "inversa" como función de enlace, debido a que los datos de altitud, la variable respuesta, tenían el mejor ajuste en tal distribución.

#### 4.- RESULTADOS

##### 4.1.-Caracterización de la distribución altitudinal de *K. angustifolia* a lo largo de su gradiente de distribución latitudinal.

##### 4.1.1.-Validación del método de muestreo.

Del total de 35 puntos, 34 puntos correspondían a *K. angustifolia*, mientras que el único punto no concordante, correspondía a un individuo de *Maytenus boaria* Mol. (Tabla I). La probabilidad de predecir a través del muestreo que la especie es efectivamente *K. angustifolia* corresponde a 0.971, lo que permite concluir Google Earth es una herramienta robusta para la identificación de la especie. Fotografía del área estudiada, así como los individuos georreferenciados, se describen en Anexo (Figuras 5 y 6, además de la Tabla I).

**Tabla I.** Matriz de confusión para establecer la precisión del método de muestreo.

		Predicción(Google Earth)	
		<i>Kageneckia angustifolia</i>	Especie distinta a <i>K. angustifolia</i>
Observación en terreno	<i>Kageneckia angustifolia</i>	34	0
	Especie distinta a <i>K. angustifolia</i>	1	0

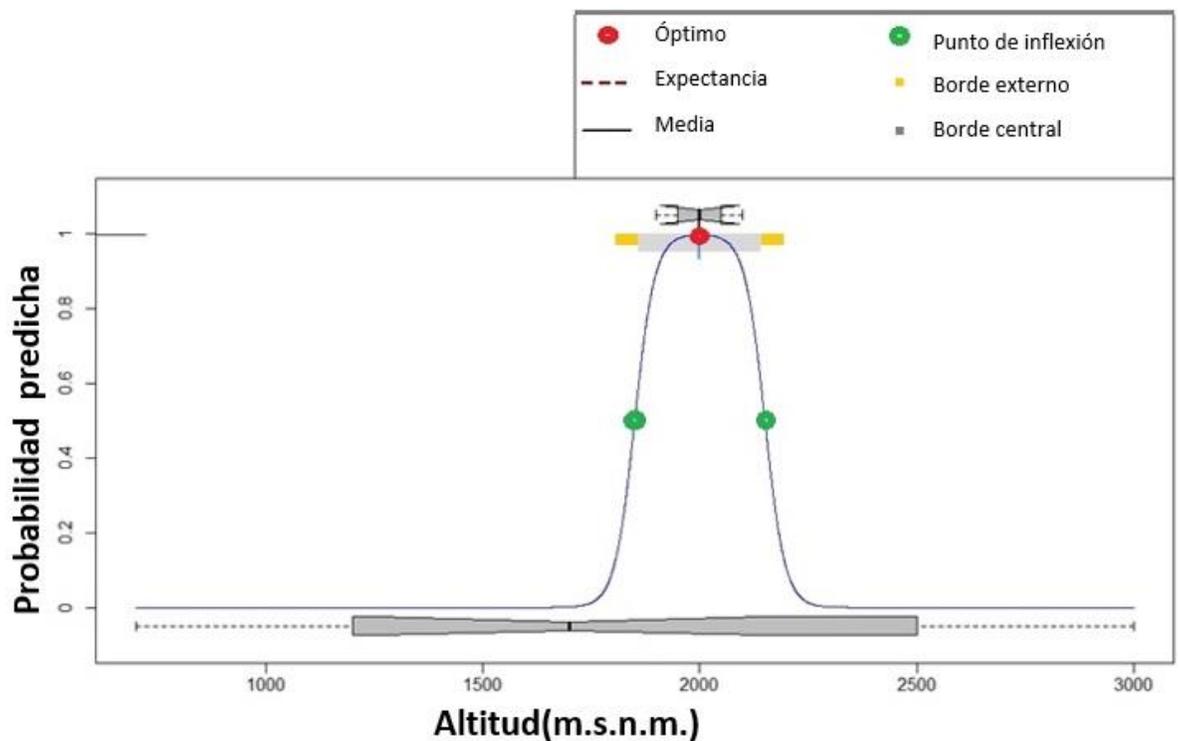
##### 4.1.2.- Resultados del muestreo de la especie a través de transectas.

Del total de 41 transectas realizadas en el área estudiada, sólo en 32 de ellas se observaron presencias u ocurrencias de la especie. En total, se obtuvieron 984 registros de Presencia/ausencia, considerando que son 41 transectas, y 24 puntos por cada una

de ellas. Se registraron 129 presencias en total en las transectas con ocurrencias de la especie.

#### 4.2.- Estimación del límite arbóreo a partir de curvas de respuesta de los modelos HOF.

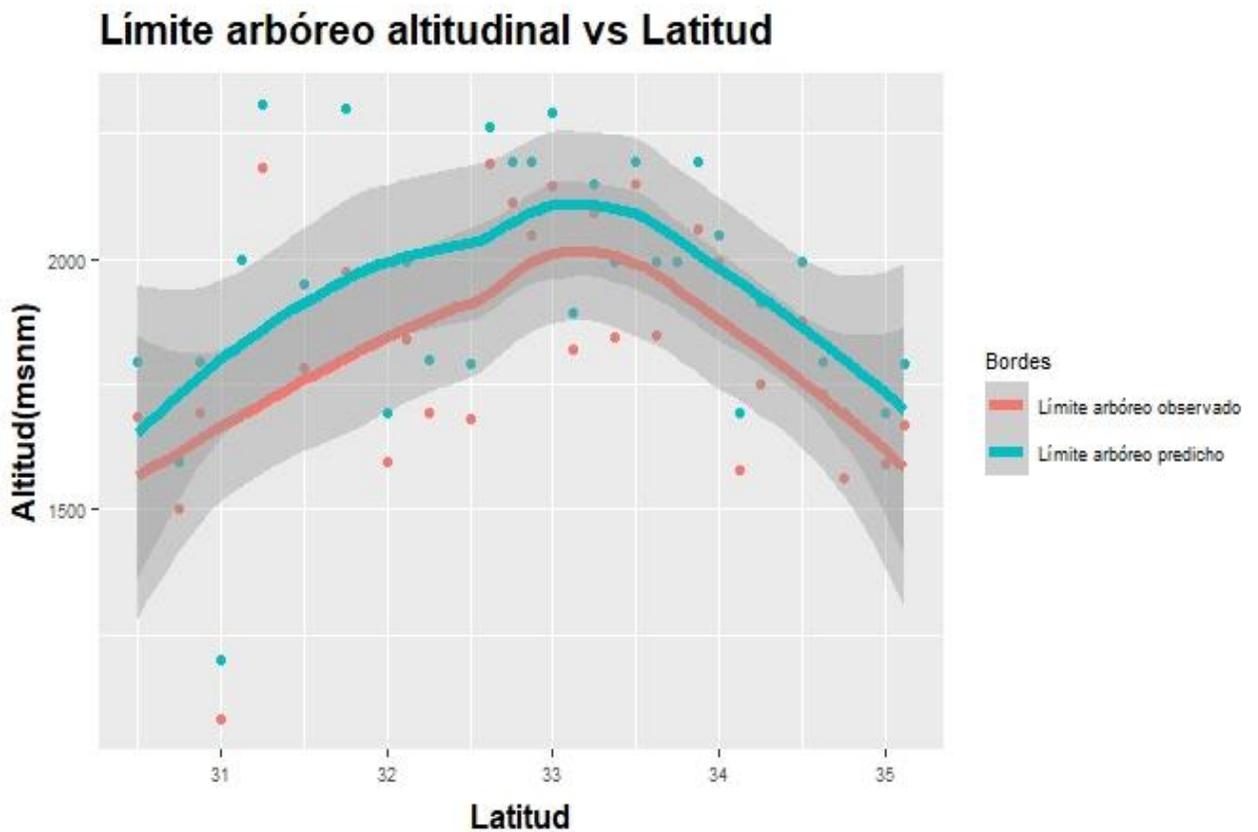
Se obtuvieron un total de 32 modelos HOF, detallados en la Figura 7, Anexo. A modo de ejemplo, en la Figura 6, se ilustra un modelo HOF, con sus parámetros respectivos. En cuanto a los valores del límite arbóreo observado como los del predicho para cada una de las transectas, estos se detallan en la Tabla II, Anexo.



**Figura 6.-** Modelo HOF correspondiente a la transecta 33°30'S, de *K. angustifolia*. Eje X representa la altitud en metros sobre el nivel del mar(m.s.n.m.), mientras que el Eje Y re presenta probabilidad de ocurrencia de la especie, de 0 a 1, según el gradiente de altitud. La barra de color amarillo, tal como indica el cuadro de parámetros en el modelo, corresponde al borde externo. Los círculos de color verde corresponden a los puntos de inflexión.

lexión de la curva, mientras que el círculo rojo que se encuentra en medio de la curva, corresponde al valor óptimo del nicho de la especie.

A partir de estos valores de altitud del límite predicho y observado, se elaboró un gráfico (Figura 7) que permite describir cómo el límite arbóreo de *K. angustifolia* se comporta a lo largo de su gradiente de distribución latitudinal.



**Figura 7.** Variación del límite arbóreo observado y límite arbóreo predicho de *Kageneckia angustifolia* en un gradiente latitudinal.

La relación entre límite arbóreo y latitud presenta una tendencia no lineal; incrementa entre los 31° y los 33° y decrece desde los 33° a los 35°. Se observa además que hay un ajuste lineal importante entre el límite arbóreo observado y el predicho. ( $r^2 = 0.977$ ).

#### 4.3.- Modelo estadístico para evaluar relación entre Límite arbóreo observado y otras variables explicativas.

Respecto al modelo estadístico para evaluar la relación entre límite arbóreo observado en función de la temperatura, índice de continentalidad (IC), la variable “Región” y la interacción entre T° media y el IC, los resultados se incluyen en la Tabla II descrita a continuación:

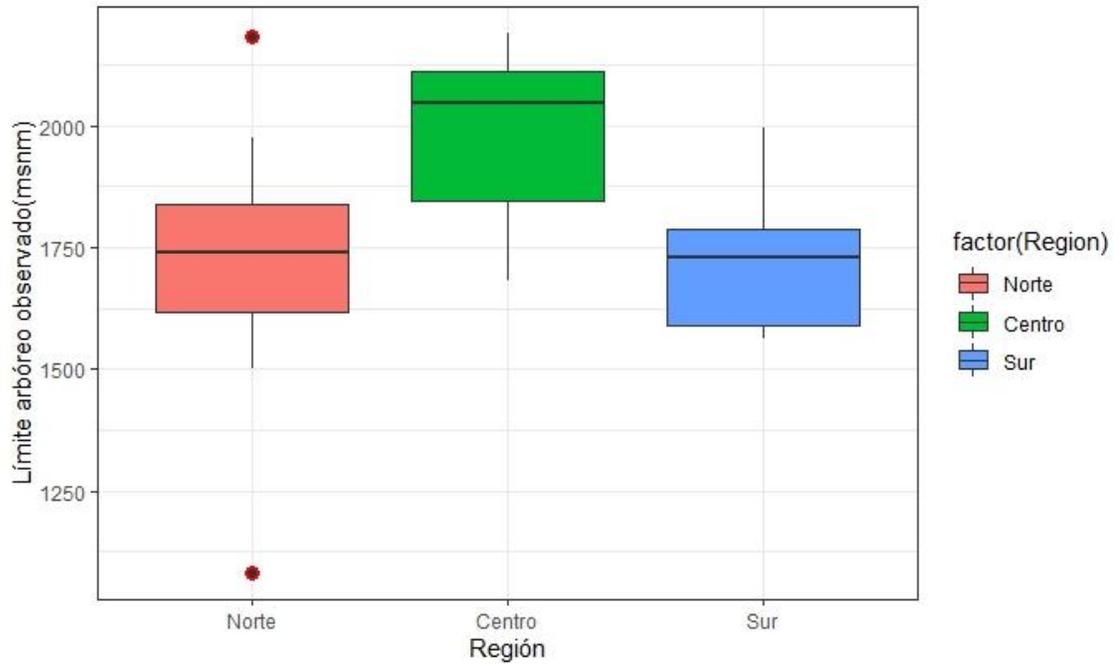
**Tabla II.** Resultados del GLM para Límite arbóreo observado (LAO) en función de la T° media, índice de continentalidad, “Región” y la interacción entre T° media y el í. de continentalidad.

Variab les explicativas	Estimadores	Error estándar	p-valor
Intercepto	1,057 x 10 <sup>-3</sup>	5,160 x 10 <sup>-4</sup>	0.05080
T media(°C)	-1,576 x 10 <sup>-5</sup>	1,742 x 10 <sup>-5</sup>	0.37398
Í. Continentalidad	-2,954 x 10 <sup>-5</sup>	2,143 x 10 <sup>-5</sup>	0.17976
Región Norte	8,878 x 10 <sup>-5</sup>	2,779 x 10 <sup>-5</sup>	0.00365 **
Región Sur	9,017 x 10 <sup>-5</sup>	2,907 x 10 <sup>-5</sup>	0.00459 **
T° media x Í.cont.	8,751 x 10 <sup>-7</sup>	7,194 x 10 <sup>-7</sup>	0.23474

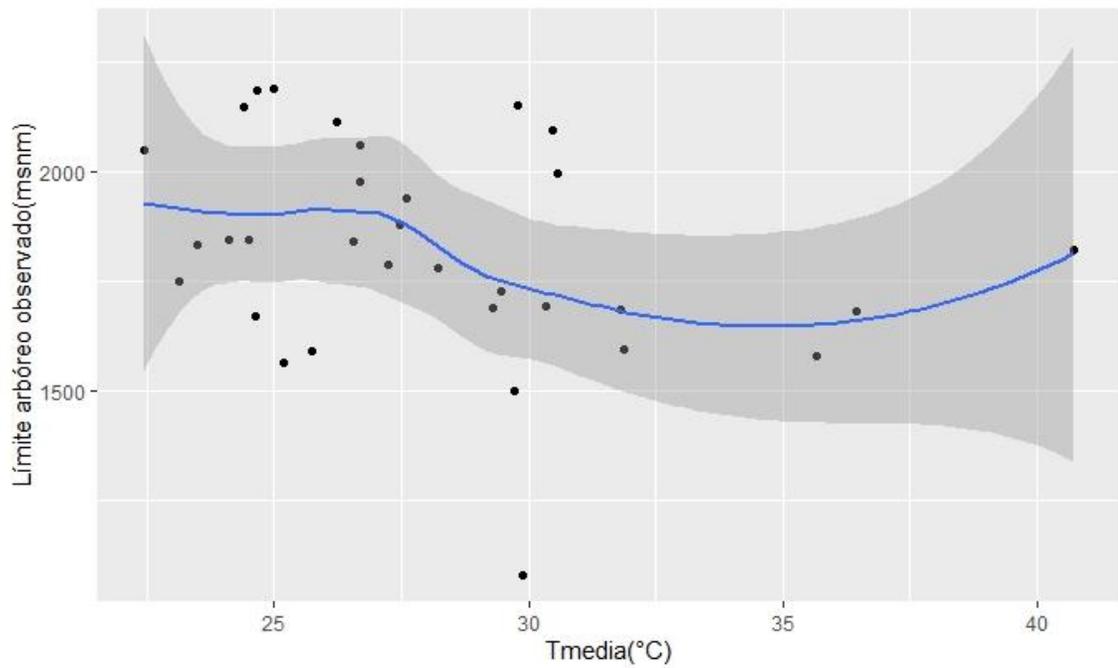
Códigos de significancia: · < 0.1; \* < 0.05; \*\* < 0.01; \*\*\* < 0.001.

Se aprecia un efecto significativo de la latitud (Tabla II); sin embargo, este efecto fue no lineal: incrementa desde los 31° hasta los 33° y luego decrece desde los 33° hasta los 35° (Figura 7 y 8); esta relación se ve sustentada porque hubo diferencias significativas entre la Región Norte y la Región Centro, así como entre la Región Centro y Sur (Tabla II). La variable “Región” aparece separada en los resultados del modelo estadístico, debido a que este último realiza el análisis tomando como referencia a la Región Centro, para realizar la comparación con la Región Norte y Sur. No se detectó un efecto de la T° media de la estación de crecimiento (p > 0.05) (Tabla II y Figura 9) sobre la posición del

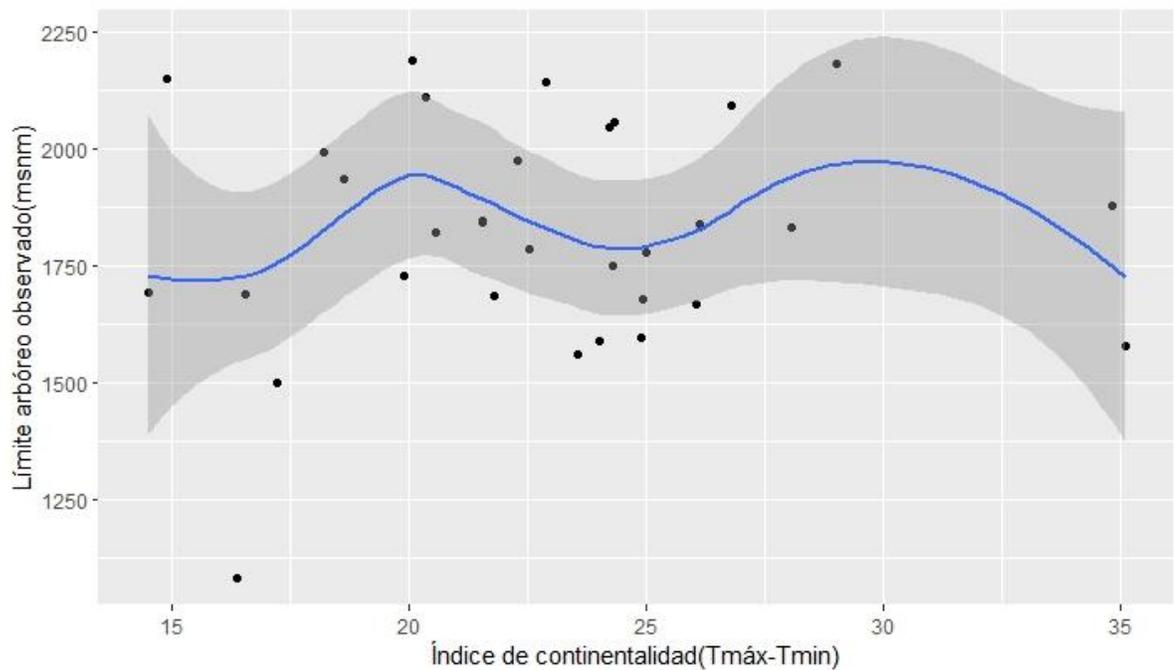
límite arbóreo, así como tampoco del índice de continentalidad sobre dicho límite (Tabla II, Figura 10). Por otro lado, no se observó una relación significativa del límite arbóreo e n función de la interacción de T° media y el índice de continentalidad.



**Figura 8.** Boxplot que grafica el comportamiento del límite arbóreo observado de *K. angustifolia* en las 3 Regiones en que se subdividió el área de distribución latitudinal de la especie.



**Figura 9.** Variación del límite arbóreo observado en función de la T° media de la estación de crecimiento. El área gris representa un 95% en el nivel de confianza respecto a los datos



**Figura 10.** Variación del límite arbóreo observado en función del índice de continentalidad. El área gris representa un 95% en el nivel de confianza respecto a los datos.

## 5.-DISCUSIÓN

El resultado más importante de este estudio es la existencia de una relación no lineal entre el límite arbóreo y la latitud, siendo mayor altitud de éste en la zona central del rango de distribución de la especie; este resultado es levemente diferente a lo esperado, sin embargo, nos abre la posibilidad de analizar las implicancias de este resultado en términos de que no existiría un patrón idéntico para el límite altitudinal de los árboles, con distintos comportamientos según la especie analizada. En ese sentido, se han propuesto varias explicaciones para estas diferencias, que tienen relación con la respuesta fisiológica de la especie según el régimen de T°, precipitaciones, características topográficas, como la estructura y profundidad del suelo, entre otras (Fajardo & Piper, 2014; Piper y col., 2016). En particular, *para K. angustifolia* se ha sugerido que junto a la T°, otro de los factores que pueden estar determinando la altitud del límite arbóreo que alcanza, corresponde a los períodos de sequía estival presentes en su área de distribución (Piper y col., 2016). Se había sugerido que la continentalidad era un factor que podría explicar la complejidad de las respuestas en nuestro país. Sin embargo, la continentalidad no fue un factor significativo. De manera que hay un apoyo parcial al patrón general de la relación entre límite arbóreo y latitud pues este solo decrece desde los 33° latitud Sur.

En la zona de distribución norte de la especie, se observaron altitudes menores del límite arbóreo, en discrepancia con lo descrito en literatura. Por ejemplo, en la transecta ubicada a los 30°52'S, el límite arbóreo observado se localizó a los 1.695 m.s.n.m., respecto a lo descrito por Barichivich y col.(2009) para una latitud similar, 30°59'S, con el límite arbóreo de la especie ubicado a los 2.100 m.s.n.m., alrededor de 400 metros por encima de lo determinado en este trabajo. Esta discrepancia puede atribuirse a un conjunto de motivos, entre ellos, el método de muestreo, factores locales (complejidad

topográfica por los valles transversales). Si esta diferencia entre lo observado y lo descrito en literatura se debe al método de muestreo, se esperaría que esta discrepancia también se hubiese observado en la Región Central y/o Sur de distribución de *K. angustifolia*, lo que no ocurrió. En cuanto a factores locales que pueden provocar una depresión del límite arbóreo respecto a lo descrito en literatura, estos van desde la ladera de exposición, la pendiente de la ladera respectiva, estructura y composición de los suelos, como también zonas en que se produzcan avalanchas o rodados de grandes rocas que se repiten en el tiempo, lo que impide el establecimiento y sobrevivencia de árboles o grupos de árboles (Körner, 1998; Paulsen & Körner, 2004; Körner, 2012). La ausencia de efecto de la continentalidad sobre el límite arbóreo de *K. angustifolia*, puede deberse a la compleja topografía existente en el rango de distribución de la especie. En el norte de la distribución de la especie, la altitud del límite arbóreo es menor aparentemente por el régimen de continentalidad, que correspondería a “Subhiperoceánico” según indica Luebert & Plischoff (2019), con una mayor influencia oceánica en comparación con las Regiones Centro y Sur de distribución de la especie, que están enmarcadas en un área con régimen de continentalidad “Semihiperoceánico” (Luebert & Plischoff, 2019), donde el límite observado es concordante con lo descrito en literatura. Las diferencias en términos cuantitativos entre dichos regímenes, según Rivas-Martínez (2008), son: Ic(índice de continentalidad) entre 8-11 para “Subhiperoceánico”, mientras que para “Semihiperoceánico”, el Ic está entre 11-14.

Ahondando en como la geografía puede influir en la posición que alcance el límite arbóreo, es necesario recalcar la importancia que tiene el efecto de elevación de masa (“massenerhebungseffekt”) en el límite arbóreo. Trabajos recientes (Han y col., 2012; Zhao & col., 2015; Zhang & Yao, 2016) han cuantificado este efecto, y determinado que

tiene un rol preponderante en la altitud que alcanza el límite arbóreo, por cuanto afecta considerablemente la amplitud térmica a la que se ven expuestas múltiples formas de vida en el gradiente altitudinal, desde árboles, hasta coleópteros (Schmidt y col., 2017). Es virtualmente un efecto de calentamiento que provocan los grandes macizos montañosos, de manera tal que se producen diferencias significativas de radiación solar y temperatura tanto fuera como al interior del macizo montañoso (Zhang & Yao, 2016), lo que provoca que la altitud que alcanza el límite arbóreo en el interior del sistema montañoso es significativamente mayor que lo ocurrido en las vertientes exteriores del macizo, fenómeno que ha sido observado tanto en la meseta del Himalaya como en el altiplano andino, con límites arbóreos bordeando los 4800-4900 m.s.n.m. en el interior de tales macizos (Zhang & Yao, 2016), mientras que en las caras externas de los mismos, el límite arbóreo no supera los 3.700-3.800 m.s.n.m. (He y col., 2016). Tal efecto también ha sido cuantificado en sistemas montañosos que alcanzan altitudes similares a los Andes de Chile central, que es donde se ubica el área de estudio de este trabajo. Tal es el caso del sistema montañoso de las Rocallosas (sur de Canadá hasta el suroeste de EE.UU), con las mayores altitudes del sistema entorno a los 3.900-4.400 m.s.n.m., y los límites arbóreos en un rango entre los 2.600 – 3.800 m.s.n.m.(vertientes externas y rango central del macizo respectivamente) (Wang y col., 2017). En ese sentido, en el trabajo de Wang y col.(2017) se estableció una influencia estadísticamente significativa de dicho efecto de elevación de masa sobre la posición alcanzada por el límite arbóreo. La distribución de los límites arbóreos a escala global y local puede ser modelada con alta precisión si este efecto es considerado en la ecuación para su estimación ( Zhang & Yao, 2016). Es interesante y necesario incluir este factor para poder modelar y predecir la posición que alcanza este patrón en el extenso gradiente latitudinal del país, considerando además que son varias las especies arbóreas que marcan este ecotono

en diferentes geografías y condiciones climáticas del país. Por ende, se propone cuantificar este efecto de elevación de masa en futuros trabajos, de modo tal que se incremente la precisión en la estimación del límite arbóreo, tanto para *Kageneckia angustifolia*, como para las otras especies presentes hacia el sur del país que también marcan este ecotono (*A. araucana*, *N. macrocarpa*, *N. pumilio*, *N. antártica*, *N. betuloides*), como también hacia el norte grande de Chile (*Polylepis tarapacana* y *Polylepis rugulosa*) (Luebert & Pliscoff, 2019).

En cuanto al GLM para evaluar al límite arbóreo observado en función de la T° media de la temporada de crecimiento, “Región”, índice de continentalidad y la interacción entre T° e índice de continentalidad, se plantea que aumentando el n-muestral de transectas, se podría capturar más información asociada tanto a altitudes alcanzadas por el límite arbóreo, como también mayor cantidad de datos de T° asociada a tal límite, de tal manera de poder capturar la mayor variabilidad posible de T° y con ello disminuir el error estadístico asociado a tamaños muestrales más pequeños (n=32 en este trabajo). En la literatura se ha demostrado ampliamente como la temperatura es un factor determinante en la altitud que alcanza el límite arbóreo (Körner, 1998; Paulsen & Körner, 2004; Cavieres & Piper, 2004; Körner, 2012). Sin embargo, tal correlación no se vio sustentada según lo arrojado por el GLM ( p=0.374). Respecto a la relación entre el límite arbóreo y el índice de Continentalidad, no se observa una relación estadísticamente significativa (p=0.179). Si bien se ha descrito la influencia que tienen los regímenes de continentalidad sobre la T° y con ello, la altitud que puede alcanzar el límite arbóreo (Körner, 2012), no se ha demostrado fehacientemente que tales regímenes determinen *per se* la altitud que alcanza el éste último (Körner & Paulsen, 2004; Körner, 2012). Por último, respecto a la relación entre el límite arbóreo observado y la variable “Región”, se

observó una relación estadísticamente significativa ( $p < 0.01$ ), con diferencias estadísticamente significativas entre la Regiones Centro-Norte y Centro-Sur, lo que tiene sentido considerando el patrón observado en la Figura 7, donde se puede observar como el límite arbóreo observado tiene un cambio considerable en su posición dependiendo de cuan al norte, centro o sur de su distribución se esté observando. En lo concreto, se generó la variable “Región” con objeto de capturar las diferencias tanto climáticas como orográficas presentes a lo largo del gradiente de distribución latitudinal de la especie. En particular, en la Región Norte de distribución se observa la presencia de cordones montañosos y valles transversales que conectan la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa, en la Región de Coquimbo, con un Valle Central discontinuo, en comparación a lo que ocurre en la Región Central y Sur de distribución de la especie, con una ampliación del Valle Central conforme el incremento latitudinal. Las cuencas hidrográficas asociadas a la Región Norte son la Cuenca del Río Limarí, Choapa y un área acotada de la cuenca del Río Petorca. Respecto a la Región Central, las principales cuencas hidrográficas corresponden a la mayor parte de la cuenca del Río Petorca, la cuenca del Río Aconcagua y Río Maipo, que es el área donde el límite arbóreo observado alcanzó sus mayores altitudes en el rango latitudinal. Por último, para la Región Sur, las cuencas involucradas corresponden a la del Río Rapel y Mataquito.

### **Consideraciones metodológicas**

Sobre el método de obtención de la  $T^{\circ}$  asociada al límite arbóreo a partir de sensores remotos, es de fácil obtención y bajo costo, sin embargo, tiene limitaciones relacionadas con la escala espacio-temporal en que opera, que para este trabajo es una escala biogeográfica, en comparación a estudios donde se evalúa la respuesta ecofisiológica

de los organismos, donde es requerida la medición bajo el nivel del suelo de parámetros como T° u otros (Paulsen & Körner, 2004).

Respecto a la precisión y fiabilidad de las observaciones que se puedan obtener y/o realizar a través de plataformas como Google Earth, se ha descrito previamente en literatura su uso para mapear, caracterizar y analizar límites arbóreos alrededor del planeta (Paulsen & Körner, 2014; Singh y col., 2015; Irl y col., 2016; Chhetri & Thai, 2019). Esta es una primera aproximación que implica un ahorro de tiempo y dinero en comparación con los muestreos clásicos que implicaban excursiones de campo y que sólo podían abarcar un bajo número de transectas. Con el uso de imágenes satelitales más recientes, esta aproximación “desde el espacio” puede alcanzar un mayor nivel de precisión, como por ejemplo, con el uso de sensores como LiDAR (Singh y col., 2015; Chhetri & Thai, 2019), drones u otros productos satelitales que provean información aún más detallada, desde la estructura de la vegetación, dinámicas espacio-temporales de estos ecosistemas, hasta el estado y actividad fotosintética de los árboles, a través de índices como NDVI, EVI, entre otros (Singh y col., 2015; Chhetri & Thai, 2019). De lo anterior, se desprende la pertinencia metodológica del uso de Google Earth en este trabajo. En ese sentido, el resultado observado en la Figura 7 tiene una concordancia importante con lo descrito en literatura, a pesar de la discrepancia del límite observado en la zona norte de distribución respecto a lo descrito en literatura.

Como corolario de la discusión, se plantea que este estudio aporta una aproximación aún poco utilizada en el estudio de la distribución de *K. angustifolia*, debido a que el gran volumen de conocimiento sobre su distribución se ha generado mediante trabajo de campo, con áreas potenciales de su distribución aún poco exploradas, por la dificultad de acceso que viene aparejada por el intrincado y abrupto relieve en que habita la

especie. Por ende, se recomienda integrar tanto el uso de plataformas de acceso abierto como Google Earth, con herramientas como los distintos sensores remotos que existen, de manera de poder caracterizar y analizar a distintas escalas espaciales y temporales la variación de la distribución de esta especie, más aún si se consideran los escenarios de cambio climático que pueden alterar tal distribución en el mediano y largo plazo de una especie que marca el límite arbóreo (Harsch y col., 2009).

## **6.-CONCLUSIÓN**

La distribución del límite arbóreo cambia significativamente con la latitud. Este cambio no es concordante con lo descrito en la literatura, es decir, este valor es máximo en su zona Central de distribución, y sus mínimos ocurren en la Región Norte y Sur de su rango latitudinal. Una explicación posible es la heterogeneidad topográfica que existe en el Norte, en relación con el Centro y Sur de su distribución. Este trabajo contribuye a validar el uso de Google Earth en estudios de biogeografía. Futuros estudios utilizando información bioclimática obtenida desde sensores remotos, pueden contribuir a nuestra comprensión de los factores que determinan el límite altitudinal de las especies.

## 7.- BIBLIOGRAFÍA

- Alatalo, J. M., & Ferrarini, A. (2017). Braking effect of climate and topography on global change-induced upslope forest expansion. *International journal of biometeorology*, 61(3), 541-548.
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., & Mecikalski, J. R. (1997). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote sensing of environment*, 60(2), 195-216.
- Arno, S. F. (1984). *Timberline: mountain and arctic forest frontiers*. Timberline: mountain and arctic forest frontiers.
- Barichivich, J., Sauchyn, D. J., & Lara, A. (2009). Climate signals in high elevation tree-rings from the semiarid Andes of north-central Chile: responses to regional and large-scale variability. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 320-333.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67: 1–48.
- Börgel, R. (1975). *Geomorfología de Chile*.
- Cavieres, L. A., & Piper, F. I. (2004). Determinantes ecofisiológicos del límite altitudinal de los árboles. *Fisiología Ecológica en Plantas: Mecanismos y Respuestas a Estrés en los Ecosistemas*, 221-234.
- Cayuela, L., Benayas, J. M. R., Justel, A., & Salas-Rey, J. (2006). Modelling tree diversity in a highly fragmented tropical montane landscape. *Global Ecology and Biogeography*, 15(6), 602-613.
- Córdova, B (2001) Aplicación del concepto de salud ecosistémica al estudio de las comunidades arbóreas en el valle de Yerba Loca (Lo Barnechea, R.M.). Memoria Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile.
- Cuevas, J. G. (2000). Tree recruitment at the *Nothofagus pumilio* alpine timberline in Tierra del Fuego, Chile. *Journal of Ecology*, 88(5), 840-855.
- Chhetri, P. K., & Thai, E. (2019). Remote sensing and geographic information systems techniques in studies on treeline ecotone dynamics. *Journal of Forestry Research*, 30(5), 1543-1553.
- Cullen, L. E., Stewart, G. H., Duncan, R. P., & Palmer, J. G. (2001). Disturbance and climate warming influences on New Zealand *Nothofagus* tree-line population dynamics. *Journal of Ecology*, 89(6), 1061-1071.

- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F. M., & Trigo, I. F. (2020). Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. *Remote Sensing*, 12(9), 1471.
- Fajardo, A., & Piper, F. I. (2014). An experimental approach to explain the southern Andes elevational treeline. *American Journal of Botany*, 101(5), 788-795.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.
- Galve Romero, J. M. (2014). Generación y Validación de algoritmos para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre utilizando técnicas de Teledetección en el infrarrojo térmico.
- Germino, M. J., Smith, W. K., & Resor, A. C. (2002). Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecology*, 162(2), 157-168.
- Google Earth Pro v. 7.3.4.8248 (2021).
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Han, F., Yao, Y., Dai, S., Wang, C., Sun, R., Xu, J., & Zhang, B. (2012). Mass elevation effect and its forcing on timberline altitude. *Journal of geographical Sciences*, 22(4), 609-616.
- Harsch, M. A., Hulme, P. E., McGlone, M. S., & Duncan, R. P. (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology letters*, 12(10), 1040-1049
- He, W., Zhang, B., Zhao, F., Zhang, S., Qi, W., Wang, J., & Zhang, W. (2016). The mass elevation effect of the central Andes and its implications for the Southern Hemisphere's highest treeline. *Mountain Research and Development*, 36(2), 213-221.
- Huisman, J., Olff, H., & Fresco, L. F. M. (1993). A hierarchical set of models for species response analysis. *Journal of Vegetation Science*, 4(1), 37-46.
- Irl, S. D., Anthelme, F., Harter, D. E., Jentsch, A., Lotter, E., Steinbauer, M. J., & Beierkuhnlein, C. (2016). Patterns of island treeline elevation—a global perspective. *Ecography*, 39(5), 427-436.
- IPCC: [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to*

the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi: 10.1017/9781009157896.

Jacob, M., Frankl, A., Hurni, H., Lanckriet, S., De Ridder, M., Guyassa, E., ... & Nyssen, J. (2017). Land cover dynamics in the Simien Mountains (Ethiopia), half a century after establishment of the National Park. *Regional Environmental Change*, 17(3), 777-787.

Jansen, F., & Oksanen, J. (2013). How to model species responses along ecological gradients—Huisman–Olf–Fresco models revisited. *Journal of Vegetation Science*, 24(6), 1108-1117.

Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>), 15, 25-54.

Körner, C., & Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of biogeography*, 31(5), 713-732.

Körner, C. (1998). A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115(4), 445-459.

Körner, C. (1999). *Alpine Plant Life. Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer, Berlin, 338 p.

Körner, C. (2012). *Alpine treelines: functional ecology of the global high elevation tree limits*. Springer Science & Business Media.

Lassau, S. A., & Hochuli, D. F. (2007). Associations between wasp communities and forest structure: Do strong local patterns hold across landscapes? *Austral Ecology*, 32(6), 656-662.

Luebert, F., & Pliscoff, P. (2019). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile(3 edición)*. Editorial Universitaria.

Luoto, M., Virkkala, R., Heikkinen, R. K., & Rainio, K. (2004). Predicting bird species richness using remote sensing in boreal agricultural-forest mosaics. *Ecological Applications*, 14(6), 1946-1962.

Ministerio del Medioambiente (2012). Ficha de antecedentes por Especie ID:928. [http://especies.mma.gob.cl/CNMWeb/Web/WebCiudadana/ficha\\_indepen.aspx?EspecieId=928&Version=1](http://especies.mma.gob.cl/CNMWeb/Web/WebCiudadana/ficha_indepen.aspx?EspecieId=928&Version=1). (Accessed on 09 February 2021)

Mishra, N. B., & Mainali, K. P. (2017). Greening and browning of the Himalaya: Spatial patterns and the role of climatic change and human drivers. *Science of The Total Environment*, 587, 326-339.

- Muñoz-Schick, M. É. L. I. C. A., Moreira-Muñoz, A., & Villagrán, C. (2000). Caracterización florística y pisos de vegetación en los Andes de Santiago, Chile Central. *Boletín del museo nacional de historia natural*, 49, 9-50.
- Paulsen, J., & Körner, C. (2014). A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. *Alpine Botany*, 124(1), 1-12.
- Piper, F. I., Viñegla, B., Linares, J. C., Camarero, J. J., Cavieres, L. A., & Fajardo, A. (2016). Mediterranean and temperate treelines are controlled by different environmental drivers. *Journal of Ecology*, 104(3), 691-702.
- Pisano Valdés, E. (1977). Fitogeografía de Fuego-Patagonia chilena. I.-Comunidades vegetales entre las latitudes 52 y 56° S. In *Anales del Instituto de la Patagonia*.
- Rivas-Martínez, S. (2008). *Global Bioclimatics*. Phytosociological Research Center, Madrid, Spain.
- Rodríguez Ríos, R., Matthei, S., & Quezada, M. (1983). *Flora arbórea de Chile*.
- Sánchez, J. M., Kustas, W. P., Caselles, V. I. C. E. N. T. E., & Anderson, M. C. (2008). Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote sensing of Environment*, 112(3), 1130-1143.
- Schmidt, J., Böhner, J., Brandl, R., & Opgenoorth, L. (2017). Mass elevation and lee effects markedly lift the elevational distribution of ground beetles in the Himalaya-Tibet orogen. *PloS one*, 12(3), e0172939.
- Simonetti, D., Simonetti, E., Szantoi, Z., Lupi, A., & Eva, H. D. (2015). First results from the phenology-based synthesis classifier using Landsat 8 imagery. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 12(7), 1496-1500.
- Singh, C. P., Mohapatra, J., & Dharaiya, N. (2015). Remote sensing of alpine treeline dynamics. *Indian Soc Geomat Newsl*, 21(4), 3-8.
- Supan, A. (1884) *Grundzüge der physischen Erdkunde*, Leipzig, 492 pp.
- Troll, C. (1973). The upper timberlines in different climatic zones. *Arctic and Alpine Research*, 5(sup3), A3-A18.
- Vogiatzakis, I.N., Mannion, A.M. and Griffiths, G.H. 2006: Mediterranean ecosystems: problems and tools for conservation. *Progress in Physical Geography* 30, 175–200.
- Von Humboldt, A., & Bonpland, A. (2010). *Essay on the Geography of Plants*. University of Chicago Press.

Wang, J., Zhang, B., He, W., Yao, Y., Zhang, W., & Zhao, C. (2017). A quantitative study on the mass elevation effect of the Rocky Mountains and its significance for treeline distribution. *Physical Geography*, 38(3), 231-247.

Weiss, D. J., & Walsh, S. J. (2009). Remote sensing of mountain environments. *Geography Compass*, 3(1), 1-21.

Yang-jian, Z., Li-min, D., & Jie, P. (2001). The trend of tree line on the northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 12(2), 97-100.

Zhang, J., & Gruenwald, L. (2008, November). Embedding and extending GIS for exploratory analysis of large-scale species distribution data. In *Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems* (pp. 1-10).

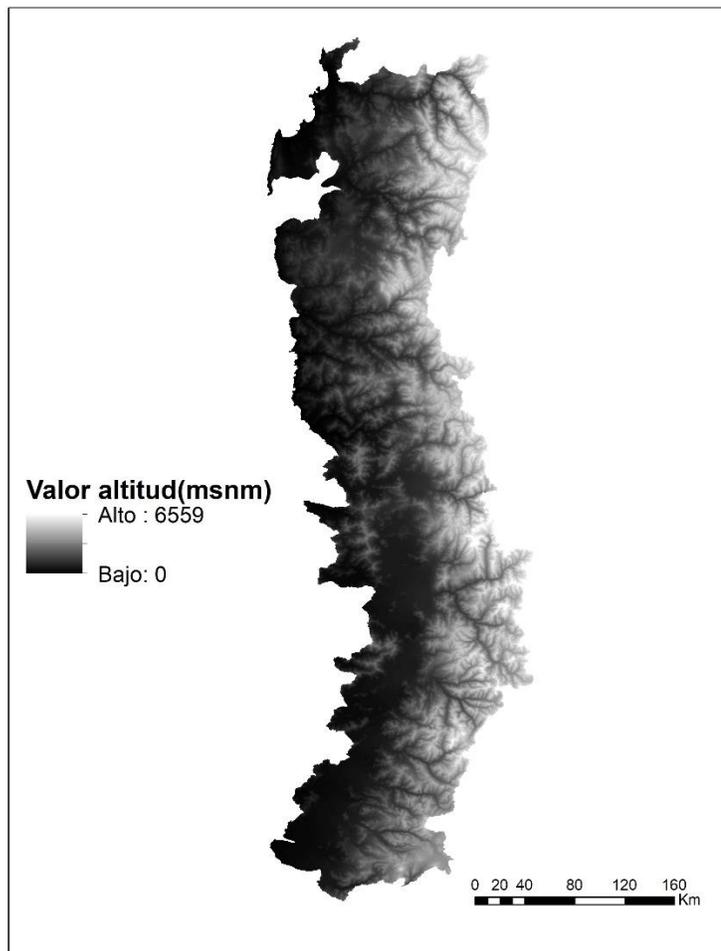
Zhang, B., & Yao, Y. (2016). Implications of mass elevation effect for the altitudinal patterns of global ecology. *Journal of Geographical Sciences*, 26(7), 871-877.

Zhao, F., Zhang, B. P., Zhang, S., Qi, W. W., He, W. H., Wang, J., & Yao, Y. H. (2015). Contribution of mass elevation effect to the altitudinal distribution of global treelines. *Journal of Mountain Science*, 12(2), 289-297.

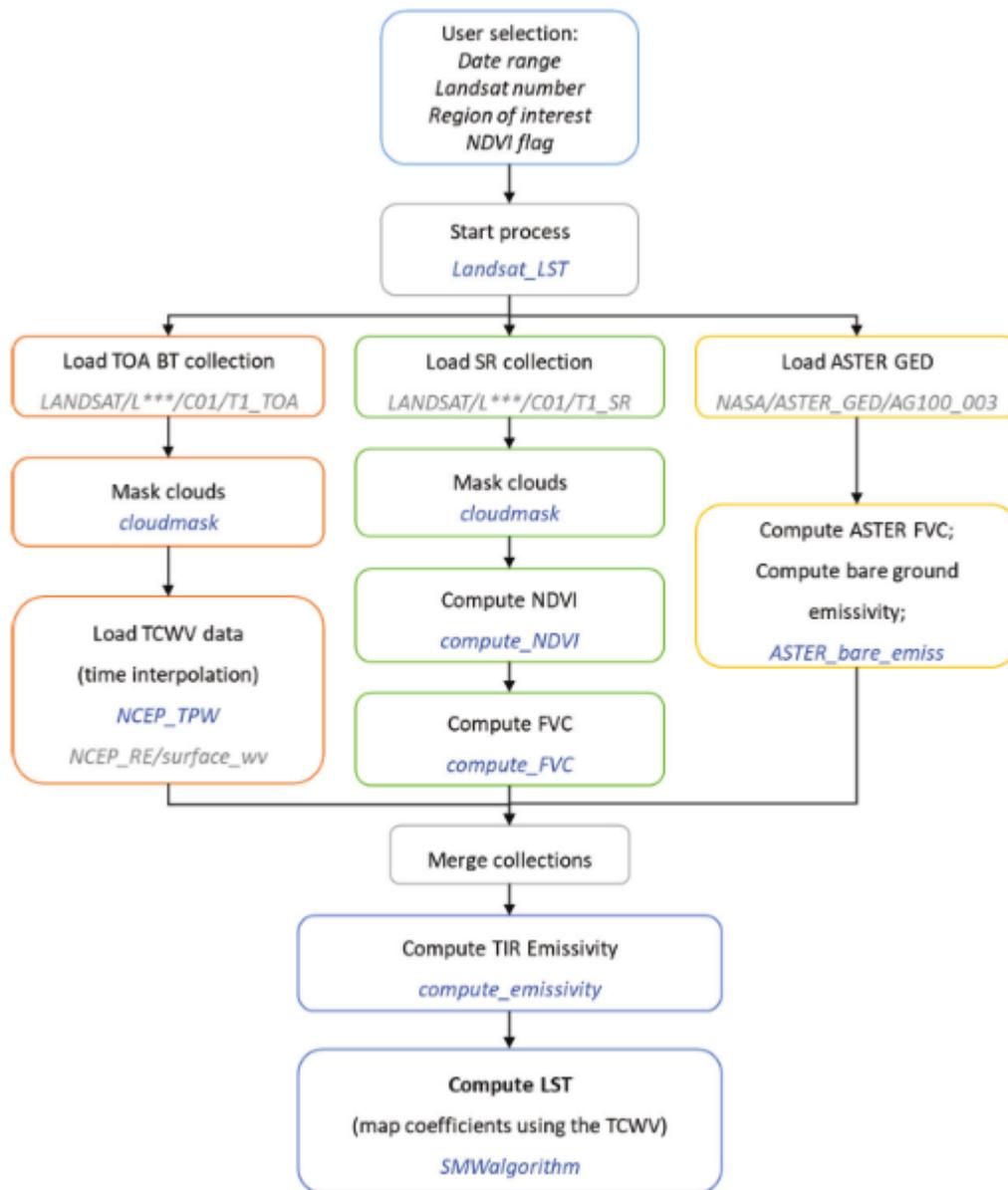
## ANEXO



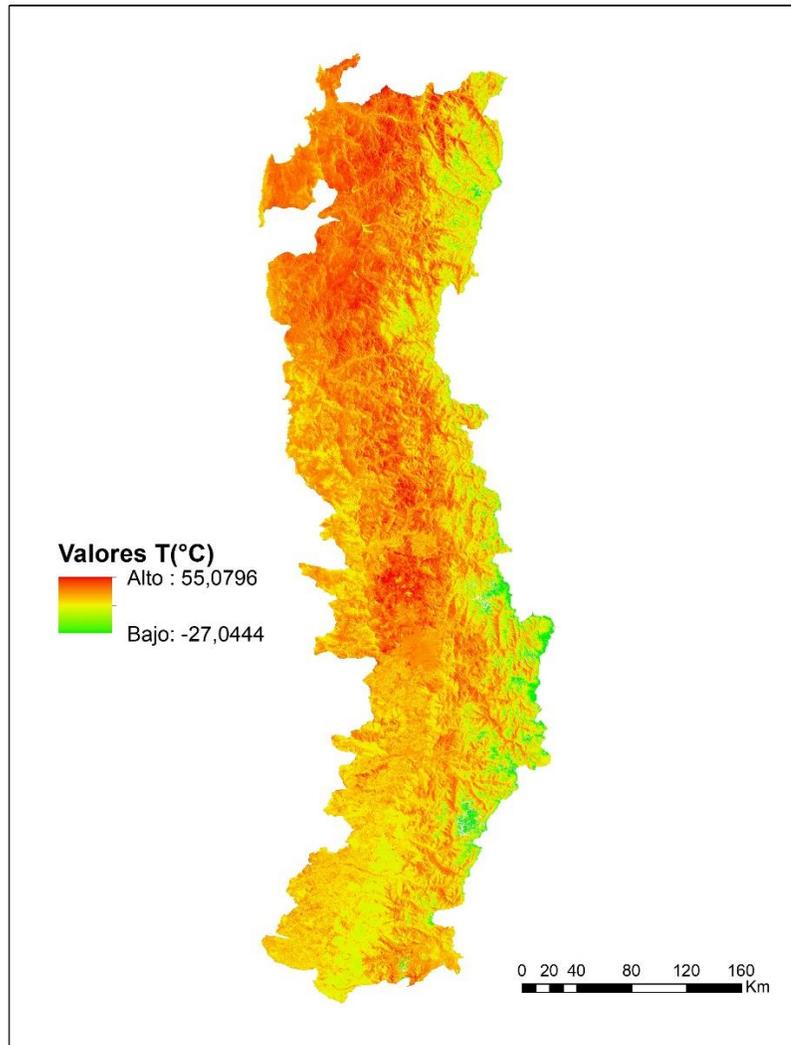
**Figura 1.** Paleta de colores de referencia, asociados al color “verde ceniciento”, mediante los cuales se identificó y diferenció la copa de *Kageneckia angustifolia* de otras especies en el gradiente latitudinal y altitudinal de distribución. Cada uno de estos en la escala RGB (composición del color en base a los colores primarios Rojo, Verde y Azul) corresponde de izquierda a derecha a: (102, 194, 164), (65,171, 93) y (35, 139, 69) .



**Figura 2.** Modelo de elevación digital del área de estudio. Valores de altitud están descritos en leyenda de la imagen. Obtenido de GEE (Jarvis y col., 2008; Gorelick y col., 2017).



**Figura 3.** Método de procesamiento del conjunto de imágenes Landsat-8 para calcular la Temperatura a nivel del suelo(LST). El texto en azul indica funciones codificadas en módulos. El texto gris indica bases de datos obtenidas en GEE para obtener esta información térmica. Modificado de Ermida y col.(2020).



**Figura 4.** T° media estación de crecimiento (Noviembre2016-Junio2017) para toda el área de estudio, obtenida del parámetro LST (Temperatura a nivel del suelo). Cada píxel es de 30 x 30 metros. Las T° están graficadas respecto al rango de colores Rojo-Verde, Los valores máximo y mínimo se indican en la leyenda de la figura. Obtenido de GEE (Gorelick y col., 2017; Ermida y col., 2020).



**Figura 5.** Área de validación del método de muestreo. Cada uno de los puntos de validación (FV = Frangel Validation) corresponde a las figuras de color azul, numeradas desde 1 al 35. El Norte geográfico se ubica en la esquina superior izquierda de la imagen, mientras que la escala gráfica se ubica en la esquina inferior derecha. S.N. Yerba Loca. Fotografía obtenida de Google Earth Pro.







FV22



FV23



FV24



FV25



FV26



FV27



FV28



FV29



FV30



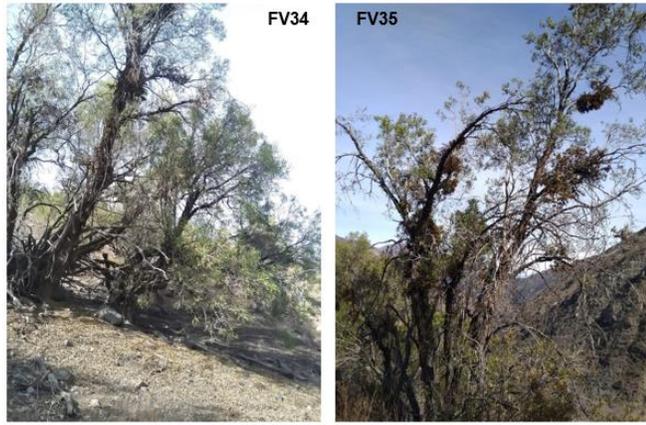
FV31



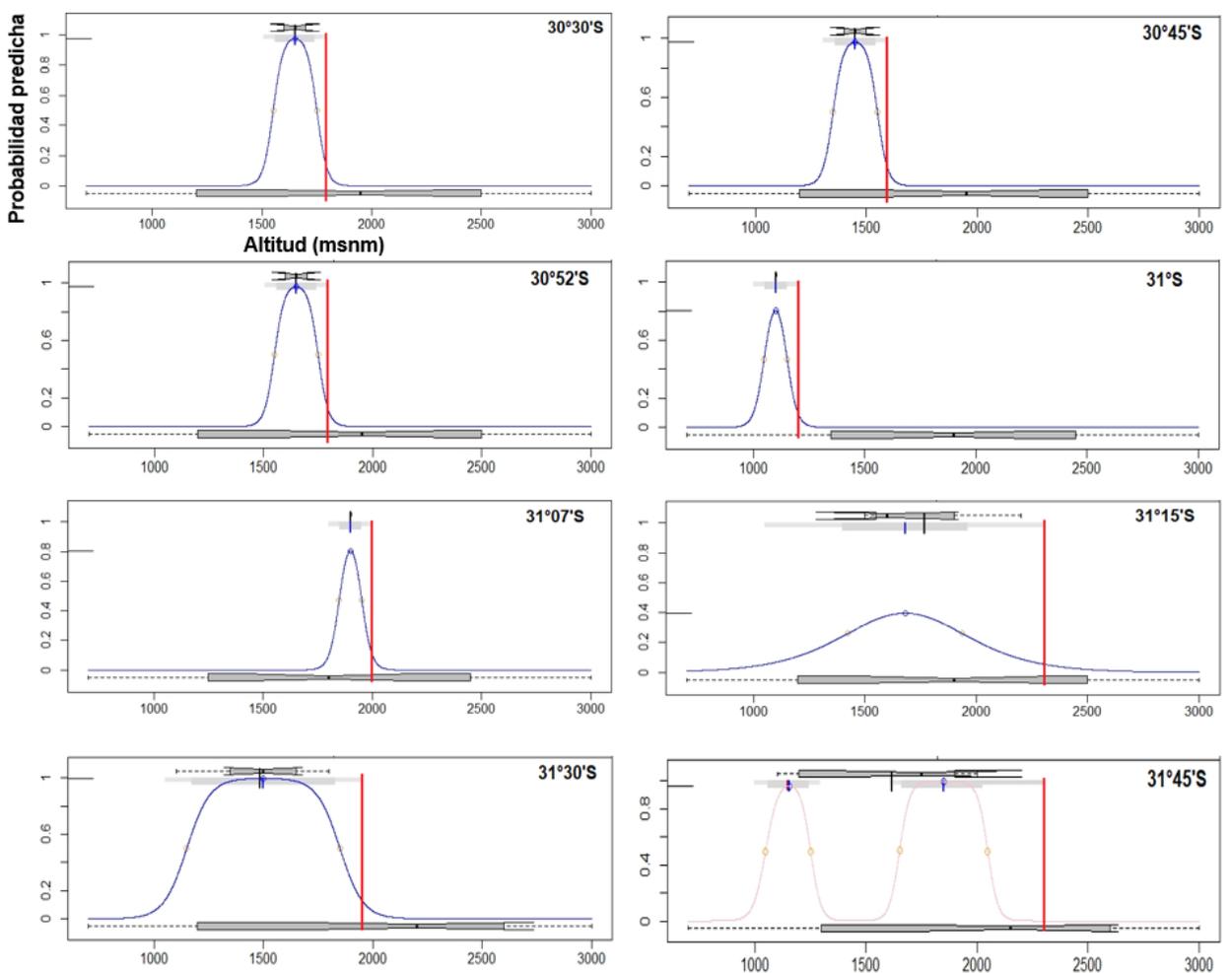
FV32

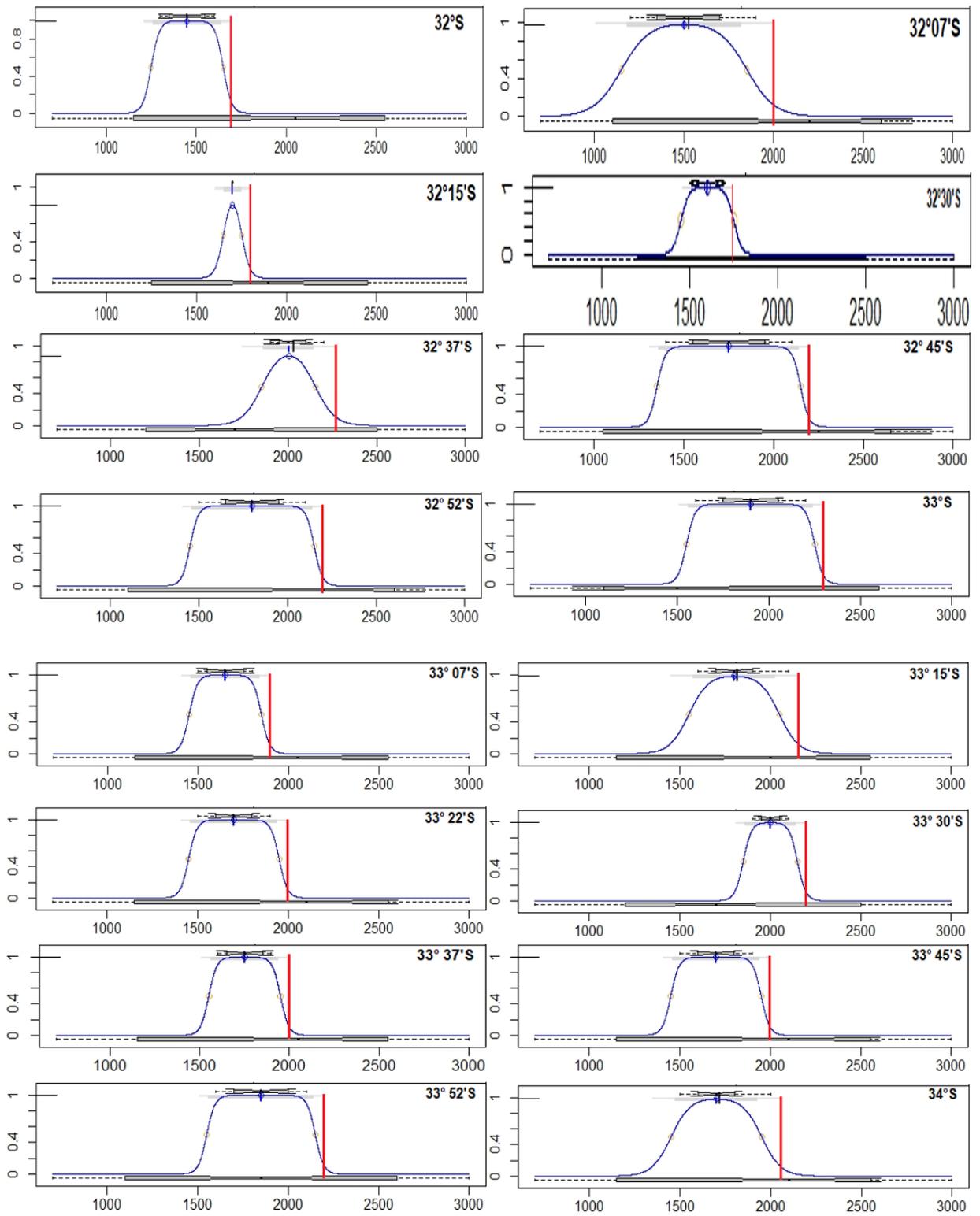


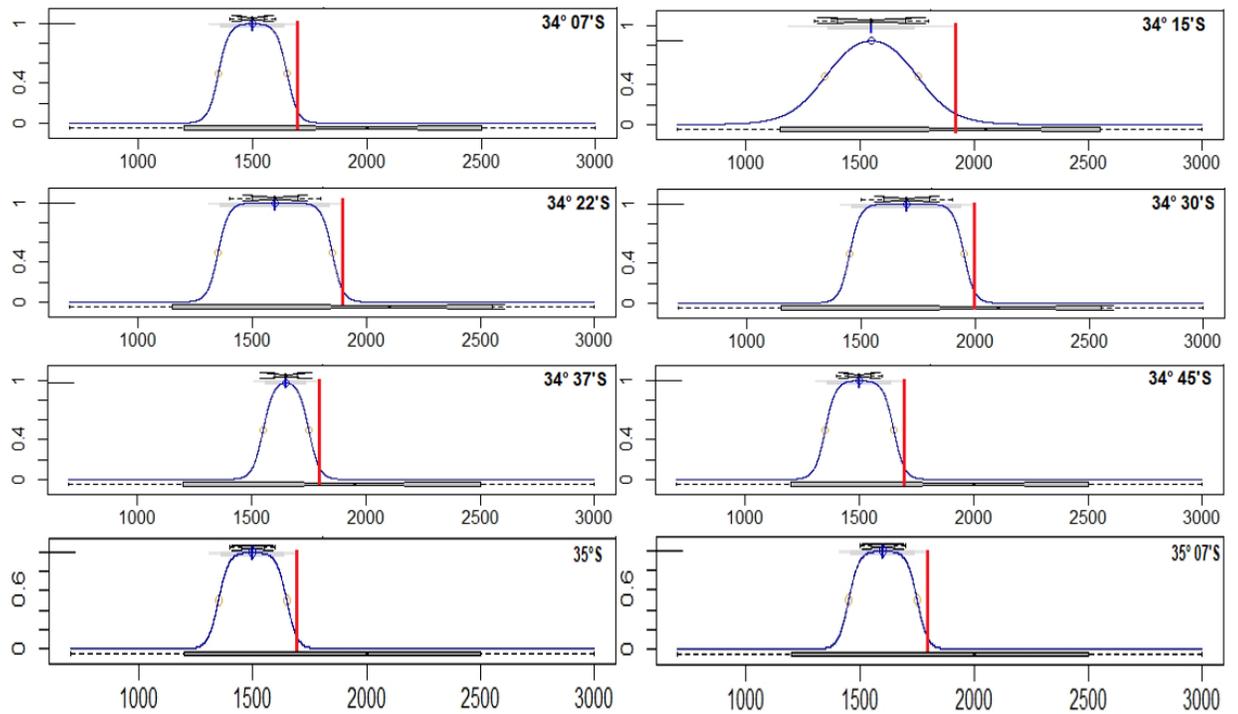
FV33



**Figura 6.** Individuos con que se validó el método de muestreo. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, FV1 a FV35. Fotografías de elaboración propia. S.N. Yerba Loca.







**Figura 7**, Conjunto de 32 modelos HOF a partir de los cuales se calculó el límite arbóreo predicho para cada una de las transectas con ocurrencias de *K. angustifolia*. El eje Y corresponde a la probabilidad predicha de encontrar la especie dado un valor de altitud (Eje X). La barra vertical de color rojo en cada uno de ellos, indica el borde superior externo del nicho de la especie, es decir, el límite arbóreo predicho.

**Tabla I.** Individuos con los que se validó el método de estudio. Se describe la ID del punto, la especie correspondiente, y el valor de georreferencia.

ID punto	Latitud	Longitud	ID especie
FV1	33°19'56.02"S	70°19'37.06"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV2	33°19'56.50"S	70°19'36.90"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV3	33°19'56.06"S	70°19'36.36"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV4	33°19'55.50"S	70°19'36.47"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV5	33°19'54.59"S	70°19'35.97"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV6	33°19'54.65"S	70°19'35.57"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV7	33°19'55.11"S	70°19'34.82"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV8	33°19'54.17"S	70°19'34.74"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV9	33°19'53.97"S	70°19'34.41"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV10	33°19'53.75"S	70°19'35.14"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV11	33°19'53.08"S	70°19'34.10"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV12	33°19'52.34"S	70°19'34.19"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV13	33°19'52.08"S	70°19'34.42"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV14	33°19'51.88"S	70°19'34.10"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV15	33°19'51.64"S	70°19'34.50"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV16	33°19'51.29"S	70°19'34.84"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV17	33°19'51.88"S	70°19'35.44"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV18	33°19'52.69"S	70°19'35.58"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV19	33°19'53.27"S	70°19'37.74"W	<i>Maytenus boaria</i>
FV20	33°19'53.07"S	70°19'38.36"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV21	33°19'52.48"S	70°19'38.91"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV22	33°19'52.18"S	70°19'38.96"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV23	33°19'49.91"S	70°19'39.92"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV24	33°19'49.86"S	70°19'40.47"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV25	33°19'49.28"S	70°19'41.19"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV26	33°19'50.09"S	70°19'41.81"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV27	33°19'50.06"S	70°19'42.48"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV28	33°19'49.39"S	70°19'42.56"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV29	33°19'50.13"S	70°19'42.85"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV30	33°19'48.78"S	70°19'43.35"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV31	33°19'49.07"S	70°19'43.98"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV32	33°19'47.45"S	70°19'44.23"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV33	33°19'47.55"S	70°19'43.69"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV34	33°19'45.36"S	70°19'44.45"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>
FV35	33°19'45.71"S	70°19'44.12"W	<i>Kageneckia angustifolia</i>

**Tabla II.** Conjunto de transectas en que se observaron presencias de *K. angustifolia*. Se indica la identidad de cada una de las transectas, los límites arbóreos observados para cada una de estas, y los límites arbóreos predichos a partir de lo determinado por los modelos HOF.

ID. Transecta	Latitud	Límite arbóreo Observado(msnm)	Límite arbóreo predicho(msnm)
1	30° 30'S	1685	1793.3
2	30° 45'S	1500	1593.3
3	30°52'S	1695	1793.3
4	31°S	1082	1198.1
5	31° 07'S	1832	1998.1
6	31° 15'S	2183	2307.7
7	31° 30'S	1781	1948.1
8	31° 45'S	1976	2300
9	32°S	1596	1692.7
10	32° 07'S	1839	1995.2
11	32° 15'S	1691	1798.1
12	32° 30'S	1681	1792.7
13	32° 37'S	2190	2264.1
14	32° 45'S	2111	2192.7
15	32° 52'S	2047	2192.7
16	33°S	2145	2292.7
17	33° 07'S	1821	1892.7
18	33° 15'S	2093	2149.2
19	33° 22'S	1845	1992.7
20	33° 30'S	2150	2192.3
21	33° 37'S	1846	1992.7
22	33° 45'S	1937	1992.7
23	33° 52'S	2059	2192.7
24	34°S	1995	2049.2
25	34° 07'S	1579	1692.7
26	34° 15'S	1751	1914.8
27	34° 22'S	1787	1892.7
28	34° 30'S	1878	1992.7
29	34° 37'S	1729	1793.3
30	34° 45'S	1563	1692.7
31	35°S	1590	1692.7
32	35° 07'S	1670	1792.7