



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

**"Análisis florístico y reconstrucción climática en base a  
ensambles foliares fósiles de los Estratos de San Pedro,  
Región de Los Ríos, Chile"**

Patrocinante: Dra. Ana M. Abarzúa

Co-patrocinante: Dr. Felipe Hinojosa

Trabajo de titulación presentado como parte  
de los requisitos para optar al Título de  
**Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales**  
**Programa de Vinculación con el Magíster en Paleontología**

**CAROLINA ANGÉLICA SANDOVAL AGUILERA**

VALDIVIA

2018

---

I	Calificación del Comité de Titulación	i
II	Agradecimientos	ii
III	Resumen	iii
1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Marco geológico y climático durante el Cenozoico	1
1.2	Bosques del sur de Sudamérica durante el Cenozoico	3
1.3	Paleoflora mixta y su relación con la vegetación actuales de Chile central	4
2	MATERIAL Y MÉTODO	6
2.1	Área de estudio	6
2.1.1	Caracterización climática	6
2.1.2	Caracterización vegetacional	7
2.1.3	Caracterización geológica	7
2.2	Muestreo y análisis	10
2.2.1	Obtención de material fósil	10
2.2.2	Análisis florístico	10
2.2.3	Análisis de fisionomía foliar	10
3	RESULTADOS PRELIMINARES	14
4	CARTA GANTT CON LA PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	15
5	REFERENCIAS	16

## Calificación del Comité de Titulación

		<b>Nota</b>
<b>Patrocinante:</b>	Dra. Ana M. Abarzúa	7,0
<b>Co-patrocinante:</b>	Dr. L. Felipe Hinojosa	6,0
<b>Informante:</b>	Dra. Giselle Astorga	6,5
<b>Informante:</b>	Dr. Carlos LeQuesne	7,0

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.



---

Dra. Ana M. Abarzúa

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecer al proyecto FIC 30470484-0 PaleoMáfil (Paleontología social) por la oportunidad y la confianza para realizar esta investigación.

Así como a todos los integrantes del Laboratorio de Paleontología de la Universidad Austral que de alguna u otra manera han aportado en mi formación profesional y científica a lo largo de los años, especialmente a Giselle Astorga y Juana Martel, por su paciencia infinita y buena disposición durante todo el tiempo que llevo vinculada a la paleontología.

Un agradecimiento importante a Anita Abarzúa, mi patrocinante, orientadora, guía, mentora, jefa, psicóloga, amiga, etc. quien me presentó la Paleobotánica y la Paleoclimatología, y quien ha guiado mis pasos desde que inicie mi formación. Agradezco también al profesor Mario Pino por abrirme las puertas de la facultad de ciencias y por todas sus enseñanzas que van más allá de lo académico.

A mi familia, a mis profesores, a mis amigos, especialmente a Rodrigo Osorio y Camila Molina, y a la facultad de ciencias forestales y recursos naturales.

## RESUMEN

La actual vegetación del sur de Sudamérica es el resultado de la evolución de los bosques durante el Cenozoico y de su aislamiento geográfico, por lo que conocer su historia durante este periodo de tiempo, permite entender patrones biogeográficos actuales. En la Región de los Ríos, Chile, afloran varios estratos de edades Neógenas portadoras de fósiles botánicos. Uno de estos casos corresponde a los Estratos de San Pedro ubicados al Noroeste de la ciudad de Valdivia, datados entre el Oligoceno y el Mioceno. Estos estratos contienen improntas foliares fósiles que fueron estudiados de manera preliminar evidenciando una flora compuesta en su mayoría por elementos Neotropicales, con presencia reducida de flora antártica durante la transición Oligoceno-Mioceno, lo cual evidenciaría temperaturas y precipitaciones más altas que las actuales. En esta investigación, se realizará un análisis a fondo del material fósil, otorgándoles una identificación morfotípica y una reconstrucción climática basada en su fisionomía, todo esto con el fin de vincular la vegetación con su paleoclima y con otros sitios botánicos contemporáneos, aumentando de esta manera los registros para el Neógeno temprano. Para cumplir estos objetivos, se identificarán morfotipos foliares en base a anatomía comparada con especies actuales con el fin de reconstruir las variables climáticas asociadas al ensamble fósil, se realizarán análisis de fisionomía foliar como el Análisis de margen foliar, CLAMP y un análisis digital.

**Palabras claves:** Reconstrucción climática, Paleoflora mixta, Hojas fósiles, Bosques del sur de Sudamérica, Neógeno.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques del sur de Sudamérica se caracterizan por presentar una variedad de singularidades biogeográficas, como altos niveles de endemismo, disyunciones a distintos niveles taxonómicos, y una mezcla interesante de elementos fitogeográficos de diversas procedencias, lo cual denota un carácter relictual y una larga historia de aislamiento geográfico de los bosques del continente (Villagrán y Hinojosa 1997).

La mayoría de los estudios paleobotánicos en el sur de Sudamérica se han realizado al sur de los 37° S y corresponden a edades Paleógenas (Hinojosa y Villagrán 1997). Esto, principalmente, debido a que existe un registro abundante de la flora de esas edades, así como una mayor disponibilidad de material para realizar reconstrucciones climáticas y vegetacionales (Hinojosa y Villagrán 1997, Moreira 2013). Esta situación no se replica para edades Neógenas, debido a que durante el Mioceno hubo grandes transgresiones marinas en muchas regiones de Sudamérica, que habrían provocado una disminución del espacio disponible para la vegetación, y podría explicar la escasez de evidencias paleobotánicas para el periodo en Chile Centro-sur y Patagonia (Moreira 2013).

En la región de los Ríos (39° S), emergen varias secuencias sedimentarias de edades Neógenas, como los estratos de Pupunahue y San Pedro, y las formaciones Santo Domingo y Cheuquemó (Kuntsmann 2010), y en varios de ellos se tiene registro de fósiles vegetales (Palma-Heldt y Alfaro 1982, Elgueta *et al.* 2000, Palma-Heldt y Duhart 2015). Los Estratos de San Pedro están ubicados en la ribera del río del mismo nombre, y representan una secuencia continental contenedora de fósiles botánicos superficiales, como maderas e improntas foliares, cuya edad correspondería al Oligoceno - Mioceno estimados en base a análisis polínicos realizados en el curso del Río San Pedro (Elgueta *et al.* 2000).

Esta investigación tiene como objetivo evaluar los ensambles foliares fósiles de los Estratos de San Pedro, otorgándoles una identificación morfológica y una reconstrucción climática basada en su fisionomía, con el fin de vincular la vegetación con su paleoclima y con otros sitios botánicos contemporáneos, aumentando de esta manera el registro para el Neógeno temprano.

### 1.1 Marco geológico y climático durante el Cenozoico

El clima durante la Era Cenozoica (66 Ma, millones de años, – presente) ha variado significativamente, existiendo periodos de altas temperaturas, así como glaciaciones de diferentes

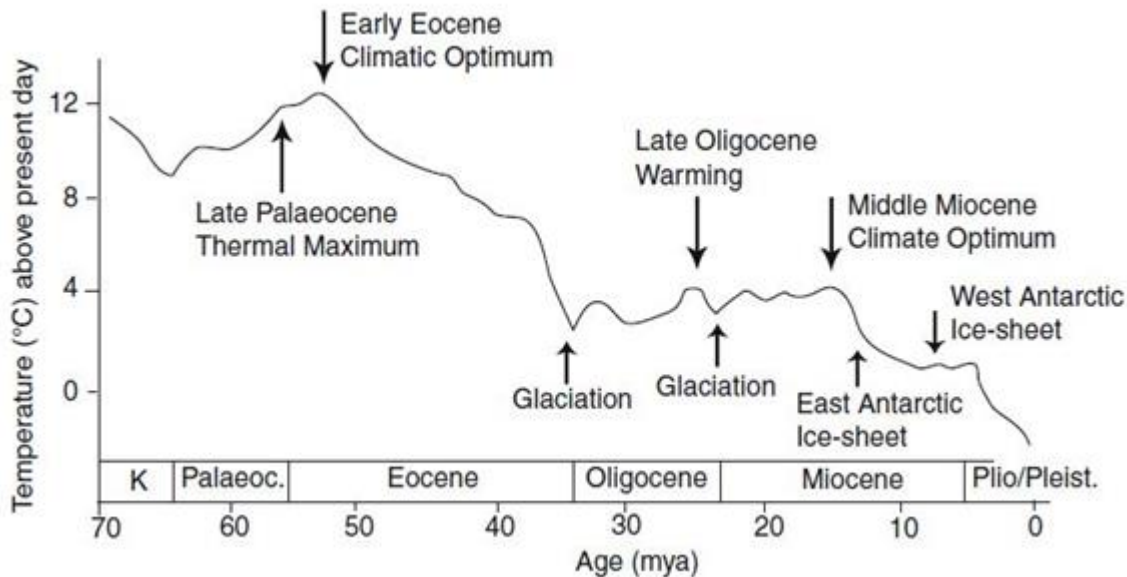
magnitudes (Moreira 2013, Zachos *et al.* 2001). Junto a lo anterior, los cambios en la deriva continental y las consecuencias geológicas para Sudamérica han determinado la evolución y distribución de la vegetación (Villagrán y Hinojosa 2005, Hinojosa *et al.* 2015).

Desde principios del Cenozoico, Sudamérica comenzó a situarse en su posición global actual, configurándose completamente durante el Neógeno (Moreira 2013). Por otro lado, durante el Paleógeno la Antártica estaba libre de hielo (Willis y MacElwain 2002) debido que durante esta época ocurrió uno de los calentamientos más pronunciado de la tierra desde el Paleoceno medio (59 Ma) hasta el Eoceno temprano (52), llamado óptimo climático del Eoceno temprano (Zachos *et al.* 2001), además aun no existía la Corriente Circumpolar Antártica (CCA), ya que en el Océano Pacífico existían corrientes de aguas cálidas que se desplazaban hasta altas latitudes (Willis y MacElwain 2002).

Durante la transición Paleoceno/Eoceno a Eoceno medio (56-37 Ma), Sudamérica, Antártica y Australia continuaban unidos, Sudamérica y Antártica a través de la península Antártica, y Australia y Antártica a través de un brazo de mar somero (Benedetto 2012). La separación del Sur de Gondwana ocurre durante el Eoceno Superior – Oligoceno (37 – 30 Ma aprox.) con la separación de Australia y Antártida, tras lo cual se originó finalmente la Corriente Circumpolar Antártica (CCA), que provocó en su momento la glaciación del sector Este de Antártica y determinó las caídas en las temperaturas oceánicas en latitudes más bajas (Benedetto 2012). Luego de estos acontecimientos, durante el Mioceno inferior el cambio geológico más importante fue la separación de Antártica y Sudamérica (23 Ma), además de la presencia de grandes transgresiones marinas desde Venezuela hasta la Patagonia Austral (Benedetto 2012, Hinojosa y Villagrán 1997). Durante el Mioceno medio a superior (15 -5 Ma) se abre el estrecho de Drake, separando definitivamente Sudamérica de Antártica provocando la expansión del hielo en todo el continente antártico (Benedetto 2012). Se comienza a formar el desierto de Atacama durante el Mioceno medio, generándose condiciones de sequía, disminución de las precipitaciones y aumento del contraste de temperaturas invierno-verano. Estas condiciones configuran finalmente la Diagonal Árida de Sudamérica durante el Plioceno, además, el levantamiento Andino habría alcanzado casi su altura actual (Hinojosa *et al.* 2015).

En relación con el clima, los análisis de isótopos de oxígeno han permitido reconstruir el clima a lo largo del Cenozoico evidenciando la ocurrencia de un episodio cálido durante el Paleoceno medio - Eoceno temprano, marcando un máximo de temperatura denominado óptimo climático del Eoceno temprano (52-50 Ma, Fig. 1) (Zachos *et al.* 2001). A este óptimo climático le siguió un evento frío que habría generado la aparición de glaciaciones en la Antártica al inicio del Oligoceno, que persistieron hasta una fase cálida que redujo la extensión de los hielos Antárticos durante el calentamiento del

Oligoceno Tardío (Zachos *et al.* 2001). Desde este momento (26-27 Ma) hasta el Mioceno Medio (15 Ma) el volumen de hielo global se mantuvo relativamente bajo a excepción de algunos periodos cortos de glaciación severa, como la ocurrida en el límite Oligoceno-Mioceno que tuvo una duración de no más de 1 millón de años (Fig. 1). Tras estos episodios hubo otro máximo de temperaturas cálidas durante el óptimo climático del Mioceno Medio (17-15 Ma) que fue seguido por una disminución gradual de las temperaturas que finalmente estableció el patrón los hielos en la Antártica hasta el plio/pleistoceno (Zachos *et al.* 2001).



**Figura 1.** Fluctuaciones climáticas globales durante el Cenozoico. Basado en el estudio realizado con isótopo de  $O^{18}$  e isótopos de carbono de Zachos *et al.* (2001) y modificado por Moreira (2013).

## 1.2 Bosques del sur de Sudamérica durante el Cenozoico

En relación con los bosques del sur de Sudamérica varios autores (Hinojosa 2005, Hinojosa y Villagrán 1997, Villagrán y Hinojosa 1997, Troncoso y Romero 1998, Romero 1978 1986, Quattrocchio *et al.* 2013) han estudiado los patrones de distribución temporal y espacial de las Paleofloras durante el Cenozoico y todos coinciden en que se pueden distinguir cuatro sucesiones de Paleofloras para el Sur de Chile entre los 38° y 50° S. Estas sucesiones son:

1) Durante el Paleoceno – Eoceno temprano se desarrolló una flora dominada por elementos fitogeográficos Australasianos, Neotropicales y Pantropicales que ha sido denominada ‘Paleoflora Gondwanica’, dominada por familias leñosas de ambientes tropicales-cálidos (Hinojosa 2005, Hinojosa

y Villagrán 1997, Villagrán y Hinojosa 2005, Troncoso y Romero 1998, Quattrocchio *et al.* 2013). Durante esta época se produjo un aumento del grupo de las Angiospermas, las cuales desde entonces se diversificaron y expandieron por todo el globo (McLoughlin 2001). En Chile central-sur esta paleoflora ha sido caracterizada por contener taxa como Annonaceae, Lauraceae, Araucariaceae (*Agathis*), Cycadales, Myrtaceae, entre otras (Villagrán y Hinojosa 2005, Quattrocchio *et al.* 2013).

2) Durante el Eoceno Temprano la paleoflora anterior se habría modificado pasando a contener asociados, además de elementos cálidos dominantes, una baja representación de taxa templados-fríos, lo que sugiere el desarrollo de una “Paleoflora Subtropical Gondwanica” (Hinojosa y Villagrán 1997, Villagrán y Hinojosa 2005). En general, esta paleoflora ha sido caracterizada por contener una mezcla de elementos florísticos subtropicales, así como taxa subantárticos y géneros endémicos. En relación con el género *Nothofagus*, este se habría desarrollado desde el Campaniense (83 Ma) en Antártica (Leppe *et al.* 2012) y en el norte de Patagonia desde el Maastrichtiense (72 Ma) previo a comenzar a extenderse durante el Eoceno hacia Chile central (Prámparo *et al.* 2007).

3) Durante el lapso Eoceno medio – Mioceno inferior se desarrolló una “Paleoflora Mixta” con proporciones equiparadas de elementos cálidos y templados fríos (Romero 1978 1986, Hinojosa y Villagrán 1997, Villagrán y Hinojosa 2005, Troncoso y Romero 1998, Moreira 2013). El suceso más importante de la época fue el desplazamiento de las Paleofloras Antárticas hacia latitudes medias (Romero 1978 1986, Hinojosa y Villagrán 1997). En Patagonia y Magallanes dominaron las Paleofloras Antárticas del tipo templado frío lluvioso, mientras en Chile central persistieron las Paleofloras Mixtas con presencia de *Nothofagus*, el cual se convirtió en componente principal de la vegetación desde el Eoceno medio (Prámparo *et al.* 2007).

4) Durante el lapso Mioceno medio a Plioceno tardío al sur de los 38° S persistieron las Paleofloras Mixtas, mientras que al norte se desarrolló una flora dominada por elementos cálidos y endémicos, que se ha denominado “Paleoflora Subtropical Neógena” precursora de los bosques mediterráneos actuales y del bosque valdiviano (Hinojosa y Villagrán 1997).

### **1.3 Paleoflora mixta y su relación con la vegetación actual de Chile central**

Según Villagrán y Hinojosa (2005) entre las paleofloras descritas para el sur de Sudamérica, la Paleoflora Mixta se destaca por su amplia distribución temporal y espacial. Estas fueron definidas por Romero (1978, 1986) como una formación vegetal compuesta por taxones con diferentes requisitos ecológicos y fuentes fitogeográficas, que estaría formado por elementos Neotropicales (*Myrceugenia* y

*Escallonia*) tanto por elementos Australes-antárticos (*Laurelia* y *Eucryphia*). Acerca de la razón por la cual confluyeron tan diferentes tipos vegetales, Hinojosa y Villagrán (2005) concluyeron que las Paleofloras Mixtas del sur de Sudamérica evolucionaron como respuesta a un régimen climático caracterizado por temperaturas y precipitaciones relativamente cálidas durante todo el año. Esto fue posible gracias a la existencia de un clima subtropical que se extendía hasta los 40° S con humedad traída por los vientos tropicales del Este durante el verano y por los vientos del Oeste durante el invierno.

Las Paleofloras Mixtas sudamericanas aparecieron por primera vez en la Antártica, en el límite Paleoceno/Eoceno (55 Ma) y se extendieron a Sudamérica durante el Eoceno ocupando toda la región al sur de la latitud 30° S (Romero 1993). Durante el Oligoceno se restringieron a las regiones subtropicales de Chile-Argentina, ocupando luego la costa del Pacífico de Chile central durante el Mioceno (Hinojosa y Villagrán 1997, Romero 1978 1986, Troncoso y Romero 1998, Hinojosa y Villagrán 2005). Durante el Mioceno temprano a medio (23-11 Ma) la Paleoflora Mixta presente en Chile central fue reemplazada por una Paleoflora Subtropical Neógena con predominancia de elementos neotropicales y el movimiento hacia el sur de los elementos antárticos (Hinojosa y Gutiérrez 2009, Gutiérrez 2011). Un detalle importante es que esta última sucesión florística (Paleoflora Subtropical del Neógeno) sería el antecesor más temprano para la vegetación esclerófila moderna, característica de las zonas mediterráneas en Chile central (Hinojosa *et al.* 2006).

En base a lo planteado anteriormente, la pregunta que esta investigación busca responder es: ¿Qué tipo de Paleoflora se desarrollaba durante la transición del Oligoceno/Mioceno en la Región de los Ríos, y en qué condiciones climática se desarrollaba?

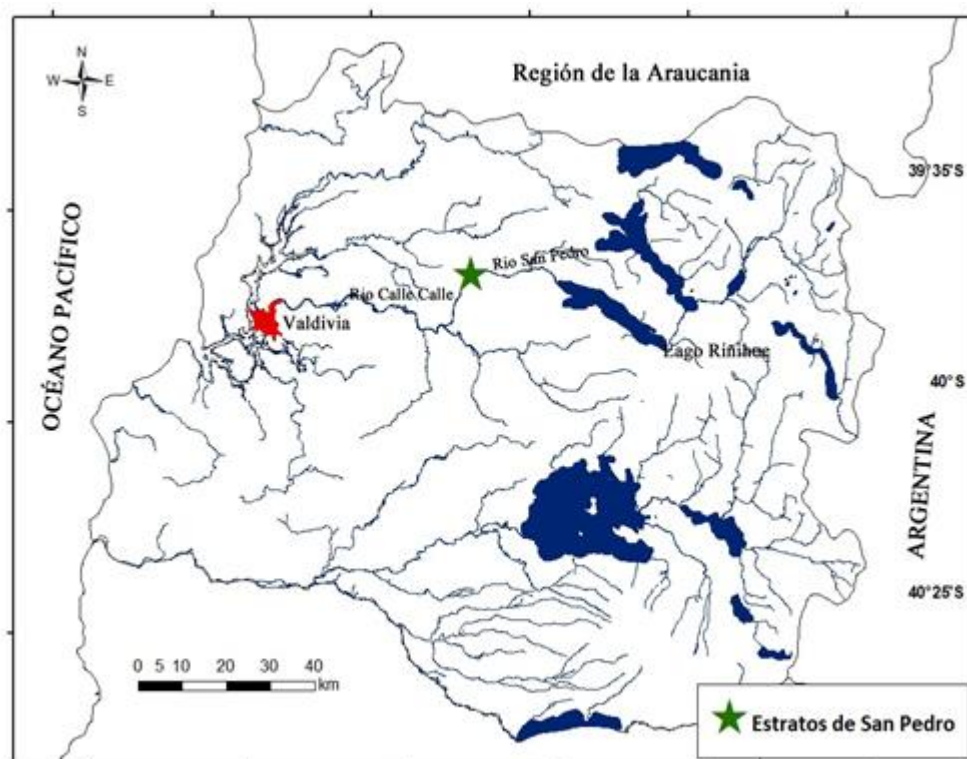
Se propone la hipótesis de que durante la transición del Oligoceno/Mioceno en la Región de los Ríos (39° S) se desarrollaba una vegetación mixta con elementos tanto de origen Antártico como de origen Neotropicales y Pantropicales, asociados a un régimen climático caracterizado por temperaturas más cálidas y mayores precipitaciones que las actuales.

El objetivo general de este estudio consiste en evaluar la tafoflora presentes en los estratos San Pedro, su interpretación climática y su relación biogeográfica con otros sitios paleobotánicos contemporáneos. Los objetivos específicos son 1) Categorizar las improntas foliares fósiles en morfotipos taxonómicos, 2) Determinar parámetros climáticos de temperatura y precipitación asociados a la fisionomía foliar de los ensamblajes fósiles utilizando dos análisis contrastantes, y 3) Estimar el paleoclima con relación a la vegetación encontrada, y con otros sitios paleobotánicos de edades similares en el Sur de Sudamérica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudio

El área de estudio se encuentra cerca del sector 'Malihue', en la comuna de Los Lagos perteneciente a la Región de Los Ríos, al noroeste de la Ciudad de Valdivia. En este lugar afloran los Estratos de San Pedro en donde se ha encontrado fósiles botánicos (Fig. 2 y 3).



**Figura 2:** Mapa de la Región de los Ríos. Se indica la ubicación del afloramiento de los Estratos de San Pedro en el cual se extraerán las muestras.

#### 2.1.1 Caracterización Climática

El área de estudio, correspondiente a la comuna de Los Lagos, presenta actualmente un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, cuyas precipitaciones promedio anuales se encuentran entre los 2.300 y 3.500 mm los que aumentan hacia el sur y en relación con la altura distribuyéndose a través de todo el año, pero predominando durante los meses de invierno (Luebert y Pliscoff 2006, PLADECO Los Lagos 2011). La temperatura presenta un bajo rango de oscilación debido a la

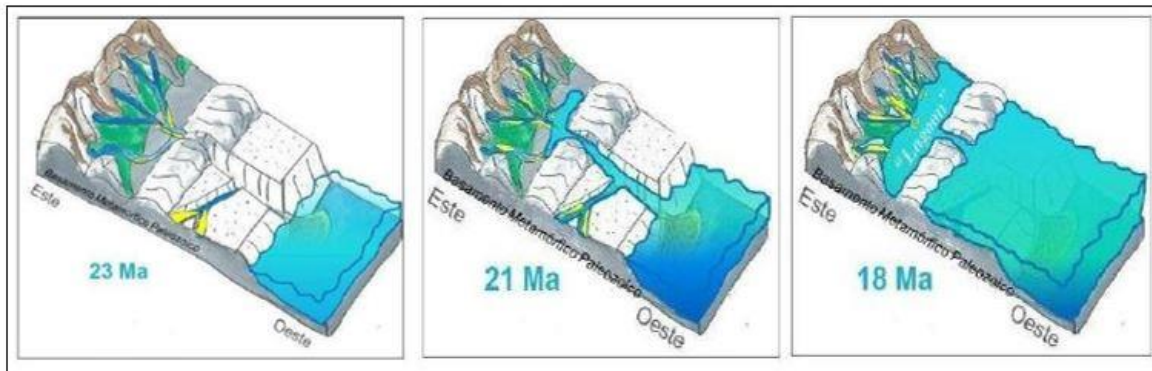
influencia oceánica, con una media anual de 11.1 °C, media mínima de 7,9° C y máxima de 17° C (Fierro 2009). Además de lo anterior, existe un predominio de los vientos del norte y del oeste, y del característico viento cálido denominado Puelche, que proviene del este, cálido y seco (PLADECO Los Lagos, 2011).

### 2.1.2 Caracterización vegetacional

En la Región de Los Ríos, se desarrolla actualmente el bosque laurifolio, también conocido como bosque Valdiviano en medio de un macrobioclima templado, y relacionado con los altos niveles de precipitación (> 2000 mm / año) (Moreira 2013). Específicamente en la comuna de Los Lagos, la vegetación dominante son los bosques caducifolios en zonas del valle y laderas interiores de ambas cordilleras, y el bosque siempreverde dominado por especies laurifolias (bosque valdiviano). Este último está representado con una gran diversidad vegetacional y de formas de vida endémicas, producto de la diversidad de ambientes y la historia evolutiva del bosque templado lluvioso de Sudamérica (PLADECO Los lagos 2018). Sin embargo, los bosques siempreverdes tienen una baja representación comunal en términos de superficie producto de factores antrópicos, quedando relegados a zonas de elevada pluviosidad, baja oscilación térmica y temperaturas moderadas, condiciones que se encuentran en los faldeos y zonas altas de ambas cordilleras, entre los 39° S y 42° S (Pliscoff y Fuentes 2008).

### 2.1.3 Caracterización geológica

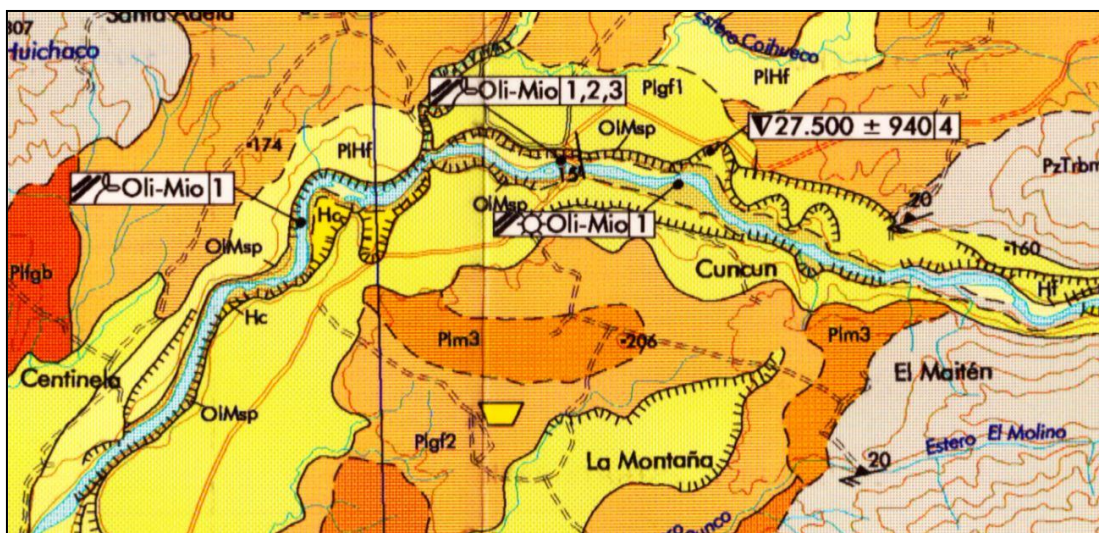
En la Cuenca de Valdivia, la Región de los Ríos, se encuentran secuencias sedimentarias que por lo general rellenan cuencas Cenozoicas. Las secuencias sedimentarias se describen como continentales y marinas, ubicándose en un rango temporal que va desde el Oligoceno al Mioceno superior. Estas secuencias se apoyan con discordancia angular sobre las rocas del basamento metamórfico (Palma-Heldt y Alfaro 1982, Kunstmann 2010). Cabe destacar, que las secuencias del Oligoceno-Mioceno, se encuentran cubiertas, parcialmente, por depósitos del Pleistoceno-Holoceno (Kunstmann 2010, Duhart *et al.* 2003). A inicios del Oligoceno superior, coincidente con una baja del nivel del mar a escala global, se activa la erosión de valles fluviales (figura 4a). Posteriormente, sube el nivel del mar y disminuye la energía de los ríos que desembocaban en el océano, lo que conlleva finalmente a un estancamiento de la red de drenaje y la subsecuente formación de ambientes de turberas o pantanos (Figura 4 b-c) (Kunstmann 2010).



**Figura 3.** Se observa a) Oligoceno superior, b) Ingreso del mar a la cuenca durante el Oligoceno-Mioceno, c) Estancamiento de la red de drenaje y formación de pantanos entre el Oligoceno Superior - Mioceno Inferior (Kunstman 2010).

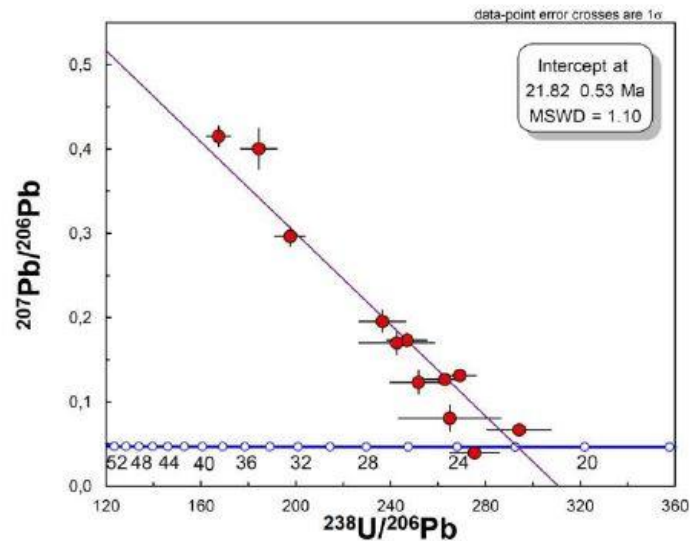
En la cuenca del Río San Pedro, perteneciente a la cuenca de Valdivia, los depósitos sedimentarios se conocen como los Estratos de San Pedro (figura 3), mencionados por primera vez por Brüggén (1959) y luego Illies (1970) quien los describe como estratos del Terciario de una potencia de varios de cientos de metros, ubicados en el Cañón del Río San Pedro. Los estratos de San Pedro afloran por casi 6 km en el borde del lecho del río San Pedro y están compuestos por Areniscas de grano medio a grueso de color gris, en donde es posible encontrar algunos rodados y restos de maderas fosilizadas, así como restos vegetales fósiles bien preservados (Elgueta *et al.* 2000). En relación con estos estratos, en el sector donde se emplaza el puente Pucono-Malihue ( $39^{\circ}44'49.91''$  S/  $72^{\circ}38'35.30''$  O), a la fecha se han encontrado fósiles vegetales en dos diferentes niveles portadores (Elgueta *et al.* 2000).

Acerca de la edad de estos estratos, análisis polínicos en el curso del Río San Pedro, indican una edad Oligoceno - Mioceno (Elgueta *et al.* 2000).



**Figura 4.** Carta geológica del área del estudio, ampliación de los estratos de San Pedro (representados con las siglas **OIMsp**) indicados en el mapa anterior (Duhart *et al.* 2003). Leyenda: **PIHF**, Depósitos sedimentarios fluviales; **Plfgb**, Depósitos Fluviales y glaciofluviales, depósitos de gravas polimícticas (Glaciación Rio Llico); **Plgf1**, Depósitos glaciofluviales (Glaciación Llanquihue); **Plgf2**, Depósitos glaciofluviales (Glaciación Santa María); **Plm3**, Depósitos Morrenicos (Glaciación Rio Llico); **Hc**, Depósitos sedimentarios coluviales; **Hf**, Depósitos sedimentarios Fluviales locales; **PzTrbm**, Complejo metamórfico Bahía Mansa.

Illies (1970) también describe los Estratos de Pupunahue, diferenciándolos de los Estratos de San Pedro, en que no fueron afectados por los plegamientos andinos. Según estudios realizados por Elgueta *et al.* (2000) los Estratos de Pupunahue han sido datados en  $21,82 \pm 0,5$  Ma mediante U-Pb en circones (Fig. 5) de una toba que se intercala en un manto de carbón, lo cual sitúa a los estratos en el límite Oligoceno – Mioceno.



**Figura 5:** Edad U-Pb SHRIMP en circones de las tobas intercaladas en los mantos de carbón de los Estratos de Pupunahue (S1) en la mina (Elgueta *et al.* 2000).

## 2.2 Muestreo y análisis

### 2.2.1 Obtención de material fósil

La obtención del material fósil se realizará en puntos seleccionados de los Estratos de San Pedro y se procederá a ilustrar el perfil estratigráfico, enfocándose en la descripción visual, tipo de roca, tamaño de grano, etc. de los distintos estratos observados. Las muestras de rocas e improntas vegetales serán extraídas con martillo geológico y posteriormente embaladas para facilitar su transporte hasta el Laboratorio de Paleontología de la Universidad Austral de Chile. Para extraer estas muestras se solicitó un permiso al Consejo de Monumentos Nacionales el cual quedo adscrito bajo el N° 8247 a cargo de la Dra. Ana M. Abarzúa.

### 2.2.2 Análisis florístico

La categorización taxonómica de los restos foliares en morfotipos se realizará en base a anatomía comparada con especies actuales según parámetros morfológicos como la forma y tamaño de la hoja, tipo de ápice y base, tipo de margen y extensiones marginales, y tipo de venación, descritas en “Manual of Leaf Architecture” (Ash *et al.* 1999). Los morfotipos mejor representados, serán fotografiados con una cámara fotográfica Canon EOS 1100 para luego hacer una descripción detallada según el caso. Para realizar la identificación de morfotipos taxonómicos se utilizará como material de referencia especies arbóreas pertenecientes al actual bosque esclerófilo, maulino, y bosque Valdiviano depositadas en el herbario perteneciente a la Universidad Austral de Chile, nombrado internacionalmente con las siglas VALD. Estas especies serán escogidas en base a sus preferencias ecológicas afines al ambiente del sitio de estudio.

### 2.2.3 Análisis de fisionomía foliar.

Para determinar parámetros climáticos en relación con el ensamble foliar fósil del sitio, se realizarán análisis fisionómicos basados en la correlación de la morfología foliar de especies dicotiledóneas leñosas, con variables climáticas como temperatura y humedad (Hinojosa 2005).

La interpretación del paleoclima de un sitio a partir de ensamblajes de hojas fósiles y la relación entre el clima y la vegetación actual, es la premisa sobre la que se han creado modelos matemáticos que

permiten estimar la temperatura y humedad asociada al ambiente en el cual se encuentran los macrorestos vegetales (Hinojosa 2005). Estos métodos utilizan análisis univariados y multivariados, que consideran regresiones simples y múltiples entre caracteres foliares actuales y sus respectivos climas, para posteriormente incluir los datos de los taxa fósiles en las ecuaciones obtenidas de los ensambles actuales (Hinojosa 2005, Hinojosa y Villagrán 2005).

La base de datos actual más utilizada es CLAMP (Climate-Leaf Analysis Multivariate Program o Programa Multivariado de Análisis Clima- Morfología foliar) propuesta por Wolfe (1993). En este trabajo se utilizará una versión actualizada de CLAMP en la cual fueron excluidos los datos de las localidades con temperatura muy frías, y bajos montos de precipitaciones y se consigna CLAMP3B SA (Hinojosa 2005).

Los métodos univariados que se utilizarán serán regresiones lineales simples, lo cuales pueden predecir variables climáticas usando solo un carácter fisionómico de la hoja, de esta manera se determinará la temperatura media anual (MAT) y las precipitaciones medias anuales (MAP). Para estimar la temperatura media anual (MAT) del ensamble fósil se realizará un análisis de margen foliar (LMA) el cual correlaciona el porcentaje de especies de borde entero de un ensamble con la temperatura (Bailey y Sinnot 1915).

Las temperaturas medias anuales (MAP) serán calculadas a partir de regresiones lineales entre el promedio de las áreas foliares de las improntas fósiles y la precipitación media anual. La obtención de los valores de paleotemperaturas y paleoprecipitaciones serán inferidos reemplazando en las ecuaciones los valores medidos de porcentaje de hojas con borde entero y el área foliar de las improntas fósiles (Tabla 1).

**Tabla 1:** Modelos univariados utilizados para la inferencia de paleotemperatura (Hinojosa et al. 2011) y paleoprecipitaciones (Hinojosa 2003 2005, Hinojosa y Villagrán 2005).

<i>Parámetro</i>	<i>Ecuación</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>SE</i>	<i>Set de datos</i>
TMA	$MAT=26,03 * \% \text{ no teeth} + 1,31$	0,82	2,8 °C	Sudamérica (TSA+Chile)
PMA	$\text{Ln}(\text{MAP})= 1,6355+0,492*\text{MLnA}$	0,6	$\text{Ln}(0,5) \text{ cm}$	CLAMP3B SA

*R<sup>2</sup>*: Coeficiente de correlación – *SE*: Error estándar del modelo

Los métodos multivariados son en teoría los más adecuados para representar la relación entre caracteres foliares y variables ambientales, dado que estos caracteres pueden responder en forma diferente a una o más variables ambientales (Hinojosa 2005, Hinojosa y Villagrán 2005, Wolfe 1993), por lo que también se realizarán regresiones lineales múltiples para MAT y para otros parámetros de

precipitación y temperatura (Tabla 2), y se realizará<sup>a</sup> un análisis de correspondencia canónica para estimar parámetros climáticos basados en los 31 caracteres foliares determinados por Wolfe (1993).

**Tabla 2:** Modelos multivariados utilizados para la inferencia de parámetros climáticos de precipitaciones y temperaturas (Gayo et al. 2005).

Parámetro	Ecuación	R <sup>2</sup>	SE (°C)	Set de datos
TMA	MAT= 1.8116+(0.2400*% no teeth)+(0.06795*L:W 2-3:1)	0,88	2,1	CLAMP3B SA
CMMT	-12.1013+(0.3182*% no teeth)+(0.1433*L:W 2-3:1)	0,81	3,8	CLAMP3B SA
WMMT	16.9076+(0.1218*% no teeth)+(0.1406*nanophylla)	0,54	3,2	CLAMP3B SA
GSL	2.5238+(0.09765*% no teeth)+(0.08584*L:W 3-4:1)+(0.02334*L:W 2-3:1)	0,83	1,2	CLAMP3B SA
GSP	-180.5805+(4.2098*% L:W 2-3:1)+(2.8854*% elliptic)	0,56	58,2	CLAMP3B SA
3DRY	-47.5145+(1.0320*% elliptic)+(0.9776*% Microphylla3)	0,59	15,6	CLAMP3B SA

**MAT:** temperatura media anual; **CMMT:** temperaturas medias del mes frío; **WMMT:** temperaturas medias de mes cálido; **GSL:** duración de la temporada de crecimiento (meses); **GSP:** Precipitación de la temporada de crecimiento; **3DRY:** precipitación durante los tres meses más secos.

Abreviaturas de los caracteres de la hoja: no teeth: categoría del tipo de margen (margen entero), L: W (2-3: 1 y 3-4: 1): categorías de relación longitud / anchura; Nanophylla y Microphylla3: categorías de tamaños de hojas; Elíptico: forma de hoja elíptica; MlnA: logaritmo natural del área foliar.

El análisis de correspondencia canónica (CCA), se aplicará a la base de datos CLAMP3B SA considerando 31 caracteres foliares y distintas variables de temperatura y humedad. Estos caracteres foliares consideran margen foliar, tipos de dientes, tamaño foliar, tipo de ápice y base, entre otros. Y las estimaciones de cada parámetro climático se obtendrán al reemplazar el valor del vector climático pertinente en ecuaciones propuestas por Hinojosa (2003, 2005) e Hinojosa y Villagrán (2005, Tabla 3).

El análisis de correspondencia canónica será realizado con el programa R (Core Team 2013).

**Tabla 3:** Ecuaciones para estimar temperatura(°C) y precipitación(cm) en el análisis de correspondencia canónica (Hinojosa 2003 2005, Hinojosa y Villagrán 2005)

Parámetro	Ecuación	R <sup>2</sup>	SE (°C)	Set de datos
TMA	-8.1231+EXP[3.0962+(0.2407*vMAT)]	0,88	2,1	CLAMP3B SA
CMMT	-35.1955+EXP[3.7147+(0.181 * vCMMT)]	0,81	3,8	CLAMP3B SA
WMMT	23.634+(3.4172*v WMMT)+(0.4028*vWMMT) <sup>2</sup>	0,52	3,3	CLAMP3B SA
GSL	-14.2108+EXP[3.1147+(0.1098*vGSL)]	0,84	1,1	CLAMP3B SA
GSP	75.4875*EXP(0.528*vGSP)	0,77	42,6	CLAMP3B SA
3DRY	17.4628*EXP(0.6729*v3DRY)	0,61	15,3	CLAMP3B SA

SE = error estándar, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinación. vMAT: vector de MAT, vWMMT: vector de WMMT, vCMMT: vector de CMMT, vGSL: vector de GSL, vGSP: vector de GSP, v3DRY: vector de 3DRY.

Además del análisis CLAMP se realizará el análisis digital de fisionomía foliar propuesto por Huff *et al.* (2003) con el fin de contrastar los resultados de los parámetros climáticos ofrecidos por ambos métodos. El análisis digital de fisionomía foliar propone dos ventajas importantes al análisis CLAMP, uno de ellos es que elimina la subjetividad y la irreproducibilidad en el proceso de recopilación de datos, ya que en el análisis digital los algoritmos fijos procesan la mayoría de las mediciones. Por otro lado, el análisis digital utiliza variables continuas, como el número de dientes y el área del diente, en contraste con los estados discretos, generalmente de carácter binario característicos del análisis de margen de hoja y CLAMP (Huff *et al.* 2003, Roger *et al.* 2005, Peppe *et al.* 2011).

Las muestras de hojas fósiles y las escalas de centímetros se fotografiarán en fondos blancos con una cámara digital Canon EOS 1100, tras lo cual se procederá a calcular los 21 caracteres a definidos por Royer *et al.* (2005). Para utilizar este análisis se considerarán las hojas fósiles cuyo margen foliar este casi intacto, o aquellas en las que sea posible reconstruir el contorno de la hoja con una precisión razonable para poder realizar mediciones precisas (Huff *et al.* 2003).

Para el procesamiento de las hojas digitalizadas se utilizará Adobe Photoshop CC 2018 (Adobe Systems, San José, California, EE. UU.) tal como se describe en Huff *et al.* (2003), restaurando los márgenes dañados, eliminando sombras, y separando peciolo y dientes en archivos separados por cada hoja digitalizada. La medición de los caracteres se realizará con IMAGE J (Abramoff *et al.* 2004) para calcular las siguientes variables: área de la hoja, perímetro, perímetro interno, diámetro de la base, compacidad, factor de forma, longitud del eje mayor, eje menor longitud y área de los dientes, todas las demás variables fisionómicas derivaran de estos datos primarios (Roger *et al.* 2005, Peppe *et al.* 2011). Los datos fisionómicos resultantes se correlacionarán con variables climáticas utilizando regresión lineal simple y múltiple, según las ecuaciones planteadas por Peppe *et al.* 2011.

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES

Durante el segundo semestre del año 2016, se llevó a cabo una investigación preliminar sobre algunas de las improntas de hojas fósiles pertenecientes a los Estratos de San Pedro. Estas muestras fueron recolectadas en terreno, durante el curso de CITI-313, Palinología y Paleobotánica perteneciente al Magister en Paleontología de la Universidad Austral de Chile. Como resultado de este estudio se logró identificar algunos morfotipos foliares a través de anatomía comparada (Fig. 5) aportando evidencias de una flora compuesta en su mayoría por elementos Neotropicales con presencia de flora antártica durante la transición Oligoceno-Mioceno en el área de estudio.



**Figura 6:** Comparación de muestras foliares fósiles y actuales. Registro fotográfico de *Persea lingue* actual (derecha) y muestra fósil de morfotipo Lauraceae (Izquierda).

Además, estudios previos no publicados (Palma-Heldt y Duhart 2015) para los Estratos de San Pedro sobre improntas foliares, proponen cinco morfotipos, sin embargo, el estudio realizado en el curso de Paleobotánica y Palinología identificó siete, de los cuales cuatro fueron descritos por primera vez (Tabla 2). Se concluyó mediante comparación con especies análogas actuales, que las posibles condiciones ambientales a las que estaban sometidos estos bosques eran más cálidas que las actuales.

**Tabla 4:** Comparación de especies y morfotipos encontrados entre el trabajo realizado por Palma-Heldt, S. y Duhart, P. (2015) y los resultados de la presente investigación.

Morfotipo	Palma, Heldt, S., Duhart, p. (2015)	Investigación preliminar 2016
Lauraceae (Tipo <i>Persea</i> sp.)	X	X
Lauraceae (Tipo <i>Beilschmiedia</i> sp.)	-	X
<i>Myrceugenia</i> sp.	X	X
<i>Eucryphia</i> sp.	-	X
<i>Griselinia</i> sp.	-	X
<i>Nothofagaceae</i> sp.	X	X
<i>Podocarpus</i> sp.	X	-
<i>Berberis</i> sp.	X	-
Proteaceae (Tipo <i>Lomatia</i> sp.)	-	X

## CARTA GANTT CON LA PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

	2018											
<b>Actividad</b>	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Defensa Proyecto de tesis					X							
Obtención de muestras fósiles y preparación			X	X								
Identificación muestras fósiles por anatomía comparada.				X	X							
Caracterización fisionomía foliar del ensamble vegetal fósil (CLAMP y Digital)					X	X	X	X				
Análisis estadísticos parámetros climáticos.								X	X	X		
Interpretación de resultados y discusiones										X	X	
Preparación del documento final	X	X	X	X	X					X	X	
Presentación final											X	X

## REFERENCIAS

- Abramoff M, P Magalhães, S Ram. 2004. Image Processing with Image J. Igitur Archief - Utrecht Publishing and Archiving Service.
- Ash A, B Ellis, L Hickey, K Johnson, P Wilf, S Wing. 1999. Manual of Leaf Architecture: Morphological Description and Categorization of Dicotyledonous and Net-Veined Monocotyledonous Angiosperms: Smithsonian Institution, Washington, D.C., 65 p.
- Bailey I, E Sinnott. 1915. A botanical index of Cretaceous and Tertiary climates. *Science* 41: 831–834.
- Benedetto, J 2012. El Continente de Gondwana a Través Del Tiempo: Una Introducción a La Geología Histórica. Córdoba, Argentina. 384 p.
- Bruggen J. 1950. Fundamentos de La Geología de Chile, Inst. Geográfico Militar. Santiago.
- Elgueta S, C Mpodozis. 2012. Evolución Tectono-Sedimentaria de la Cuenca del Rio Cruces (Valdivia) durante el Neógeno. Congreso geológico de Antofagasta. 646–648.
- Elgueta S, M McDonough, J Le Roux, E Urqueta, P Duhart, P. 2000. Estratigrafía y Sedimentología de las Cuencas Terciarias de la Región de Los Lagos (39°-41°30'S). *Servicio Nacional de Geología y Minería* 50: 57.
- Fierro M. 2009. Máfil en la historia y la memoria 1930-1964. Printus, Santiago, 94 p.
- Gayó E, L Hinojosa, C Villagrán. 2005. On the persistence of Tropical Paleofloras in central Chile during the Early Eocene. *Review of Paleobotany and Palynology* 137: 41-50.
- Gutiérrez N. 2011. Diversidad y Cambios Florísticos Durante el Mioceno en Chile Central. Mg. Thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 82 p.
- Hinojosa L. 2003. Fisonomía foliar y clima de las Paleofloras Mixtas del Terciario de Sudamérica. Ph.D. thesis, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Chile.
- Hinojosa F. 2005. Cambios climáticos y vegetacionales inferidos a partir de paleofloras cenozoicas del sur de Sudamerica. *Revista Geológica de Chile* 32: 95–115.
- Hinojosa F, C Villagrán. 1997. Historia de los bosques del sur de Sudamérica, I: antecedentes paleobotánicos, geológicos y climáticos del Terciario del cono sur de América. *Revistas Chilena de Historia Natural* 70: 225–239.

- Hinojosa L, C Villagrán. 2005. Did South American Mixed Paleofloras evolve under thermal equability or in the absence of an effective Andean barrier during the Cenozoic? *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 217: 1–23.
- Hinojosa L, C Villagrán, J Armesto. 2006. Are Chilean coastal forests pre-Pleistocene relicts? Evidence from foliar physiognomy, paleoclimate, and phytogeography. *Journal of Biogeography* 33: 331–341.
- Hinojosa L, N Gutiérrez. 2009. Cambio climático y diversidad: El caso de la Formación Navidad, Mioceno de Chile central. Congreso Geológico Chileno, No. 12, Actas 3: S10-21. Santiago.
- Hinojosa L, Pérez F, Gaxiola A, Sandoval I. 2011. Historical and phylogenetic constraints on the incidence of entire leaf margins: insights from a new South American model. *Global Ecology and Biogeography* 20: 380-390.
- Hinojosa L, C Villagrán, J Armesto, M Pérez, D Rougier. 2015. Flora y Vegetación de bosques de Chile: Legado histórico-biogeográfico. In: Ciencias Ecológicas 1983-2013. Treinta años de investigaciones chilenas. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, pp. 123–138.
- Huff P, P Wilf, E Azumah. 2003. Digital Future for Paleoclimate Estimation from Fossil Leaves? Preliminary Results. *PALAIOS* 18: 266–2740
- Illies H. 1970. Geología de los alrededores de Valdivia y volcanismo y tectónica en márgenes del pacífico en Chile Meridional. PhD. Thesis, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Kunstmann D. 2010. Caracterización geológica y geoquímica de la Cuenca Carbonífera Mulpún, con aplicación en la gasificación subterránea del carbón. Región de Los Ríos, Chile. PhD. Thesis, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 119 p.
- Leppe, M, M Mihoc, N Varela, W Stinnesbeck, H Mansilla, H Bierma, K Cisterna, E Frey, T Jujihara. 2012. Evolution of the Austral-Antarctic flora during the Cretaceous: New insights from a paleobiogeographic perspective. *Revista Chilena de Historia Natural* 85: 369–392.
- Lumbert F, Pliscoff P. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria. Santiago de Chile. 316 p.
- McLoughlin S. 2001. The breakup history of Gondwana and its impact on pre-Cenozoic floristic provincialism. *Australian Journal of Botany* 49: 271–300.
- Moreira A. 2013. Plant Geography of Chile. Plant and Vegetation. Editorial Springer, Santiago, Chile. 336 p.

- Palma-Heldt S, G Alfaro. 1982. Antecedentes palinológicos preliminares para la correlación de los mantos de carbón del Terciario de la Provincia de Valdivia. III Congreso Geológico Chileno. Concepción.
- Palma-Heldt S, P Duhart. 2015. Consideraciones sobre el registro de macro y microflora en los Estratos de San Pedro, Cenozoico de Valdivia, Región de Los Ríos, Chile. XIV Congreso Chileno de Geología. 656–659 p.
- Peppe D, D Royer, B Cariglino, S Oliver, S Newman, E Leight, G Enikolopov, M Fernandez-Burgos, F Herrera, J Adams, E Correa, E Currano, M Erickson, L Hinojosa, J Hoganson, A Iglesias, C Jaramillo, K Johnson, G Jordan, N Kraft, E Lovelock, C Lusk, Ü Niinemets, J Peñuelas, G Rapson, C Wing, I Wright. 2011. Sensitivity of leaf size and shape to climate: global patterns and paleoclimatic applications. *New phytologist* 190: 724–739.
- PLADECO (Plan de desarrollo comunal) de la comuna de Los lagos. Consultado el 09 marzo 2018. Disponible en [http://www.valleriosanpedro.cl/download/Libros/MODIFICACION-PLAN-DE-DESARROLLO\\_2008-2012.pdf](http://www.valleriosanpedro.cl/download/Libros/MODIFICACION-PLAN-DE-DESARROLLO_2008-2012.pdf)
- Pliscoff P, F Fuentes. 2008. Diversidad de ecosistemas. Ecosistemas terrestres. *In: Biodiversidad de Chile. Patrimonios y desafíos. Ocho Libros Editores. Santiago de Chile. 78 - 91 p.*
- Prámparo M, M Quattrocchio, M Gandolfo, M Zamaloa, E Romero. 2007. Historia evolutiva de las angiospermas (Cretácico-Paleógeno) en Argentina a través de los registros paleoflorísticos. *Ameghiniana* 11: 157–172.
- Quattrocchio M, M Martínez, L Hinojosa, C Jaramillo. 2013. Quantitative analysis of Cenozoic palynofloras from Patagonia, southern South America. *Palynology* 37: 246-258.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Romero E. 1978. Paleoecología y Paleofitogeografía de las Tafofloras del Cenofítico de Argentina y áreas vecinas. *Ameghiniana* 15: 209–227.
- Romero E. 1986. Paleogene phytogeography and climatology of south America. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 73: 449–461.
- Romero E. 1993. South American Paleoflora. *In: Biological Relationships between Africa and South America* Yale University press, pp. 648 p.

- Royer D, P Wilf, D Janesko, E Kowalski, D Dilcher. 2005. Correlations of climate and plant ecology to leaf size and shape: potential proxies for the fossil record. *American Journal of botany* 92: 1141–1151.
- Stranks L, P England. 1997. The use a resemblance function in the measurement of climatic parameters from the physiognomy of Woody dicotyledons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 131: 15–28.
- Troncoso A, E Romero. 1998. Evolución de las comunidades florísticas en el extremo sur de Sudamérica durante el Cenofítico. *In: Proceedings of the VI Congreso Latinoamericano de Botánica. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden.* vol 68. 514 p.
- Villagrán C, F Hinojosa. 1997. Historia de los bosques del sur de Sudamérica, II: Análisis fitogeográfico. *Revista Chilena de Historia Natural* 70: 241–267.
- Villagrán C, F Hinojosa. 2005. Esquema Biogeográfico de Chile. *In: Regionalización Biogeográfica en Iberoamérica y tópicos afines* Ediciones de la Universidad Nacional Autónoma de México, Jiménez Editores, México. 551–577 p.
- Wilf, P. 1997. When are leaves good thermometers? *Paleobiology* 23: 373–390.
- Willis K, J McElwain. 2002. *The Evolution of Plants.* Oxford University Press, Oxford, United Kingdom. 397 p.
- Wolfe J. 1993. A method of obtaining climatic parameters from leaf assemblages. *U. S Geological Survey Bulletin* 2040: 71.
- Zachos J, M Pagani, L Sloan, E Thomas, K Billups. 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science* 292: 686–693.