



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD DE  
CIENCIAS NATURALES Y OCEANOGRÁFICAS



CAMBIOS TEMPORALES EN EL APORTE DE MATERIA ORGÁNICA DE  
ORIGEN TERRÍGENO HACIA EL GOLFO ALMIRANTE MONTT, PATAGONIA  
CHILENA

Carolina Antonia Toro Ávila

Seminario de Título presentado al  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA  
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Para optar al Título de  
BIÓLOGO MARINO

Profesora Guía: Carina B. Lange

Concepción – Chile

21 de enero 2026

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

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFÍA

Este Seminario de Título ha sido realizado en el Departamento de Oceanografía de la Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas.

Profesor(a) Guía

---

Dr. Carina B. Lange  
Universidad de Concepción

Ha sido aprobada por la  
Siguiete Comisión Evaluadora

---

Dr. Marcelo Gutiérrez  
Universidad de Concepción

---

Dr. Sergio Contreras  
Universidad Católica de la Santísima Concepción

Jefe de Carrera

---

Dr. Eduardo Hernández  
Universidad de Concepción

Dedicada a mi familia

Equivocarse también es parte del aprendizaje.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecer a todas las personas que contribuyeron a la construcción de esta tesis, en especial a la Dra. Carina B. Lange, quien ha sido mi profesora desde el año 2024 y con mucha dedicación me ha brindado su apoyo y su guía en el desarrollo de esta tesis. Además, agradecer a Víctor Acuña y Paola Cárdenas, quienes me enseñaron todo lo necesario para trabajar en el Laboratorio de Paleooceanografía a lo largo de este tiempo. Al Dr. Silvio Pantoja, por darme acceso a los equipos en su Laboratorio de Geoquímica Orgánica Marina.

Me gustaría manifestar mi agradecimiento a los miembros de mi comisión evaluadora, al Dr. Marcelo Gutiérrez por disponer de su tiempo y al Dr. Sergio Contreras (Evaluador externo) por darme acceso al laboratorio ([www.labensci.com](http://www.labensci.com)) que tiene a cargo en la Universidad Católica de la Santísima Concepción y por formar parte de mi formación académica.

Asimismo, agradezco a los Drs. Helge Arz, Jérôme Kaiser y Matthias Moros del Instituto IOW (Instituto Leibniz de Investigación del Mar Báltico, Warnemünde, Alemania), por facilitar los datos relacionados a los modelos de edad de los sedimentos utilizados para esta tesis.

Agradecer al Centro COPAS-Coastal (FB 210021) y en especial al Centro IDEAL (FONDAP 15150003) por el financiamiento del trabajo involucrado en esta tesis y la asistencia al Congreso de Ciencias del Mar 2025. El proyecto ANID/FONDEQUIP EQM210073 financió las mediciones de XRF del testigo GAM 16.

Finalmente, quiero dar un agradecimiento a mi familia, a mis amigos y compañeros por estar siempre apoyándome y animándome a seguir.

Gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT .....	viii
1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Área de Estudio .....	3
1.2 Carbono orgánico, su razón isotópica y biomarcadores .....	5
2 OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo general .....	8
2.2 Objetivos específicos .....	8
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1 Testigos de sedimento .....	9
3.2 Biomarcadores lipídicos .....	10
3.3 Análisis estadísticos.....	13
3.4 Datos disponibles para esta tesis.....	14
4 RESULTADOS .....	17
4.1 Climatología del área del Golfo Almirante Montt .....	17
4.2 Propiedades geoquímicas .....	20
4.3 Análisis estadísticos.....	24
5 DISCUSIÓN .....	27
6 CONCLUSIONES .....	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
RECURSOS ONLINE .....	43
ANEXO AL SEMINARIO DE TITULO.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Velocidad y dirección del viento en el hemisferio sur a 850 hPa (1981 – 2010) durante (a) el verano austral (DEF: diciembre, enero, febrero,) y (b) invierno (JJA: junio, julio, agosto). Modificado de Bertrand <i>et al.</i> (2014). ....	1
Fig.2. Ubicación del área de estudio (rectángulo) y mapa batimétrico del Golfo Almirante Montt (GAM) ubicado en la Región de Magallanes. Tomado de Pinilla <i>et al.</i> (2023).....	3
Fig. 3. Estructura molecular del Dinosterol y $\beta$ -sitosterol. Modificado de Meyers (1997). ...	7
Fig. 4. Mapa del Golfo Almirante Montt (GAM), indicando las estaciones de muestreo MUC 57 (Crucero SO296-2) y GAM 16 (Crucero COPAS 2022). ....	9
Fig. 5. Esquema de extracción de lípidos totales (TLE) y fraccionamiento por columna de sílica gel (SG). De las fracciones obtenidas (F1, F2, F3, F4, F5) fueron analizadas F1 y F4 mediante cromatografía de gas acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) y F5 con cromatografía líquida de alta presión acoplada a espectrometría de masas (UHPLC-MS). Diclorometano (DCM); Metanol (MeOH). ....	11
Fig. 6. (a) Mapa del Golfo Almirante Montt (GAM) indicando las cuencas de los ríos: RS: Río Serrano (punto naranja), RP: Río Prat (punto rojo), RH: Río Hollemborg (punto negro). En amarillo se delimitan las áreas de las cuencas de: (b) Río Serrano (Cod: 1228900); (c) Río Prat (Cod: 12291001); (d) Río Hollemborg (Cod: 1240004). Dentro de cada área, el punto amarillo oscuro representa la estación de mediciones en cada una de las cuencas hacia el GAM a través de los ríos mencionados. El recuadro rojo indica la posición de los testigos de sedimento estudiados. Tomado de <a href="https://camels.cr2.cl/">https://camels.cr2.cl/</a> .....	16
Fig. 7. Climatología de temperatura (a) y precipitación (b) mensual de las cuencas. ....	17
Fig. 8. Climatología del caudal del Río Serrano 1994–2019. ....	18
Fig. 9. (a) Promedio de temperatura y precipitación anuales (b) (1979–2019) en las cuencas de los ríos Serrano (verde), Prat (rojo) y Hollemborg (azul), con sus respectivas líneas de tendencia. ....	19
Fig. 10. Serie de tiempo (1994–2019) del promedio anual del caudal del Río Serrano y escorrentía en su cuenca (ver Fig. 6). ....	20
Fig. 11. Porcentaje carbono orgánico (%) de los testigos MUC 57 y GAM 16 en relación con la profundidad. ....	20

Fig. 12. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (a) y fracción terrígena (b) en los testigos MUC 57 y GAM 16. ....	21
Fig. 13. Índice de CPI (a) y ACL (b) del testigo MUC 57 y GAM16. ....	22
Fig.14. Esteroles totales ( $\mu\text{g/g}$ TOC) y distribución porcentual de esteroles de origen terrígeno ( $\beta$ -sitosterol, $\beta$ -sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol) del testigo MUC 57 (rojo, a) y GAM 16 (azul, b). ....	23
Fig. 15. Relación entre el índice BIT y la razón brGDGT IIIa/IIa de los testigos MUC 57 y GAM16. Se indica la fuente de materia orgánica en ambos testigos. ....	24
Fig. 16. Proxies medidos en los testigos MUC 57 y GAM 16 durante los últimos ~130 años. (a) Porcentaje de carbono orgánico; (b) Fracción terrígena ( $F_{\text{terr}}$ ) basada en $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ; (c) Índice preferencial de carbono (CPI) donde la línea punteada indica el umbral de $\text{CPI}>3$ ; (d) porcentaje de esteroles terrígenos ( $\sum$ $\beta$ -sitosterol, $\beta$ -sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol). El área punteada corresponde al incremento del aporte del material terrígeno hacia el GAM en los últimos ~25 años. ....	28
Fig. 17. a) Registro sedimentario de la MO terrígena ( $F_{\text{terr}}$ ) y b) porcentaje de esteroles terrígenos en los testigos MUC 57 y GAM 16 desde 1950 CE en comparación con c) la anomalía regional promedio de la temperatura del aire, d) la anomalía de la precipitación regional y e) el índice SAM (Southern Annular Mode) (d). El área punteada corresponde al período 1999 al presente. ....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información de los testigos de sedimentos, incluyendo nombre del testigo, cruce asociado, ubicación geográfica, profundidad, largo del testigo y equipo de extracción. ...	10
Tabla 2. Datos recopilados de las cuencas de los ríos Serrano, Prat y Hollemborg, incluyendo área de cada cuenca, su ubicación geográfica y la extensión de las series de tiempo de la precipitación (mm), temperatura (°C), escorrentía (mm) y caudal (m <sup>3</sup> /s).....	15
Tabla 3. Análisis estadísticos Kruskal-Wallis de los testigos MUC 57 y GAM 16. ....	25
Tabla 4. Coeficiente de correlación de Pearson entre variables climáticas y aporte terrígeno al GAM.....	26

## RESUMEN

El presente trabajo reconstruye la dinámica temporal de los aportes de materia orgánica de origen terrígeno hacia el Golfo Almirante Montt (GAM), ubicado en la región de Magallanes, Chile (51°47' S; 72°50' O). El GAM es un sistema estuarino semicerrado cuya circulación está influenciada por el aporte de agua dulce desde el continente, lo que lo convierte en un sitio ideal para estudiar los cambios temporales en la interacción océano-continente y su relación con factores climáticos recientes. En este contexto y con el objetivo de estudiar la variación en el aporte terrígeno hacia el golfo durante los últimos ~130 años, se analizaron dos testigos de sedimento recolectados en la cuenca noroeste durante las expediciones COPAS-GAM en mayo 2022 (GAM 16) y SONNE SO296-2 en febrero 2023 (MUC 57). Los modelos de edad de ambos testigos se consideran definitivos hasta los 33 cm de profundidad, basados en mediciones de actividad de los isótopos  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{241}\text{Am}$ , abarcando un registro histórico desde ~1890 al año 2023. Las tasas de sedimentación fueron 0,26 cm/año y 0,24 cm/año para el MUC 57 y el GAM 16, respectivamente. Los análisis geoquímicos incluyeron biomarcadores lipídicos [*n*-alcanos, esteroides y Glicerol Dialquil Glicerol Tetraéteres (GDGTs)], la concentración de carbono orgánico ( $C_{\text{org}}$ ) y su razón isotópica ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ). En los últimos ~25 años estas variables han experimentado un cambio que se manifiesta en: i) un aumento en el promedio de la abundancia relativa del  $C_{\text{org}}$  desde 2% a 3%, ii) valores del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  más negativos (-22,1 vs. -23,8‰), iii) un incremento en la concentración de *n*-alcanos de cadena larga (>*n*C25) con fuerte dominancia impar (17 vs. 27%), y iv) un aumento moderado en los esteroides característicos de plantas vasculares terrestres (31 a 34%). Además, los GDGTs reflejaron la mezcla de materia orgánica de diverso origen (marino y terrestre) que caracterizan a estos sedimentos. En conclusión, los datos obtenidos señalan que la contribución de materia orgánica de origen terrígeno hacia el Golfo Almirante Montt ha aumentado en las últimas décadas (desde ~2000–2005 CE), aparentemente en respuesta a cambios climáticos recientes en la zona sur de la Patagonia chilena que incluyen un incremento progresivo de las precipitaciones y de la temperatura del aire hacia la actualidad.

## ABSTRACT

The present work reconstructs the temporal dynamics of the contributions of organic matter of terrigenous origin to the Golfo Almirante Montt (GAM), located in the Magallanes region, Chile (51°47' S; 72°50' W). The GAM is a semi-closed estuarine system whose circulation is influenced by the contribution of freshwater from the continent, which makes it an ideal site to study temporal changes in ocean-continent interaction and its relationship with recent climatic factors. In this context and with the objective of determining the variation in terrigenous contribution to the Gulf during the last ~130 years, we analyzed two sediment cores collected in the northwestern basin during expeditions COPAS-GAM in May 2022 (GAM 16) and SONNE SO296-2 in February 2023 (MUC 57). The age models of both cores are considered definitive up to 33 cm core depth, based on activity measurements of the isotopes  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{241}\text{Am}$ , covering a historical record from ~1890 to 2023. Sedimentation rates were 0.26 cm/year and 0.24 cm/year for MUC 57 and GAM 16, respectively. Geochemical analyses included lipid biomarkers (*n*-alkanes, sterols, and Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers (GDGTs)), organic carbon concentration ( $C_{\text{org}}$ ) and its isotopic ratio  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ . In the last ~25 years these variables have experienced a change that is manifested in: i) an increase in the average relative abundance of  $C_{\text{org}}$  from 2% to 3%; ii) more negative  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values (-22.1 vs. -23.8‰); iii) an increase in the long chain *n*-alkanes (>*n*C25) with odd-over-even predominance (17 vs. 27%), and iv) a moderate increase in sterols characteristic of terrestrial vascular plants (31 to 34%). Furthermore, the GDGTs reflected the mix of organic matter of diverse origin (marine and terrestrial) that characterizes these sediments. In conclusion, the data obtained indicate that the contribution of organic matter of terrigenous origin to the Golfo Almirante Montt has increased in recent decades (from ~2000–2005 CE), apparently in response to recent climatic changes in southern Chilean Patagonia that include a progressive increase in precipitation amount and air temperature towards the present.

# 1 INTRODUCCIÓN

La Patagonia es una región que se extiende desde los 40°S hasta el extremo sur del continente Sudamericano a los 55°S, incluyendo Tierra del Fuego y la sección más austral de la Cordillera de los Andes (Garreaud *et al.*, 2013). Se encuentra influenciada por los Vientos del Suroeste (*SWW*, por sus siglas en inglés) que son los vientos predominantes en latitudes medias del hemisferio sur (Bertrand *et al.*, 2014). La Cordillera de los Andes es una barrera significativa para la circulación del viento a baja altitud, con un efecto orográfico que resulta en altas precipitaciones en el lado occidental de los Andes y condiciones secas en el este, en la Patagonia Argentina (Garreaud *et al.*, 2013). Durante el invierno austral (junio-agosto), cuando los *SWW* se expanden hacia el norte, aumenta la frecuencia de sistemas frontales que ingresan desde el Pacífico, intensificando las precipitaciones en el flanco occidental entre 40°S y 45°S (Bertrand *et al.*, 2014). En contraste, durante el verano (diciembre-febrero), los *SWW* se contraen hacia latitudes más altas, reduciendo las precipitaciones en la Patagonia norte y central, aunque en el extremo sur persiste la lluvia durante gran parte del año dada la acción continua del flujo zonal sobre la cordillera (Garreaud *et al.*, 2013) (Fig. 1).

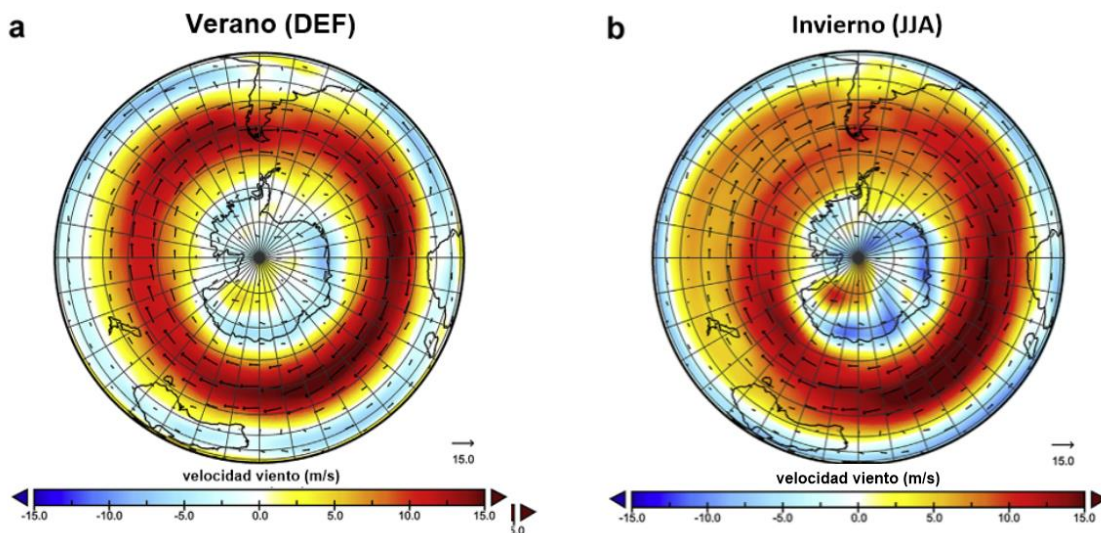


Fig. 1. Velocidad y dirección del viento en el hemisferio sur a 850 hPa (1981 – 2010) durante (a) el verano austral (DEF: diciembre, enero, febrero,) y (b) invierno (JJA: junio, julio, agosto). Modificado de Bertrand *et al.* (2014).

La vegetación de la Patagonia chilena es altamente diversa y está fuertemente determinada por los gradientes extremos de temperatura y precipitación impuestos por la Cordillera de los Andes (e.g., Endlicher & Santana, 1988; Garreaud *et al.*, 2013; Villavicencio *et al.*, 2016). Debido a estos contrastes ambientales, se reconocen cuatro grandes comunidades vegetales: la tundra magallánica en los archipiélagos húmedos del Pacífico, el bosque siempreverde en la zona occidental, los bosques caducifolios en sectores de mayor altitud o continentalidad, y la estepa patagónica hacia el oriente árido (Endlicher & Santana, 1988).

La Patagonia chilena se caracteriza por ser el sistema de fiordos más extenso del planeta. Estos son ecosistemas estuarinos, en donde interactúa el agua dulce proveniente de ríos y derretimiento de glaciares con las aguas oceánicas, lo que los convierte en sistemas altamente dinámicos y complejos, que evolucionan y cambian en escalas de tiempo relativamente cortas (Bianchi *et al.*, 2020). Los fiordos pueden sustentar funciones ecosistémicas claves sobre los ciclos biogeoquímicos y el transporte de nutrientes (e.g., Silva *et al.*, 2011; Vargas *et al.*, 2011). Estas características los convierten en un ambiente sensible a las variaciones en los aportes continentales, los cuales están fuertemente modulados por factores climáticos como las precipitaciones, el derretimiento de glaciares y el transporte de aguas de derretimiento a través de los ríos o escorrentía y la dinámica de la vegetación terrestre (Davies & Glasser, 2012; Garreaud *et al.*, 2013). En términos del reciclaje de la materia orgánica (MO), los fiordos se caracterizan por presentar altas tasas de sedimentación y buena preservación, una vez incorporada en los sedimentos (Smith *et al.*, 2015), facilitando el estudio de los cambios ambientales en tiempos presentes y geológicos a través de registros sedimentarios (e.g., Sepúlveda *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2011; Vargas *et al.*, 2011; Rebolledo *et al.*, 2015).

Esta tesis aborda la reconstrucción temporal del aporte de materia orgánica terrestre al Golfo Almirante Montt (GAM) en relación con las variaciones climáticas que abarcan aproximadamente el último siglo. Se aplica el estudio de la materia orgánica

y biomarcadores lipídicos para comprender la dinámica de los aportes terrígenos hacia sistemas estuarinos como el GAM, lo cual es fundamental para reconstruir la historia ambiental más reciente de la Región Austral de Chile.

### 1.1 Área de Estudio

El Golfo Almirante Montt (GAM), es un fiordo ubicado en la Región de Magallanes ( $51^{\circ}55'S$  y  $72^{\circ}45'O$ ) localizado en el borde sur de los Campos de Hielo Sur. Se caracteriza por ser un sistema estuarino semicerrado con conexiones limitadas al océano costero, cuya compleja configuración geológica restringe el intercambio de agua desde el exterior hacia el interior del golfo (Pinilla *et al.*, 2023). La cuenca del GAM está dividida en dos subcuencas de diferentes características batimétricas donde la subcuenca del oeste presenta profundidades mayores ( $>100m$ ) que la subcuenca del este ( $<20m$ ) (Fig. 2). En este entorno, donde la energía de las mareas es escasa, la circulación superficial está dominada por las abundantes descargas de agua dulce (aguas de baja densidad) provenientes del deshielo de glaciares y ríos, la alta precipitación y por los patrones de viento característicos de la región, conocidos por su alta intensidad (Pinilla *et al.*, 2023).

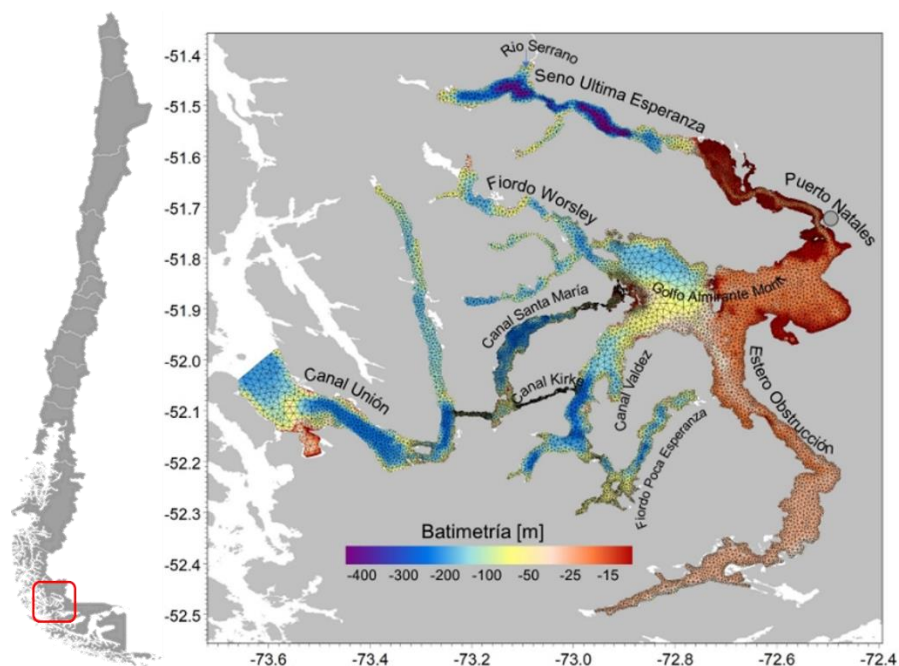


Fig.2. Ubicación del área de estudio (rectángulo) y mapa batimétrico del Golfo Almirante Montt (GAM) ubicado en la Región de Magallanes. Tomado de Pinilla *et al.* (2023).

Los aportes de agua dulce provienen de una red de ríos, destacándose el Río Serrano. Este río forma un sistema que incluye lagos proglaciares que nutren numerosos cursos de agua. Estos, a su vez, desembocan en el Fiordo Última Esperanza desde donde el agua estuarina fluye hacia el GAM y finalmente al Océano Pacífico, a través de varios canales interconectados como Kirke, Santa María y Unión.

El GAM es considerado una microcuenca aislada que restringe el flujo de aguas profundas desde el océano Pacífico, característica que podría explicar su bajo nivel de oxígeno disuelto en la subcuenca oeste. De hecho, esta subcuenca solo recibe la influencia de masas de agua oceánicas subsuperficiales como el Agua Subantártica Modificada y el Agua Estuarina Salina (Silva & Vargas, 2014). En las aguas profundas de la zona noroeste del GAM, Silva & Vargas (2014) han reportado baja concentración de oxígeno disuelto en primavera ( $<0,5 \text{ mL L}^{-1}$ ), lo cual favorecería la preservación de la MO sedimentaria (Killops & Killops, 2004b) y, por ende, los biomarcadores orgánicos que contiene (e.g., Hudson *et al.*, 2001). Valores similares también se midieron a  $>170 \text{ m}$  de profundidad durante una campaña del Centro COPAS en otoño 2022. Sin embargo, durante el crucero chileno-alemán SONNE SO296-2 en febrero 2023, no se encontraron condiciones hipóxicas. Por lo tanto, parece ser que la condición hipóxica del agua de fondo no es una condición permanente.

En el contexto histórico, el año 1878 marcó el inicio de la expansión de la colonización y el comienzo de la explotación ganadera en la Región de Magallanes (Martinic, 2006). Posteriormente, durante la expansión colonizadora de la región de Última Esperanza, entre el periodo 1906–1920, los colonizadores utilizaron el fuego para despejar el territorio con fines ganaderos (Martinic, 1985). Durante el proceso colonizador y post-colonizador en la región, surgieron varios núcleos poblados que, en su evolución, fundaron centros locales de servicios. La primera ciudad fundada fue Punta Arenas en 1848, seguida por Porvenir en el año 1894, Puerto Prat en 1898, Río Seco en 1906 y finalmente en 1911 Puerto Natales. Esta ciudad se

transformó en un importante centro económico y social de la región, y entre 1958 y 1960 evolucionó hacia una comunidad rural con fincas y terrenos agrícolas, lo que generó un notable incremento poblacional (Martinic, 1985; 2006). Recientemente, la salmonicultura pasó a ser una actividad relevante en el GAM, con 39 concesiones otorgadas y alrededor de 10 solicitudes en proceso (Artal *et al.*, 2023). A su vez, el GAM es un área de conservación de especies marinas, como el elefante marino del sur y el delfín chileno (según el decreto 6 que crea el Parque Nacional "Kawésqar" y la Reserva Nacional "Kawésqar" <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1128360>).

## 1.2 Carbono orgánico, su razón isotópica y biomarcadores

La materia orgánica sedimentaria proporciona una variedad de indicadores, o *proxies*, que pueden usarse para reconstruir registros paleoambientales tanto marinos como continentales. La producción de MO y su preservación se ven afectadas por cambios ambientales. Solo una pequeña fracción de la MO acuática inicial sobrevive a la destrucción y alteración durante el transporte hacia el fondo y la sedimentación (Meyers, 1994). Los tipos de información proporcionados por el contenido de MO de los sedimentos son diversos. Por ejemplo, la productividad biológica del pasado puede inferirse a partir de las tasas de acumulación de masa de carbono orgánico ( $C_{org}$ ), al igual que las condiciones paleoceanográficas y/o paleolimnológicas que influyeron en la preservación de la MO (Meyers, 1997).

La razón isotópica de carbono ( $^{13}C/^{12}C$ ) es útil para distinguir entre fuentes vegetales marinas y continentales de MO sedimentaria y para identificar materia orgánica de diferentes tipos de plantas terrestres. A pesar de la extensa diagénesis temprana, Meyers (1994) identifica la relación C/N y la razón  $^{13}C/^{12}C$  como *proxies* que parecen experimentar pocos cambios a lo largo del registro sedimentario. La composición isotópica de carbono de la materia orgánica ( $\delta^{13}C_{org}$ ) refleja principalmente la dinámica de la asimilación del carbono durante la fotosíntesis y las composiciones isotópicas de la fuente de carbono (e.g., Hayes, 1993). El  $\delta^{13}C_{org}$  se puede utilizar para estimar la abundancia relativa en el aporte terrígeno o acuático de la MO (fracción terrígena  $F_{terr}$  y fracción marina  $F_{mar}$ ).

Los biomarcadores orgánicos son compuestos que conservan características estructurales conformados por átomos de carbono e hidrógeno de manera tal que pueden ser asociadas con algún precursor (Killops & Killops, 2004a). Dentro de este conjunto de biomarcadores se encuentran los biomarcadores lipídicos, que pueden preservarse en el tiempo y ser asociados a taxones específicos e incluso ser utilizados como “fósiles moleculares” y, por lo tanto, revelar el posible origen de la MO (Cohen & Kodner, 2022).

Compuestos tales como *n*-alcanos, esteroides y Glicerol Dialquil Glicerol Tetraéteres (GDGTs), junto con el análisis de isótopos estables de carbono orgánico ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ), proporcionan información valiosa tanto sobre el origen de la MO como sobre las condiciones ambientales que prevalecían en el momento de su depositación (Meyers, 2003; Castañeda & Schouten, 2011). Cabe destacar que estudios anteriores han sugerido que el  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  medido en testigos de sedimentos de fiordos es uno de los indicadores más prometedores en la reconstrucción de cambios en el aporte de material continental hacia los fiordos (pi *et al.*, 2019).

Los *n*-alcanos han sido ampliamente utilizados para distinguir entre fuentes terrígenas y acuáticas (Meyers, 2003). En general, las cadenas cortas pares (*n*C12–*n*C22) se han asociado a un origen bacteriano (Grimalt & Albaigés, 1987), mientras que las impares de longitud similar (*n*C13–*n*C21) por algas marinas (Blumer *et al.*, 1971). Del mismo modo, las cadenas medias impares (*n*C23–*n*C25) han sido vinculadas con musgos (Baas *et al.*, 2000; Bingham *et al.*, 2010) y las cadenas largas (>C25) con plantas terrestres superiores (Eglinton & Calvin, 1967; Wang *et al.*, 2021). La distribución impar sobre par de *n*-alcanos de cadenas largas en los sedimentos proporciona un registro aproximado de los tipos de plantas que han poblado una cuenca hidrográfica (Meyers, 2003).

Por su parte, los esteroides son compuestos tetracíclicos, pertenecientes a un subgrupo de los esteroides que poseen un grupo hidroxilo (alcohol, -OH, con terminación en "ol") en la posición 3 del primer anillo. La estructura básica incluye tres anillos hexagonales y uno pentagonal, además de una cadena lateral alifática de ocho o más átomos de carbono unida a la posición 17 del último anillo. La

variabilidad en la estructura de los esteroides ha sido asociada a diferentes fuentes de la MO. Por ejemplo, el dinosterol ha sido señalado como indicador de dinoflagelados, mientras que el  $\beta$ -sitosterol ha sido asociado de manera amplia a plantas vasculares (Meyers, 1997; Volkman, 2003) (Fig. 3).

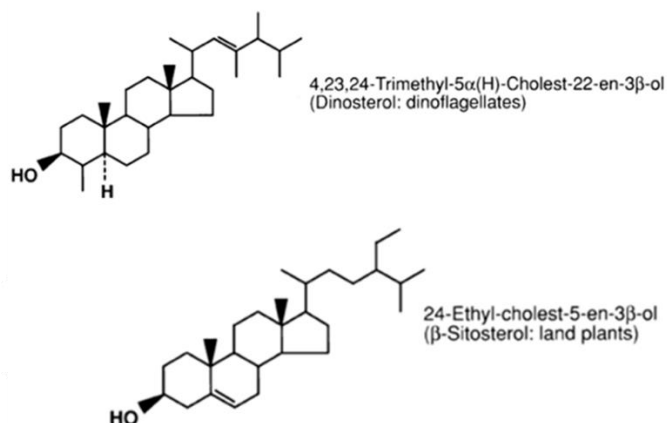


Fig. 3. Estructura molecular del Dinosterol y  $\beta$ -sitosterol. Modificado de Meyers (1997).

Los GDGTs son compuestos lipídicos que se encuentran en la de membrana de arqueas y bacterias (Schouten *et al.*, 2013). Estos se dividen en dos grupos: i) los isoprenoides (isoGDGTs), que es el más abundante en ambientes acuáticos y generalmente atribuidos a la producción de las Thaumarchaeota, un grupo genético específico del dominio de las arqueas (Xiao *et al.*, 2007; Schouten *et al.*, 2009). Los isoGDGTs funcionan como biomarcadores importantes para las poblaciones y actividades comunitarias de arqueas en ambientes marinos (Hopmans *et al.*, 2004; Ta *et al.*, 2019). ii) Los ramificados (brGDGTs) que derivan de organismos que habitan en ambientes terrestres y se proponen como biomarcadores de bacterias del suelo (Hopmans *et al.*, 2004). Por lo tanto, la proporción de brGDGT con respecto a isoGDGT crenarqueol en sedimentos marinos se puede utilizar para rastrear los aportes de MO terrígena hacia el margen continental o hacia un fiordo en particular. Sin embargo, existe evidencia que también pueden ser generados dentro de sistemas acuáticos (*e.g.*, Zhang *et al.*, 2024), dificultando su uso global como biomarcadores terrígenos.

## **HIPÓTESIS DE TRABAJO**

La contribución de materia orgánica de origen terrígeno hacia el Golfo Almirante Montt ha aumentado en las últimas décadas en respuesta a cambios climáticos tales como la precipitación y la temperatura en la Patagonia chilena.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Reconstruir los cambios temporales en el aporte de materia orgánica de origen terrestre hacia el Golfo Almirante Montt durante los últimos ~130 años, en relación con las variaciones climáticas de la Región de Magallanes.

### **2.2 Objetivos específicos**

- i. Identificar y cuantificar biomarcadores lipídicos indicadores de aporte terrígeno: *n*-alcanos; esteroides; Glicerol Dialquil Glicerol Tetraéteres ramificados (brGDGTs).
- ii. Evaluar el aporte de *n*-alcanos, esteroides ( $\beta$ -sitosterol,  $\beta$ -sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol) y la señal isotópica del carbono orgánico hacia el golfo como estimadores del origen terrígeno de la materia orgánica.
- iii. Analizar los GDGTs (isoprenoides y ramificados) para construir índices relacionados al aporte terrígeno.
- iv. Recopilar información climática sobre la Región de Magallanes.
- v. Integrar la información de biomarcadores lipídicos con los datos climatológicos.
- vi. Comparar los resultados del GAM con otros fiordos patagónicos.

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta tesis se busca no solo identificar y cuantificar biomarcadores lipídicos, como los *n*-alcanos y esteroides, y evaluar su uso como indicadores del aporte terrígeno, sino también evaluar y comparar con la fracción terrígena derivada del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  del sedimento que ingresa al golfo. Además, se determinó la composición porcentual de GDGTs para construir el índice BIT y la razón brGDGT IIIa/IIa como indicadores claves en la estimación del aporte terrígeno.

#### 3.1 Testigos de sedimento

Se trabajó con muestras de sedimento provenientes de dos testigos obtenidos en la subcuenca noroeste del Golfo Almirante Montt, en la Región de Magallanes, Chile (Fig. 4).

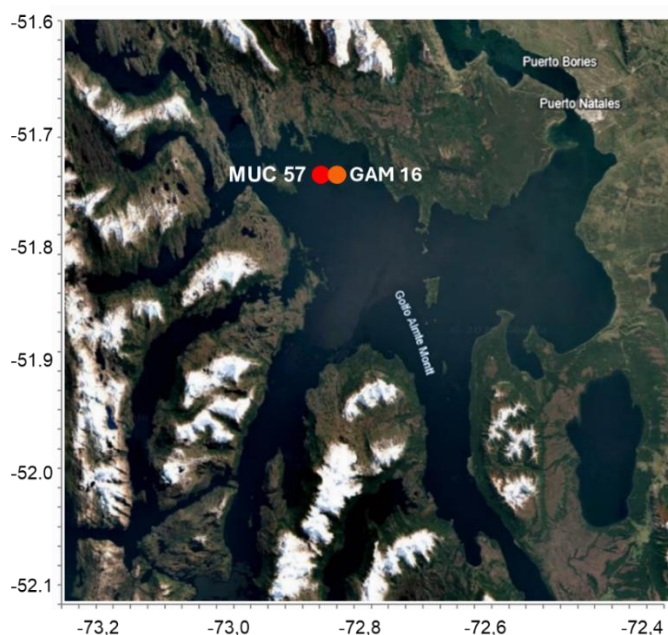


Fig. 4. Mapa del Golfo Almirante Montt (GAM), indicando las estaciones de muestreo MUC 57 (Crucero SO296-2) y GAM 16 (Crucero COPAS 2022).

El primer testigo, COPAS-GAM 16 fue recolectado en mayo de 2022, durante la expedición del Centro COPAS a bordo de L/C Sur-Austral, mediante el uso de un Rumhor corer. El segundo testigo, denominado MUC 57, fue obtenido en febrero del

año 2023, durante la expedición chilena-alemana SO296-2, a bordo del buque científico alemán F/S SONNE utilizando un Multicorer “MC-800” (Tabla 1).

Tabla 1. Información de los testigos de sedimentos, incluyendo nombre del testigo, crucero asociado, ubicación geográfica, profundidad, largo del testigo y equipo de extracción.

<b>Crucero/ Testigo</b>	Centro COPAS 2022/ GAM 16	SO296-2 2023/ MUC 57
<b>Latitud/ Longitud</b>	51°44'55" S; 72°50'27" O	51°47'57" S; 72°50'25" O
<b>Profundidad (m)</b>	182	179
<b>Largo del Testigo (cm)</b>	81	31
<b>Equipo de extracción</b>	Rumohr corer	Multicorer

Ambos testigos de sedimento fueron submuestreados cada 1 cm. El submuestreo del testigo COPAS-GAM 16 se realizó en el laboratorio temporal de la campaña en Puerto Natales mientras que el testigo MUC 57 fue submuestreado a bordo del buque F/S SONNE. Todas las muestras fueron liofilizadas en el Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción.

### 3.2 Biomarcadores lipídicos

- **Identificación y cuantificación de biomarcadores lipídicos (*n*-alcanos, esteroides, GDGTs).**

A partir del sedimento liofilizado, se realizó la extracción de lípidos totales (*TLE* por sus siglas en inglés) siguiendo el protocolo de Bligh & Dyer (1959). Se pesaron ~2g de sedimento a los cuales se les agregaron los siguientes estándares de recuperación: Squalano (10 ppm), 14-heptacosanona (10 ppm), 1-nonadecanol (10 ppm), ácido 2 metil octadecanoico (1 ppm). Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Paleoceanografía de la Universidad de Concepción.

Al *TLE* obtenido, se le realizó la separación de compuestos por cromatografía de fase sólida utilizando columnas de sílica gel activada y solventes de polaridad creciente, obteniéndose 5 fracciones que corresponden a: F1 (*n*-alcanos), F2 (hidrocarburos aromáticos), F3 (Cetonas), F4 (Alcoholes, esteroides), F5 (Dioles, GDGTs) (Fig. 5).

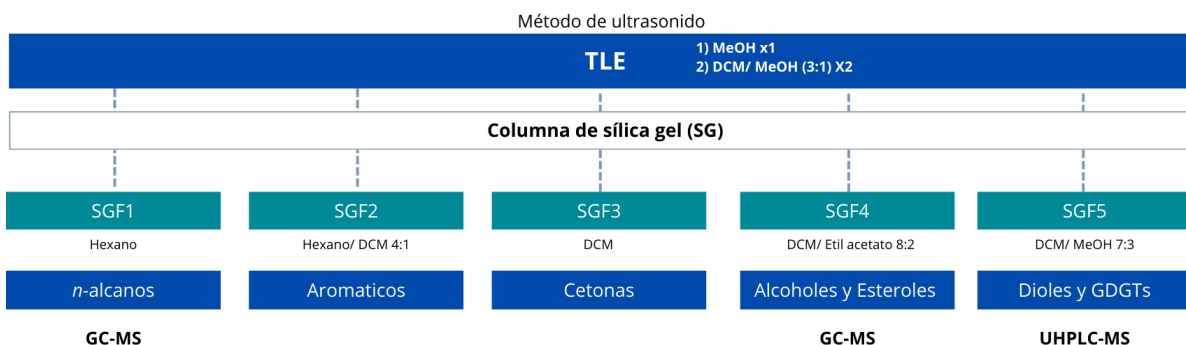


Fig. 5. Esquema de extracción de lípidos totales (TLE) y fraccionamiento por columna de sílica gel (SG). De las fracciones obtenidas (F1, F2, F3, F4, F5) fueron analizadas F1 y F4 mediante cromatografía de gas acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) y F5 con cromatografía líquida de alta presión acoplada a espectrometría de masas (UHPLC-MS). Diclorometano (DCM); Metanol (MeOH).

La identificación y cuantificación de *n*-alcanos y esteroides (F1 y F4, respectivamente) se llevó a cabo utilizando cromatografía de gas acoplada a espectrometría de masas (GC-MS, por sus siglas en inglés). Este análisis se realizó en el Laboratorio de Geoquímica Orgánica Marina de la Universidad de Concepción.

Para la identificación y cuantificación de GDGTs (F5) se utilizó cromatografía líquida de alta presión acoplada a espectrometría de masas (UHPLC-MS, por sus siglas en inglés). Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Las mediciones de los biomarcadores lipídicos mencionados se realizaron en todo el testigo MUC 57 mientras que para el GAM 16, los *n*-alcanos y esteroides se midieron a partir de los 10 cm de profundidad en el sedimento y los GDGTs a partir de los 25 cm hasta la base del testigo.

- **Cálculos de Índices basados en los biomarcadores lipídicos**

Se calcularon cinco índices a partir de las muestras de sedimento. Dos de estos índices se derivan de los *n*-alcanos (CPI y ACL), mientras que el tercero (BIT) y la razón brGDGT IIIa/IIa se calcularon a partir de los GDGTs. El quinto índice ( $F_{terr}$ )

deriva del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ . En la Tabla A1 del Anexo se presentan las definiciones de cada índice, con el fin de resumir su aplicación en la interpretación de los resultados.

- (1) **Índice de preferencia de carbono** (*CPI*, por sus siglas en inglés), es una aproximación del origen de los *n*-alcanos en el sedimento y se representa como la contribución de *n*-alcanos de cadena larga de números impares con respecto a los *n*-alcanos pares (Kaiser *et al.*, 2008). Se calculó siguiendo la fórmula publicada en Pearson y Eglinton (2000):

$$CPI = \frac{\sum(C25 - C33)}{\sum(C24 - C32)}$$

Donde valores >5 son indicativos de *n*-alcanos derivados de plantas superiores (Eglinton y Hamilton, 1963), mientras que los valores 1,0–1,2 son de plancton marino y <1 de origen petrogénico (Corner, 1979; Pendoley, 1992). A su vez, se utiliza a menudo como medida de madurez cuando hay *n*-alcanos C25–C33 de ceras vegetales superiores (Bray y Evans, 1961). Valores CPI >3 se considera material recientemente depositado (inmaduro) y valores menores del CPI reflejan mayor madurez (Killops & Killops, 2004b).

- (2) **Longitud media de la cadena** (*ACL*, por sus siglas en inglés) está basado en el promedio ponderado por el peso del número de átomos de carbono de *n*-alcanos de plantas superiores reflejando principalmente el tipo de vegetación. Se calculó siguiendo la fórmula publicada en Jeng (2006):

$$ACL = \frac{([25 \times C25] + [27 \times C27] \dots [33 \times C33])}{(C25 + C27 \dots C33)}$$

- (3) **Índice Tetraéter ramificado e isoprenoide** (*BIT*, por sus siglas en inglés), refleja la fuente de materia orgánica y; se basa en la abundancia relativa de brGDGTs y crenarqueol. Se calculó según Hopmans *et al.* (2004):

$$BIT = \frac{(GDGT I + GDGT II + GDGT III)}{(Crenarqueol) + (GDGT I + GDGT II + GDGT III)}$$

Este índice varía entre 0 y 1 donde valores < 0,3 son indicadores de MO marina y >0,7 provienen de suelos (Hopmans *et al.*, 2004).

(4) **Razón IIIa/IIa** basado en brGDGT, tal como lo definió Xiao *et al.* (2016), representa la proporción de abundancia de brGDGTs hexametilados a pentametilados, donde los isómeros 5-metilo y 6-metilo se combinan como un solo compuesto:

$$\frac{IIIa}{IIa} = \frac{brGDGT\ IIIa + IIIa'}{brGDGT\ IIa + IIa'}$$

Donde valores >0,92 representan MO marina y menores <0,59 son características de suelos (Xiao *et al.*, 2016).

#### (5) **Fracción terrígena**

Se utilizó el  $\delta^{13}C_{org}$  de las muestras de sedimento para estimar las contribuciones relativas del carbono orgánico terrestre y acuático (Meyers, 1997). La fracción terrígena (%F<sub>terr</sub>) se basó en los valores de *end members* de González *et al.* (2016): -17,12‰ para el miembro terminal marino y -27,72‰ para el miembro terminal terrestre. Se cálculo de acuerdo con Thornton & McManus (1994):

$$F_{terr} (\%) = \frac{(\delta^{13}C_{org\ sample} - \delta^{13}C_{org\ marine})}{(\delta^{13}C_{org\ terr} - \delta^{13}C_{org\ marine})} \times 100$$

### 3.3 **Análisis estadísticos**

Una vez obtenidos todos los resultados, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro *et al.*, 1986) para evaluar la normalidad de los datos. Se consideran diferencias significativas quienes obtengan un valor  $p < 0.05$  del análisis de ANOVA en caso de tener variables con distribución normal y Kruskal-Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) en caso de no obtener normalidad en los datos. Este último se utilizó para visualizar las relaciones entre las variables estudiadas y sus cambios temporales. Adicionalmente, se procedió a correlacionar el aporte de MO de origen terrígeno con las variables climatológicas estudiadas, a través del coeficiente de correlación de Pearson que es una medida que cuantifica la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativa.

### 3.4 Datos disponibles para esta tesis

Las mediciones del contenido de carbono orgánico total ( $C_{org}$ ) en ambos testigos, se realizaron mediante el uso de cromatografía de gas y espectrometría de masas con relación isotópica (IRMS) en el Laboratorio de Biogeoquímica e Isótopos Estables Aplicados (LABASI) de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Los valores de  $\delta^{13}C_{org}$  se expresan como ‰ relativos al estándar Pee Dee Belemnite (PDB). Dichos datos se han puesto a disposición para este seminario.

Por otra parte, los modelos de edad de ambos testigos se realizaron en el Instituto IOW (Instituto Leibniz de Investigación del Mar Báltico (IOW), Warnemünde, Alemania), basados en mediciones de actividad de  $^{210}Pb$ ,  $^{137}Cs$  y  $^{241}Am$ , aplicándose el paquete Rplum (<https://cran.r-project.org/web/packages/rplum/vignettes/rplum.html>). Rplum produce modelos bayesianos de edad-profundidad a partir de testigos de sedimento datados con  $^{210}Pb$  (Aquino-López *et al.*, 2018). Los modelos de edad de los testigos MUC 57 y GAM 16 se consideran definitivos hasta los 33 cm arrojando tasas de sedimentación 0,26 cm/año y 0,24 cm/año, respectivamente. Las edades correspondientes a cada centímetro de sedimento muestreado se encuentran en la Tabla A2 del Anexo, que incluyen la profundidad de muestreo y profundidad compuesta de ambos testigos generada a través del inicio de la detección del  $^{137}Cs$  en el año 1954 (comunicación personal Matthias Moros, IOW). Cabe destacar que a través de las mediciones de XRF (por sus siglas en inglés; Fluorescencia de Rayos X) llevadas a cabo en el instituto IOW (ITRAX scanner, Cox Analytical Systems) y en el centro EULA de la Universidad de Concepción (Avaatech XRF Core Scanner), se ha podido registrar una pérdida de los 5 cm superficiales en el testigo GAM 16 (superficie corresponde al año 2017; Tabla A2). En la sección de discusión se presentan los registros en edades CE (*Common Era*, por sus siglas en inglés) hasta los 31 cm (= 1907 CE  $\pm$  37 años), pudiendo así compararlos con otros registros de la zona.

A su vez, se recopilieron datos climatológicos de la zona que se presentan en la sección de resultados. Estos provienen de <https://camels.cr2.cl/> desde donde se han utilizado las series de tiempo de las cuencas de los ríos Serrano, Prat y

Hollemborg (Tabla 2; Fig. 6) para obtener los datos de precipitación (mm), temperatura (°C), escorrentía (mm) y caudal de los ríos (m<sup>3</sup>/s).

Todos los datos geoquímicos de este seminario se encuentran en la Tabla A3 del Anexo.

Tabla 2. Datos recopilados de las cuencas de los ríos Serrano, Prat y Hollemborg, incluyendo área de cada cuenca, su ubicación geográfica y la extensión de las series de tiempo de la precipitación (mm), temperatura (°C), escorrentía (mm) y caudal (m<sup>3</sup>/s).

Cuenca	Área	Latitud/ Longitud
Río Serrano	85746 km <sup>2</sup>	-51.33°S, -73.11°O
<b>Serie de tiempo</b>		
Temperatura °C	Enero 1979 a abril 2020	
Precipitación (mm)	Enero 1979 a abril 2020	
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Diciembre 1994 a julio 2019	
Escorrentía (mm)	Diciembre 1994 a junio 2020	
Cuenca	Área	Latitud/ Longitud
Río Prat	220 km <sup>2</sup>	-51.56°S, -72.73°O
<b>Serie de tiempo</b>		
Temperatura °C	Enero 1979 a abril 2020	
Precipitación (mm)	Enero 1979 a abril 2020	
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Abril 2005 a marzo 2018	
Escorrentía (mm)	Enero 2005 a marzo 2018	
Cuenca	Área	Latitud/ Longitud
Río Hollemborg	1236 km <sup>2</sup>	-51.91°S, -72.42°O
<b>Serie de tiempo</b>		
Temperatura °C	Enero 1979 a abril 2020	
Precipitación (mm)	Enero 1979 a abril 2020	
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Enero 2007 a junio 2020	
Escorrentía (mm)	Enero 2007 a junio 2020	

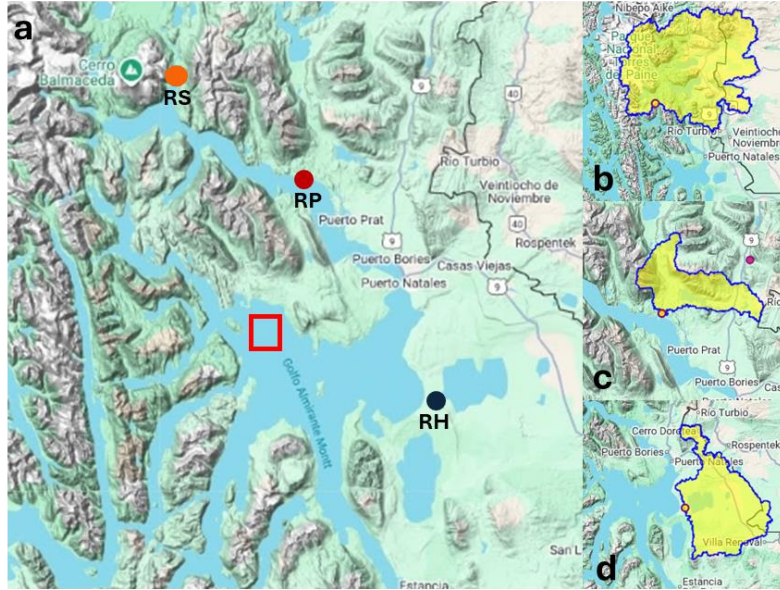


Fig. 6. (a) Mapa del Golfo Almirante Montt (GAM) indicando las cuencas de los ríos: RS: Río Serrano (punto naranja), RP: Río Prat (punto rojo), RH: Río Holleberg (punto negro). En amarillo se delimitan las áreas de las cuencas de: (b) Río Serrano (Cod: 1228900); (c) Río Prat (Cod: 12291001); (d) Río Holleberg (Cod: 1240004). Dentro de cada área, el punto amarillo oscuro representa la estación de mediciones en cada una de las cuencas hacia el GAM a través de los ríos mencionados. El recuadro rojo indica la posición de los testigos de sedimento estudiados. Tomado de <https://camels.cr2.cl/>

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Climatología del área del Golfo Almirante Montt

El clima del GAM presenta una marcada estacionalidad, observada a partir de los registros meteorológicos y fluviométricos de las cuencas de los ríos Serrano, Prat y Holleberg. Las temperaturas del aire más altas se registran durante el verano (diciembre-febrero; 8,7–11,0°C) y las mínimas durante el periodo de invierno (junio-agosto; -0,5–2,5°C) (Fig. 7a). Las precipitaciones en dichas cuencas son más altas desde noviembre a abril (80,3–105,2 mm/mes) (Fig. 7b).

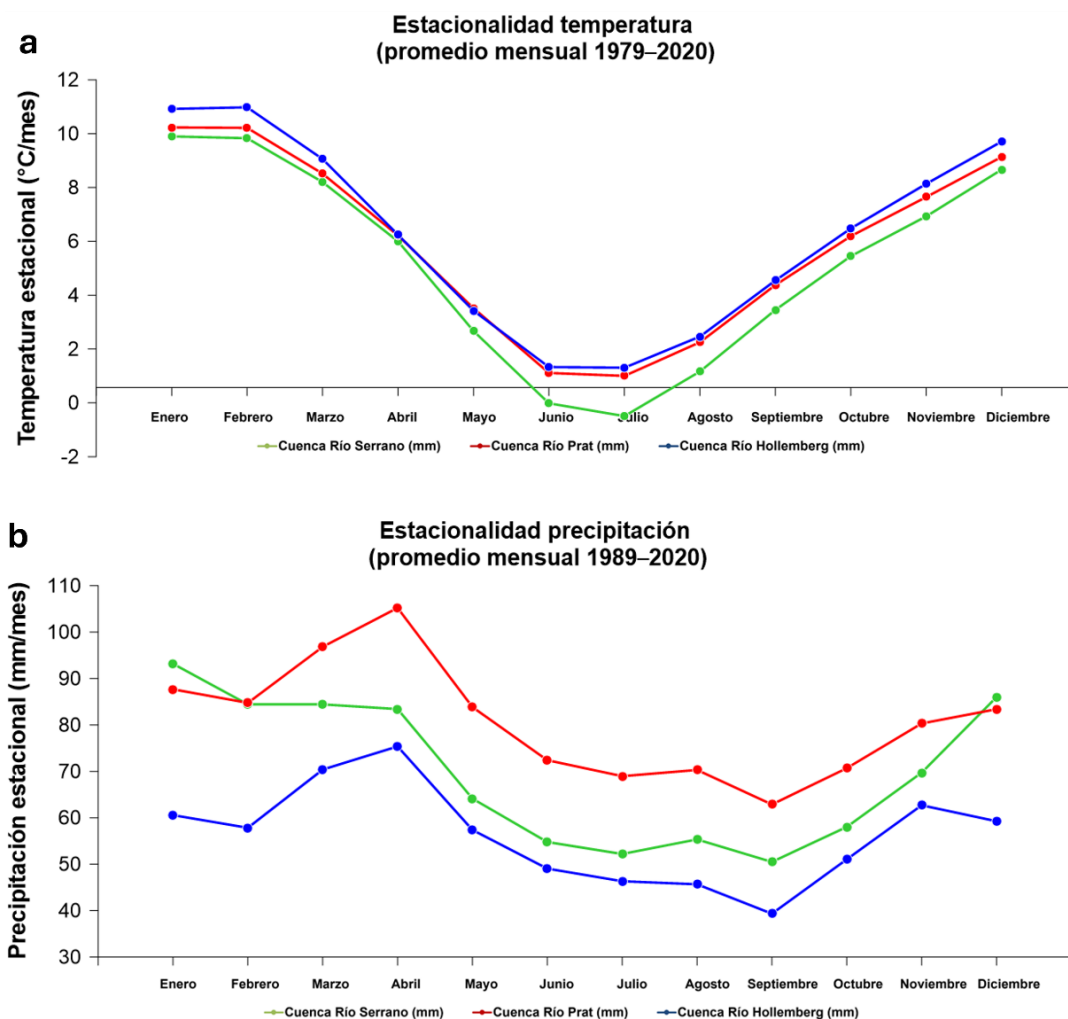


Fig. 7. Climatología de temperatura (a) y precipitación (b) mensual de las cuencas.

El caudal del Río Serrano representa la mayor parte del caudal total que ingresa a GAM (Pinilla *et al.*, 2023), con una estacionalidad que muestra máximos en verano y primavera, y mínimos en invierno (Fig. 8).

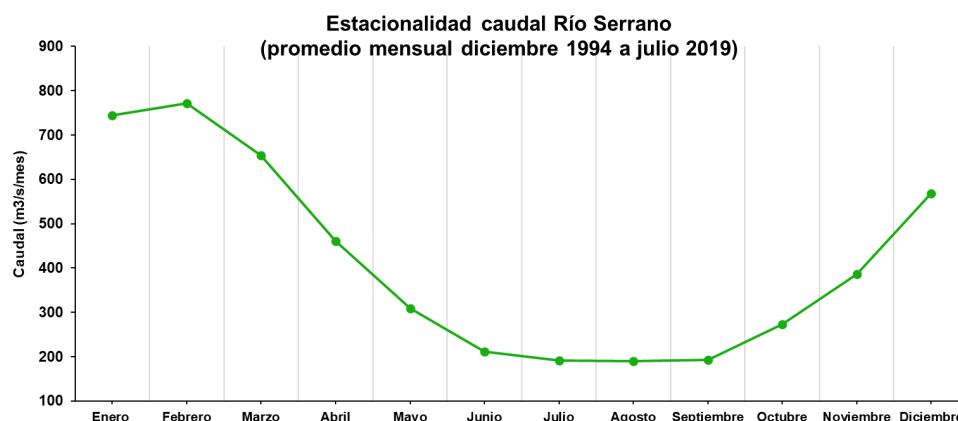


Fig. 8. Climatología del caudal del Río Serrano 1994–2019.

Los cambios temporales en la temperatura del aire durante los últimos 40 años muestran gran variabilidad interanual (Fig. 9a). Por ejemplo, años cálidos ocurrieron durante 1983, 2004, 2013 y 2016–2019, mientras que los años más fríos corresponden a 1984, 1986, 1991–1992, 1997–1998, 2000–2002, 2009–2010. En conjunto, los promedios anuales de temperatura evidenciaron un aumento sostenido hacia la actualidad (Fig. 9a).

A su vez, la precipitación promedio anual en las cuencas de los ríos Serrano, Prat y Holleberg, también presentan una gran variabilidad interanual (Fig. 9b). Por ejemplo, años secos ocurrieron durante 1982, 1984, 1992, 1994–1995, 1997, 1999–2000, 2002, 2004–2005, 2016, mientras que los años más húmedos corresponden a 1980–1981, 1985–1987, 1990, 1998, 2003, 2006–2007, 2009–2010, 2012–2015, 2017–2019. En conjunto, se observó un incremento progresivo de las precipitaciones hacia la actualidad (Fig. 9b). Dentro de esta tendencia al incremento, se destaca una reversión en el año 2016, caracterizado

por condiciones excepcionalmente secas, correspondiente a la megasequía reportada para zona centro-sur de Chile.

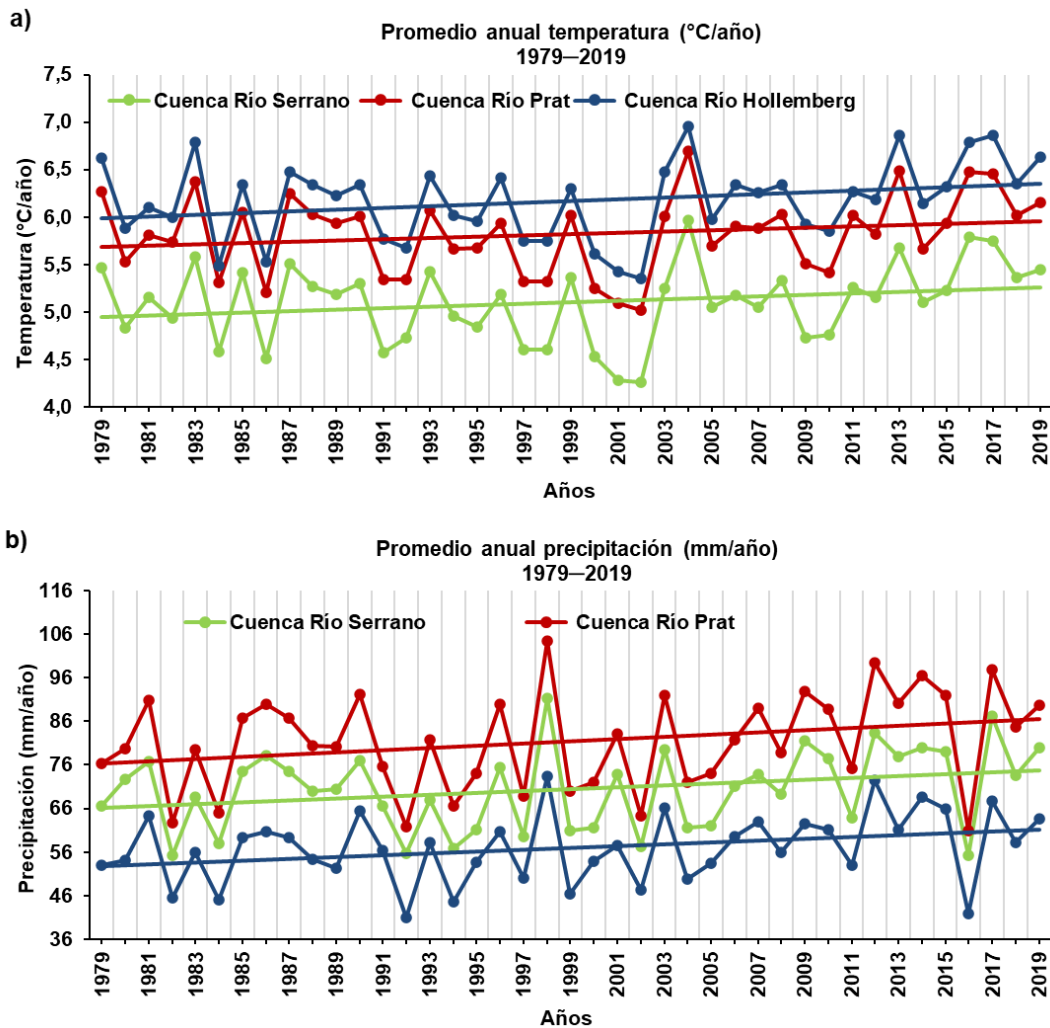


Fig. 9. (a) Promedio de temperatura y precipitación anuales (b) (1979–2019) en las cuencas de los ríos Serrano (verde), Prat (rojo) y Holleberg (azul), con sus respectivas líneas de tendencia.

Para evaluar los cambios temporales del aporte fluvial hacia la GAM, se utilizaron las series continuas de escorrentía y caudal del Río Serrano (1994–2019), que representa la cuenca con mayor disponibilidad de datos. El promedio anual del caudal muestra, además de una marcada variabilidad interanual con máximos en los años 1998, 2008 y 2017, una tendencia general al aumento en los últimos 25 años (Fig. 10).

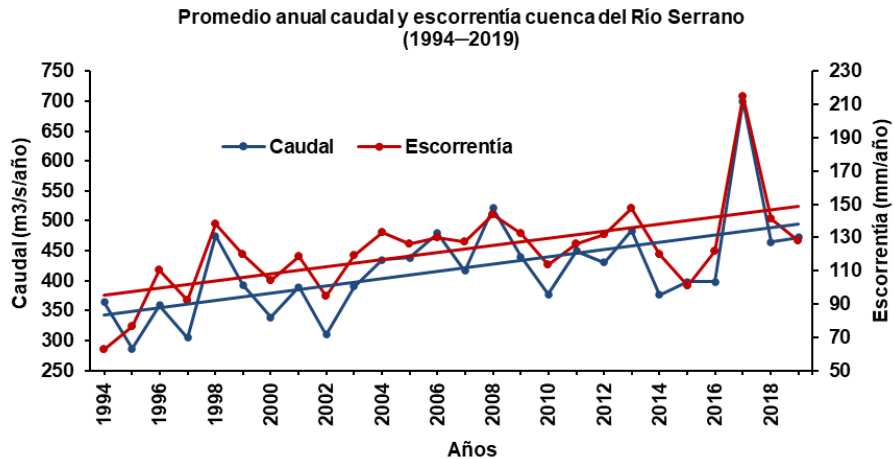


Fig. 10. Serie de tiempo (1994–2019) del promedio anual del caudal del Río Serrano y escoorrentía en su cuenca (ver Fig. 6).

## 4.2 Propiedades geoquímicas

- %C<sub>org</sub>,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$

La distribución de los valores de %C<sub>org</sub> en los testigos MUC 57 y GAM 16 muestra una tendencia creciente hacia la superficie desde 14–15 cm, que según el modelo de edad corresponde al año ~ 1983 CE (Tabla A2). Los valores son relativamente similares en ambos testigos variando entre 2,1 % y 4,3% en el MUC 57, mientras que en el testigo GAM 16 fluctúan entre 1,6 % y 3,7% (Fig.11).

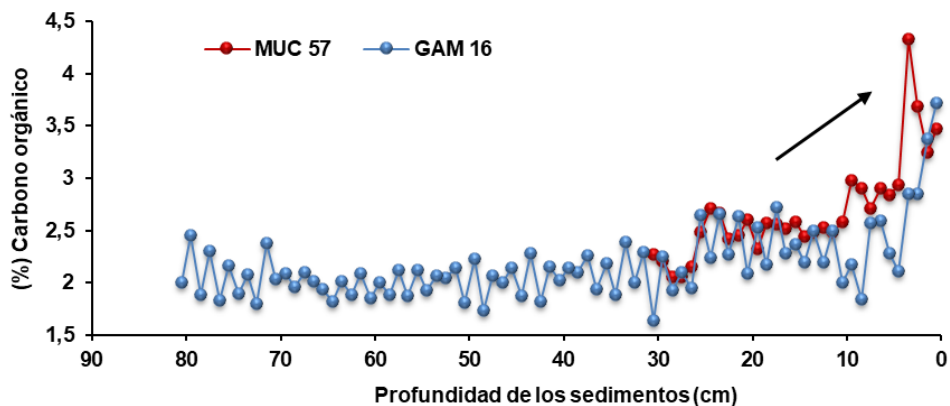


Fig. 11. Porcentaje carbono orgánico (%) de los testigos MUC 57 y GAM 16 en relación con la profundidad.

Por otra parte, el  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Org}}$  de ambos testigos varía entre  $-21,9\text{‰}$  y  $-24,9\text{‰}$ , mostrando una tendencia hacia valores más negativos a partir del estrato 14–15 cm hacia la superficie (Fig. 12a), coincidiendo con el cambio en la abundancia relativa del  $\text{C}_{\text{Org}}$  mencionado anteriormente (año  $\sim 1983$  CE; Tabla A2). La fracción terrígena ( $F_{\text{terr}}$ ) muestra la misma tendencia. Los valores son relativamente similares entre testigos variando entre  $45,3\%$  y  $73,5\%$  en el MUC 57, mientras que en el testigo GAM 16 fluctúan entre  $39,3\%$  y  $64,8\%$  (Fig. 12b).

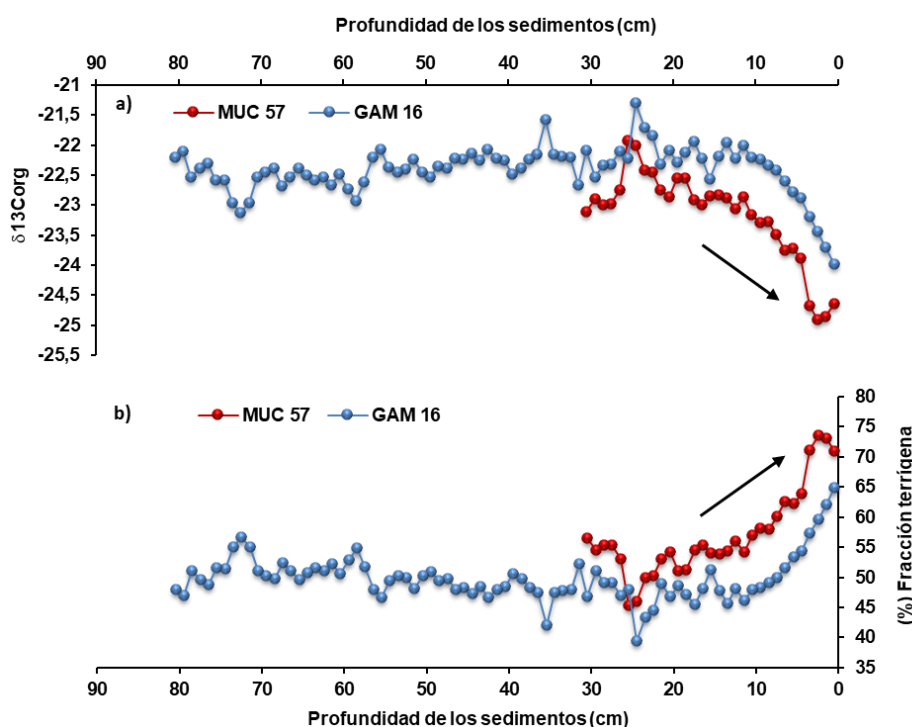


Fig. 12.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{Org}}$  (a) y fracción terrígena (b) en los testigos MUC 57 y GAM 16.

- ***n*-alcanos**

Las concentraciones de *n*-alcanos totales ( $n\text{C}15$ – $n\text{C}35$ ) estandarizados por carbono orgánico total varían entre  $29,3$  y  $90,6 \mu\text{g/g TOC}$  en el MUC 57 ( $\bar{x} = 59,3 \mu\text{g/g TOC}$ ) y entre  $51,9$  y  $277,2 \mu\text{g/g TOC}$  ( $\bar{x} = 147,3 \mu\text{g/g TOC}$ ) en el GAM 16 (Tabla A3). La distribución de *n*-alcanos en estos testigos muestran una clara predominancia de *n*-alcanos de cadena impares ( $>60\%$ ) donde los *n*-alcanos de cadena larga C27, C29 y C31 asociados a plantas superiores terrestres representan  $>45\%$ .

En cuanto al índice CPI (Fig. 13a), predomina una alta variabilidad, siendo ésta mayor en el MUC 57 (1,0–5,3) que en el GAM 16 (1,6–4,7), probablemente relacionada a la profundidad de muestreo que abarca solamente 31 cm en el MUC 57 vs. 81 cm en el GAM 16. El CPI promedio es 3,01 y 2,66, respectivamente. El índice ACL en ambos testigos oscila alrededor de 29 variando levemente a lo largo de los testigos (MUC 57= 29,0–29,5 y GAM 16= 29,1–30,1) (Fig. 13b). La ausencia del *n*-alcano C33 solamente en la superficie del MUC 57 disminuye el valor del ACL a 28,4 (no incluido en la Fig. 13b).

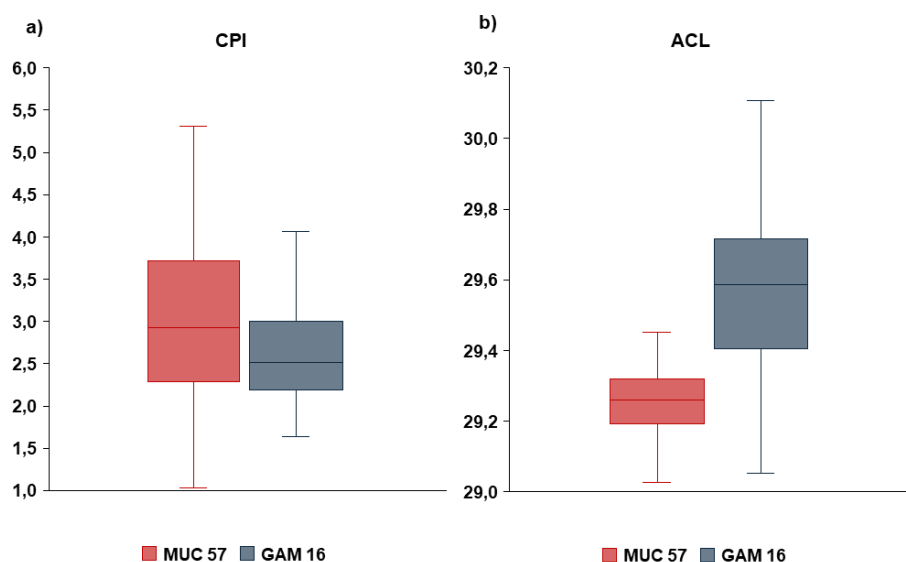


Fig. 13. Índice de CPI (a) y ACL (b) del testigo MUC 57 y GAM16.

- **Esteroles Terrígenos**

Los esteroles identificados en los testigos MUC 57 y GAM 16 se resumen en la Tabla A4 del Anexo. La concentración de los esteroles totales estandarizados por carbono orgánico presenta gran variabilidad con valores entre 178 y 3188  $\mu\text{g/g}$  TOC para el MUC 57 y entre 170 y 3422  $\mu\text{g/g}$  TOC para el GAM 16 (Fig. 14) (Tabla A3). Cabe destacar que el dinosterol, de origen marino, representa  $\geq 50\%$  del total de esteroles.

El porcentaje de esteroles de origen terrígeno,  $\beta$ -sitosterol,  $\beta$ -sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol (compuestos característicos de plantas vasculares terrestres), en ambos testigos representan 32% en el MUC 57 (Fig. 14a)

y 28% en el GAM 16 (Fig. 14b). En el testigo MUC 57 se evidencia un aumento sostenido de dichos esteroides a partir del estrato 7 cm equivalente al año ~2015 CE (Tabla A2).

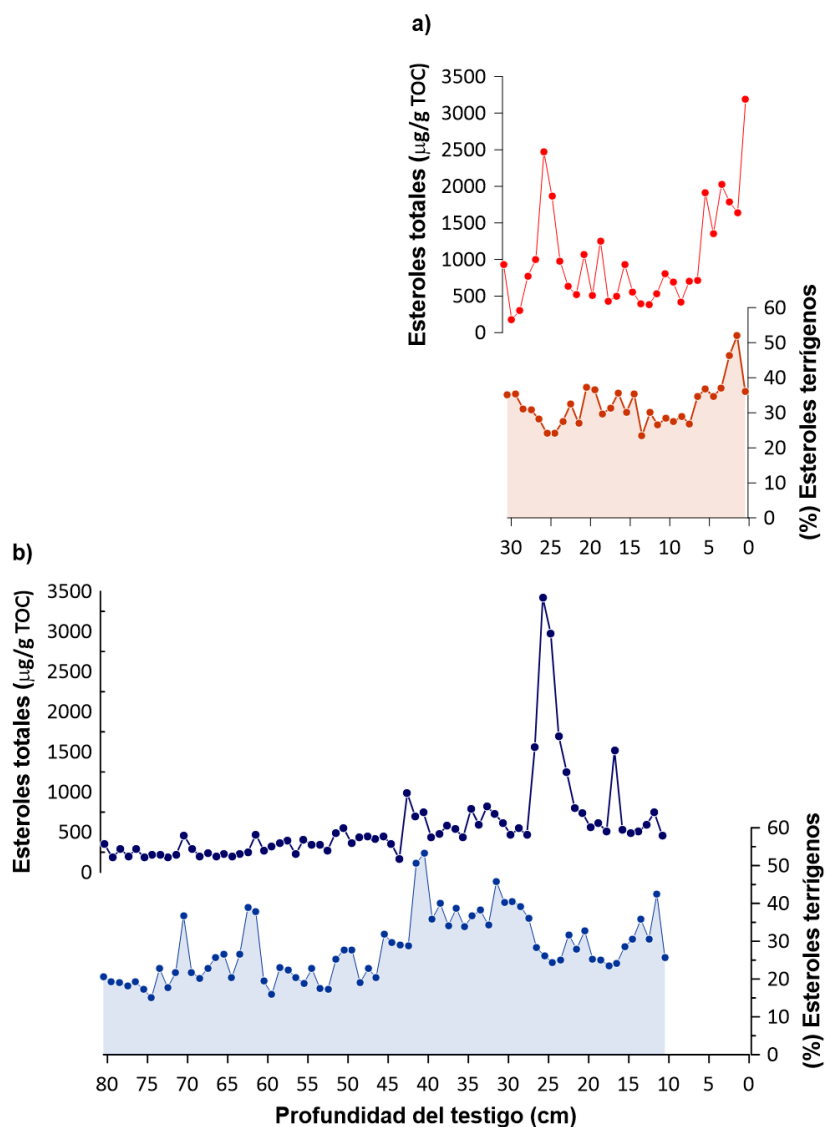


Fig.14. Esteroles totales ( $\mu\text{g/g TOC}$ ) y distribución porcentual de esteroides de origen terrígeno ( $\beta$ -sitosterol,  $\beta$ -sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol) del testigo MUC 57 (rojo, a) y GAM 16 (azul, b).

- **GDGTs como indicadores de aporte terrígeno al GAM**

El índice BIT (basado en la relación de brGDGT/isoGDGT) del testigo MUC 57 presentó valores entre 0,07 y 0,21, mientras que en el testigo GAM 16 varió entre

0,06 y 0,35. En cuanto a la razón brGDGT IIIa/IIa, los valores en el MUC 57 se encuentran entre 0,73–1,06 y en el GAM 16 entre 0,65–1,08.

La Fig. 15 representa la relación entre el índice BIT y la razón brGDGT IIIa/IIa donde se visualiza que la mayoría de las muestras de sedimento están compuestas por una mezcla de MO de diverso origen (marino y terrestre). Hay dos estratos subsuperficiales del testigo MUC 57 (5–7 cm, equivalente a ~2015–2017 CE) caracterizados por una composición predominantemente marina, mientras que el intervalo 45–47 cm del GAM 16 es predominantemente terrígeno (Fig. 15).

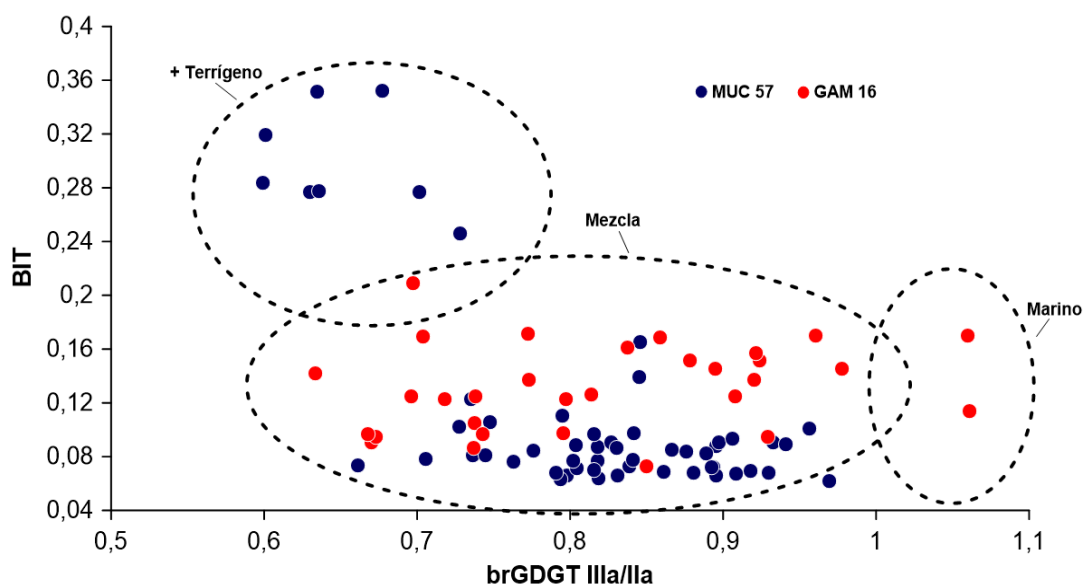


Fig. 15. Relación entre el índice BIT y la razón brGDGT IIIa/IIa de los testigos MUC 57 y GAM16. Se indica la fuente de materia orgánica en ambos testigos.

### 4.3 Análisis estadísticos

Los resultados de la prueba de Shapiro–Wilk para ambos testigos indican que no existe normalidad en los datos analizados, ya que ninguna de las variables evaluadas cumple con el supuesto de normalidad ( $p < 0,05$ ). En función de estos resultados, se determinó el uso de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis. Para ello se evaluaron posibles diferencias entre periodos sedimentarios anteriores y posteriores a fines del siglo XX en los testigos MUC 57 y GAM 16. El punto de

separación temporal se estableció en el año 1999, correspondiente a los estratos 12–13 en MUC 57 y 7–8 en GAM 16.

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis indican que una parte importante de las variables analizadas presenta diferencias estadísticamente significativas entre los periodos sedimentarios considerados, anterior y posterior a 1999 CE (Tabla 3). En el testigo MUC57, se observaron diferencias significativas en variables asociadas al contenido de  $C_{org}$ , al aporte terrígeno ( $F_{terr}$ ) y a ciertos biomarcadores lipídicos (e.g., esteroides, *n*-alcanos de cadena larga), mientras que otras variables no mostraron cambios significativos entre periodos (Tabla 3). Debido al submuestreo utilizado para las mediciones de biomarcadores en el testigo GAM16, la prueba de Kruskal-Wallis solamente se pudo llevar a cabo comparando  $C_{org}$ , y  $F_{terr}$  entre periodos. Se observaron diferencias significativas (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis estadísticos Kruskal-Wallis de los testigos MUC 57 y GAM 16.

<b>MUC 57</b>				
Kruskal-Wallis	Variable	H	<i>p</i> -value	Significativo
	Corg	16,45	5,00E-05	<b>Si</b>
	Fterr	18,48	1,72E-05	<b>Si</b>
	Sterols	0,03	8,71E-01	No
	SterolsC28	10,86	9,85E-04	<b>Si</b>
	SterolsC29	0,53	4,65E-01	No
	<i>n</i> -alcanos totales	4,62	3,16E-02	<b>Si</b>
	Cadena larga	10,01	1,56E-03	<b>Si</b>
	Cadena corta	3,18	7,44E-02	No
	CPI	0,42	5,16E-01	No
	ACL	2,50	1,14E-01	No
	BIT	0,59	4,41E-01	No
<b>GAM 16</b>				
Kruskal-Wallis	Variable	H	<i>p</i> -value	Significativo
	Corg	7,34	0,006749554	<b>Si</b>
	Fterr	16,51	4,84414E-05	<b>Si</b>

Con el objetivo de evaluar si el incremento del aporte terrígeno hacia el GAM en las últimas décadas está relacionado a algunos factores climáticos, se procedió a correlacionar %F<sub>terr</sub> con la anomalía de la temperatura regional del aire, anomalía de la precipitación regional y el índice SAM (*Southern Annular Mode*, por sus siglas en inglés) (Tabla 4). Se observó correlación positiva moderada entre las variables mencionadas (%F<sub>terr</sub> vs. anomalía precipitación= 0,395; %F<sub>terr</sub> vs. anomalía temperatura= 0,535), pero estas correlaciones no fueron estadísticamente significativas. Por otra parte, la correlación entre %F<sub>terr</sub> y el índice SAM fue débil y no significativa ( $p= 0.3417$ ) (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficiente de correlación de Pearson entre variables climáticas y aporte terrígeno al GAM.

Coeficiente de correlación Pearson	%F <sub>terr</sub> & temperatura regional del aire	%F <sub>terr</sub> & precipitación regional	%F <sub>terr</sub> & SAM
coef. corr.	0,5354	0,3953	0,2379
$p$ -value	0,08963	0,2289	0,3417

## 5 DISCUSIÓN

En esta sección se resumen los resultados más importantes de esta tesis durante el periodo ~1900–2022 CE (correspondiente a la columna sedimentaria 0–31 cm) en comparación con la climatología del área del GAM, para luego comparar los datos propios con otros registros de fiordos patagónicos.

Dentro de los resultados principales del estudio realizado se evidencia una estrecha relación entre la variabilidad climática reciente del GAM y los cambios en la composición y origen de la MO sedimentaria. La marcada estacionalidad climática del área (Figs. 7 y 8), junto con la alta variabilidad interanual en temperatura, precipitación y caudal (dominada principalmente por el aporte del río Serrano) (Figs. 9 y 10), se refleja en señales geoquímicas coherentes a lo largo de ambos registros sedimentarios.

Desde 2000–2005 CE hacia el presente se registra un incremento en los valores de %C<sub>org</sub> (Fig. 16a) compuesto predominantemente por material terrígeno (F<sub>terr</sub>) (Tabla 3; Fig. 16b), lo cual sugiere un fortalecimiento del aporte continental al GAM. Este incremento es consistente con valores de CPI < 3 relacionados a material vegetal más maduro (Kaiser *et al.*, 2008) (Fig. 16c) y mayores proporciones representativas de esteroides terrígenos (Fig. 16d). Por otro lado, el perfil de <sup>210</sup>Pb sugiere entrada de material más antiguo en el sector superficial-subsuperficial de ambos testigos (comunicación personal Matthias Moros, IOW).

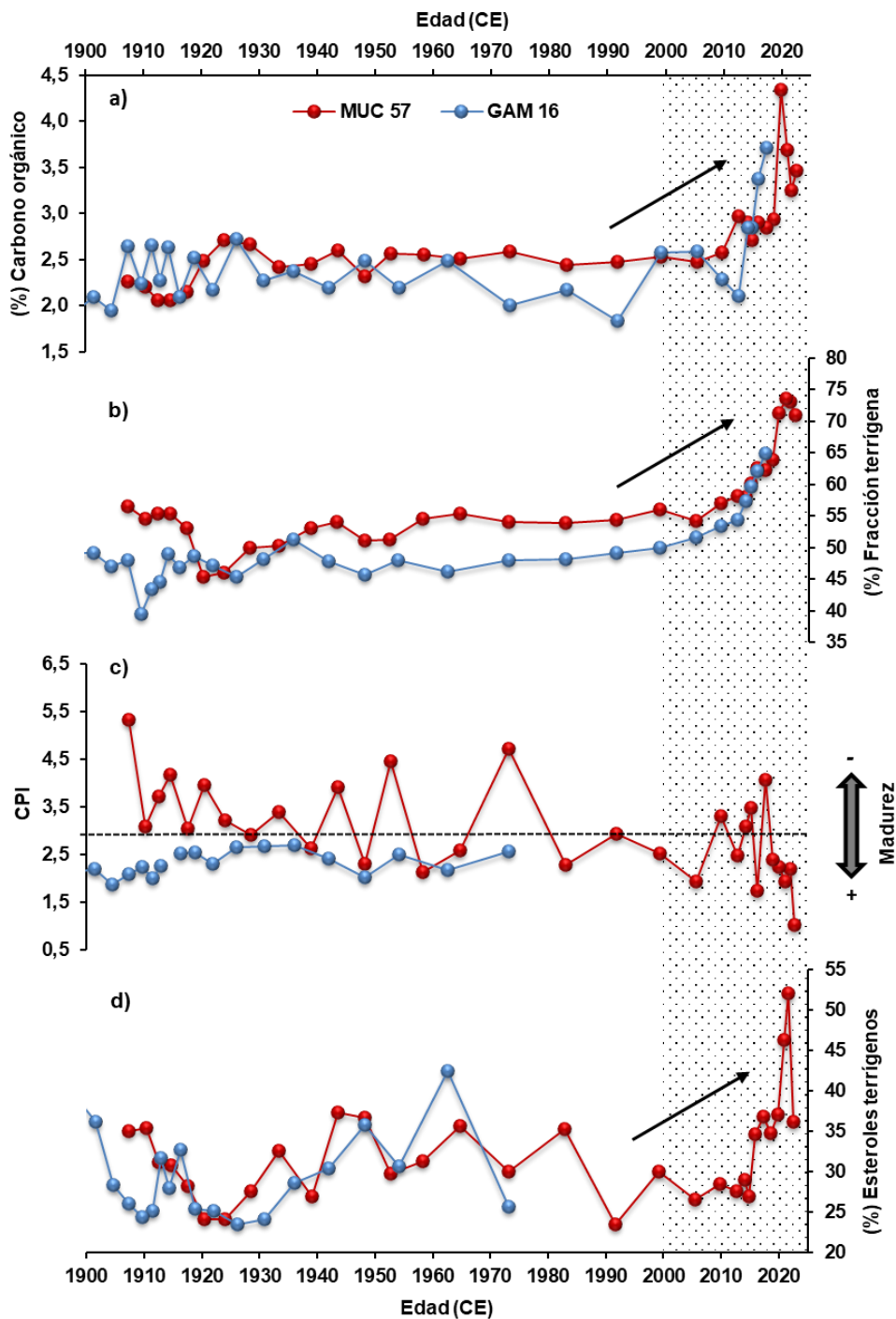


Fig. 16. *Proxies* medidos en los testigos MUC 57 y GAM 16 durante los últimos ~130 años. (a) Porcentaje de carbono orgánico; (b) Fracción terrígena ( $F_{terr}$ ) basada en  $\delta^{13}C_{org}$ ; (c) Índice preferencial de carbono (CPI) donde la línea punteada indica el umbral de  $CPI > 3$ ; (d) porcentaje de esteroides terrígenos ( $\sum \beta$ -sitosterol,  $\beta$ -sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol). El área punteada corresponde al incremento del aporte del material terrígeno hacia el GAM en los últimos ~25 años.

Lo observado en el registro sedimentario del GAM ilustrado a través del índice  $F_{terr}$  y la proporción de esteroides terrígenos como ejemplos del ingreso de MO de origen terrígeno hacia el golfo, se condice con las condiciones climáticas regionales (Fig. 17). Para esta comparación se han promediado los valores de temperatura y precipitación para las tres cuencas obteniéndose un “valor regional”. Se sugiere que el aumento en la  $F_{terr}$  que se evidencia a partir de ~2005 (Fig. 17a) y en los esteroides a partir del ~2015 (Fig. 17b) pueda deberse a un incremento de la temperatura regional promedio del aire a partir de ~2003 (Fig. 17c) que es más evidente desde 2011. Noël *et al.* (2025) relaciona la pérdida de masa de los glaciares patagónicos y el incremento sostenido en el deshielo a un calentamiento atmosférico debido al desplazamiento hacia el polo del Anticiclón Subtropical que favorece la advección de aire cálido del noroeste hacia la Patagonia. Nuestros resultados en  $F_{terr}$  y esteroides terrígenos también están acompañados por un aumento en la precipitación regional desde el año 2006 (a excepción de la megasequía del año 2016; Garreaud *et al.*, 2017) (Fig. 17d). El análisis estadístico realizado (coeficiente de Pearson) indica que existe una correlación positiva moderada entre las variables mencionadas, si bien esta correlación no es estadísticamente significativa (Tabla 4). Sin embargo, no podemos diferenciar si el incremento en el aporte terrígeno observado se debe a un incremento en la erosión debido al aumento de la precipitación o en el aporte fluvial hacia el GAM o por derretimiento glaciar.

En contraste con Patagonia sur, la zona centro-norte de Patagonia muestra una tendencia decreciente en la precipitación registrada en Puerto Montt (41° S; 73° O; 2011–2020) y Aysén (45° S; 72° O; 1931–2000) (Aravena & Luckman, 2009). En base a datos instrumentales, satelitales y modelamiento, esta tendencia a menores precipitaciones desde 1950, acompañadas por temperaturas más altas, fueron informadas por Perren *et al.* (2020) en la isla subantártica Marion ubicada a los 46°S y 37°E en el Océano Índico sur.

Dentro de la escala de tiempo de esta tesis, Rebolledo *et al.* (2005) estudiaron los sedimentos recientes (1890–2000 CE) del fiordo Puyuhuapi y observaron que,

desde el año 1970 la disminución en el aporte de diatomeas de agua dulce se correlaciona con una disminución en la precipitación en Patagonia norte, y por ende en las descargas fluviales del área. A escala de tiempo más largas, para los últimos 1750 años en el fiordo Jacaf, Sepúlveda *et al.* (2009) reportan un período relativamente seco y cálido antes de 900 años cal BP en contraste con un período húmedo y frío después de 750 años cal BP. Lamy *et al.* (2010) utilizaron registros sedimentológicos y de polen de Patagonia sur para reconstruir los patrones de precipitación y la posición e intensidad del núcleo del cinturón de los SWW durante el Holoceno. Los autores compararon sus registros con aquellos del margen norte-centro del cinturón de vientos y sugieren que los cambios temporales en intensidad están en antifase en ambas regiones: vientos intensos y abundante precipitación en Patagonia sur durante el Holoceno temprano, mientras que los del margen norte eran débiles; el patrón se revierte en el Holoceno tardío.

El desfase mencionado se relaciona con el movimiento latitudinal de los SWW que a su vez se asocian con el índice SAM. Dicho índice describe la variabilidad de baja frecuencia de las regiones extratropicales del hemisferio sur. En la Fig. 17e hemos recopilado los datos del índice SAM de Marshall (2003) tomado desde <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>. Se observa claramente una tendencia hacia valores más positivos desde mediados-fines de los años 90 manteniéndose en forma casi constante en valores >0 desde el año 2008. Los valores positivos del índice SAM corresponden con SWW más fuertes en las latitudes medias-altas (50°–70°S) y debilitados en las latitudes medias (30°–50°S) (Marshall, 2003). Esto concuerda con el constante desplazamiento hacia el sur en la posición promedio de los SWW desde los años 1950, como ilustrado por Perren *et al.* (2020; 2025) en sus estudios en las islas subantárticas Marion y Hornos. Nuestra evaluación de la correlación entre el aporte de MO terrígena hacia el GAM y el índice SAM (Figs. 17a y 17e) demuestra una correlación débil y no significativa (Tabla 4), lo que sugiere que i) cualquier relación entre SAM y  $F_{terr}$  podría no existir o ii) que los registros involucrados en la comparación no abarcan un intervalo temporal lo suficientemente largo.

Teniendo en cuenta el calentamiento global de los siglos XX y XXI, los modelos climáticos y los datos sugieren que el SAM continuará en su fase positiva y que el clima en Patagonia continuará su tendencia de calentamiento. Esto se condice con una continuación en la intensificación y el movimiento hacia el sur de los *SWW* llevando a un incremento en las precipitaciones en Patagonia sur y a una intensificación de las sequías que ya han afectado a Chile central y a otras regiones del mundo (e.g., Garreaud *et al.*, 2017). A su vez, el calentamiento proyectado puede tener consecuencias severas en las frecuencias y extensión de los incendios forestales que se predice que continuarán en el futuro (Holz & Veblen, 2012; Salazar *et al.*, 2024). También, puede llevar a un cambio en la composición de las comunidades de los ecosistemas andinos al modificar la frontera del límite forestal de montaña en Patagonia sur (Aguirre *et al.* 2021), así como incrementar la introducción de especies invasivas (Schroeder *et al.* 2024). En esta tesis no se observaron biomarcadores de origen antropogénico a pesar del aumento demográfico en la región y en particular en Natales y Riesco, donde se concentran la mayoría de las concesiones de extracción de carbón (Inostroza, 2015). En un trabajo dedicado a la caracterización de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos registrados en los sedimentos del GAM, se sugiere que desde los años 80 las fuentes de emisión de estos contaminantes son de origen petrogénico (Valentina Marín, comunicación personal).

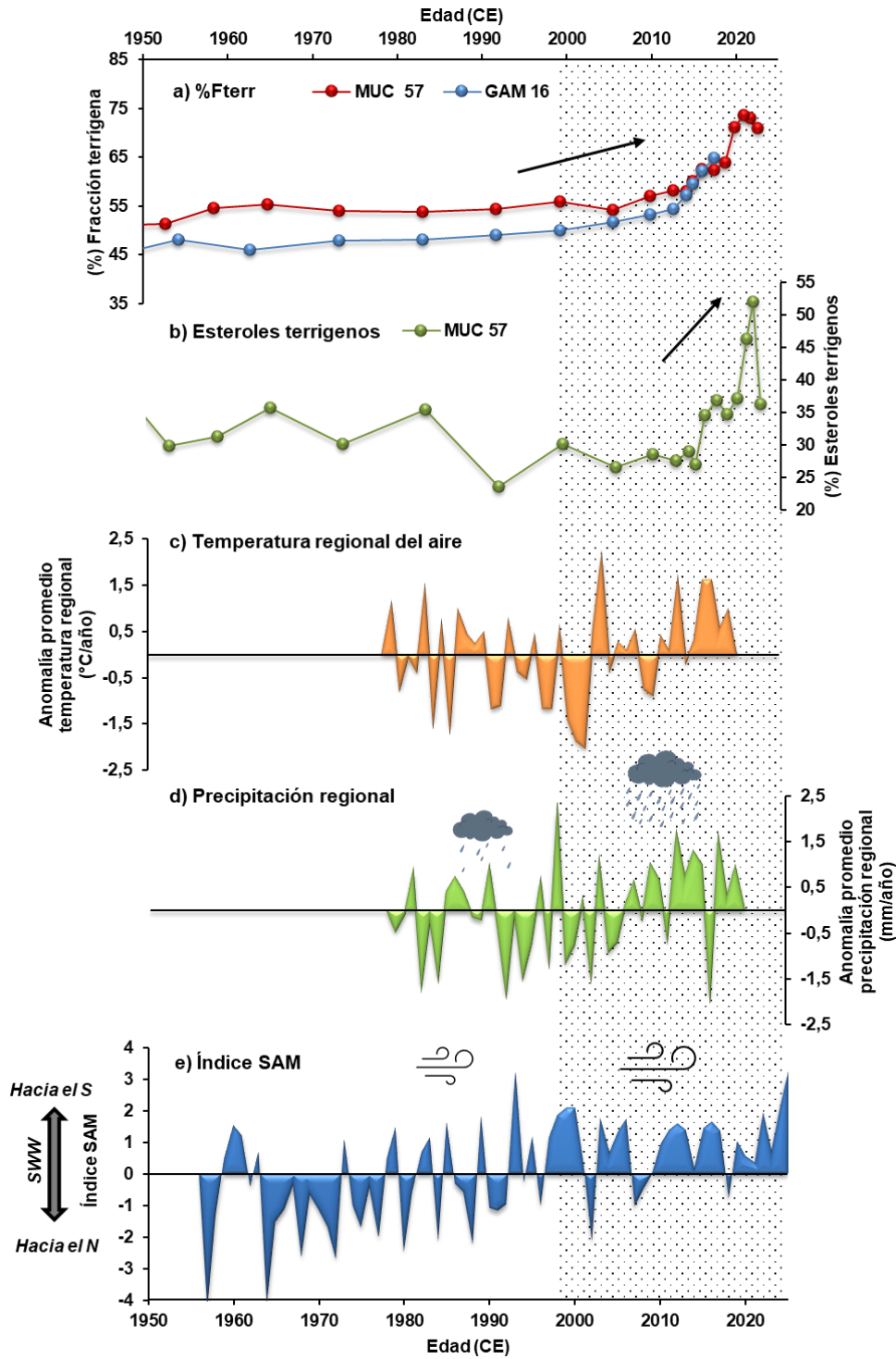


Fig. 17. a) Registro sedimentario de la MO terrígena ( $F_{terr}$ ) y b) porcentaje de esteroides terrígenos en los testigos MUC 57 y GAM 16 desde 1950 CE en comparación con c) la anomalía regional promedio de la temperatura del aire, d) la anomalía de la precipitación regional y e) el índice SAM (*Southern Annular Mode*) (d). El área punteada corresponde al período 1999 al presente.

## 6 CONCLUSIONES

En esta tesis se reconstruyeron los cambios temporales en el aporte de materia orgánica (MO) de origen terrígeno hacia el Golfo Almirante Montt (GAM) durante los últimos ~130 años, mediante el estudio de biomarcadores lipídicos (*n*-alcanos, esteroides y GDGTs), la abundancia del carbono orgánico y su señal isotópica ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) en dos testigos de sedimento recolectados en la cuenca noroeste del GAM. Los resultados se compararon con los registros climatológicos regionales de la zona.

Este estudio reporta un fortalecimiento reciente (desde ~2000 CE) del aporte continental hacia el golfo evidenciado a través de un aumento en los *n*-alcanos impares de cadena larga, junto a los valores elevados de  $F_{\text{terr}}$  derivados del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  y de esteroides característicos de plantas vasculares terrestres. Por otro lado, los índices derivados de los GDGTs no muestran una tendencia clara, reflejando la mezcla terrígena-marina de la MO a lo largo de todo el registro sedimentario. Estas señales son coherentes entre ambos testigos sedimentarios analizados. Al comparar los registros sedimentarios con la climatología regional (e.g., precipitación, caudales de ríos, temperatura del aire), se sugiere que el incremento en el aporte terrígeno mencionado puede haber sido ocasionado por las condiciones climáticas recientes, *i.e.* tendencia al aumento progresivo en precipitaciones, caudal del Río Serrano y temperatura del aire, que habrían favorecido la movilización y transporte de material continental hacia el GAM. Estas observaciones respaldan en parte la hipótesis de trabajo propuesta (aumento de la MO terrígena en respuesta a los cambios ambientales recientes) habiéndose encontrado una correlación positiva entre variables, si bien no significativa estadísticamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, F., Squeo, F. A., López, D., Grego, R. D., Buma, B., Carvajal, D., Jaña, R., Casassa, G., & Rozzi, R. (2021). Gradientes Climáticos y su alta influencia en los ecosistemas terrestres de la Reserva de la Biosfera Cabo de Hornos, Chile. *Anales del Instituto de la Patagonia*. <https://doi.org/10.22352/aip202149012>

Aquino-López, M.A., Blaauw, M., Christen, J.A. & Sanderson, N. (2018). Bayesian analysis of  $^{210}\text{Pb}$  dating. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 23, 317–333. <https://doi.org/10.1007/s13253-018-0328-7>

Aravena, J., & Luckman, B. H. (2008). Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology*, 29(14), 2106–2120. <https://doi.org/10.1002/joc.1761>

Artal, O., Valdebenito, P., San Martín, J., Vellojin, J., & Avello, L. (2023). Instituto de Fomento Pesquero — Informe final: Convenio de desempeño 2023. Programa de centro de datos oceanográficos y ambientales en la zona sur-austral de Chile. Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño, 81 pp.

Baas, M., Pancost, R., van Geel, B., & Sinninghe Damsté, J. S. (2000). A comparative study of lipids in *Sphagnum* species. *Organic Geochemistry*, 31(6), 535–541. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(00\)00037-1](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(00)00037-1)

Bertrand, S., Huguen, K. A., Sepúlveda, J., & Pantoja, S. (2014). Late Holocene covariability of the southern westerlies and sea surface temperature in northern Chilean Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, 105, 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.021>

Bianchi, T., Arndt, S., Austin, W., Benn, D., Bertrand, S., Cui, X., Faust, J., Koziorowska-Makuch, K., Moy, C., Savage, C., Smeaton, C., Smith, R., & Syvitski, J. (2020). Fjords as Aquatic Critical Zones (ACZs). *Earth-Science Reviews*, 203, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103145>

Bingham, E. M., McClymont, E. L., Väliranta, M., Mauquoy, D., Roberts, Z., Chambers, F. M., Pancost, R. D., & Evershed, R. P. (2010). Conservative

composition of *n*-alkane biomarkers in *Sphagnum* species: Implications for palaeoclimate reconstruction in ombrotrophic peat bogs. *Organic Geochemistry*, 41(2), 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.06.010>

Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37, 911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>

Blumer, M., Guillard, R. R. L., & Chase, T. (1971). Hydrocarbons of marine phytoplankton. *Marine Biology*, 8(3), 183–189. <https://doi.org/10.1007/bf00355214>

Bray, E. E., & Evans, E. D. (1961). Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 22(1), 2–15. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(61\)90069-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(61)90069-2)

Castañeda, I. S., & Schouten, S. (2011). A review of molecular organic proxies for examining modern and ancient lacustrine environments. *Quaternary Science Reviews*, 30(21–22), 2851–2891. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.009>

Cohen, P. A., & Kodner, R. B. (2022). The earliest history of eukaryotic life: Uncovering an evolutionary story through the integration of biological and geological data. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(3), 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.11.005>

Corner, E. D. S. (1979). Pollution studies with marine plankton: Part I. Petroleum hydrocarbons and related compounds. *Advances in Marine Biology*, 15, 289–380. [https://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60407-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60407-1)

Davies, B. J., & Glasser, N. F. (2012). Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age (~AD 1870) to 2011. *Journal of Glaciology*, 58(212), 1063–1084. <https://doi.org/10.3189/2012JoG12J026>

Eglinton, G., & Hamilton, R. T. (1963). Chapter 8. The Distribution of Alkanes. En: *Chemical Plant Taxonomy*. (Ed) Swain, T. Academic Press, pp. 187-217. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395540-1.50012-9>

- Eglinton, G., & Calvin, M. (1967). Chemical Fossils. *Scientific American*, 216(1), 32–43. <http://www.jstor.org/stable/24931372>
- Endlicher, W., & Santana Aguila, A. (1988). El clima al sur de la Patagonia y sus aspectos ecológicos. Un siglo de mediciones climatológicas en Punta Arenas. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 18, 57–86.
- Garreaud, R. D., López, P., Minvielle, M., & Rojas, M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, 26(1), 215–230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J. & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- González, H., Graeve, M., Kattner, G., Silva, N., Castro, L., Iriarte, J., Osmán, L., Daneri, G., & Vargas, C. (2016). Carbon flow through the pelagic food web in southern Chilean Patagonia: relevance of *Euphausia vallentini* as a key species. *Marine Ecology Progress Series*, 557, 91–110. <https://doi.org/10.3354/meps11826>
- Grimalt, J., & Albaigés, J. (1987). Sources and occurrence of C<sub>12</sub>-C<sub>22</sub> *n*-alkane distributions with even carbon-number preference in sedimentary environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6), 1379–1384. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90322-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90322-X)
- Hayes, J. M. (1993). Factors controlling <sup>13</sup>C contents of sedimentary organic compounds: Principles and evidence. *Marine Geology*, 113, 111–125. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90153-M](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90153-M)
- Holz, A., & Veblen, T. T. (2012). Wildfire activity in rainforests in western Patagonia linked to the Southern Annular Mode. *International Journal of Wildland Fire*, 21, 114–126. <https://doi.org/10.1071/WF10121>

- Hopmans, E. C., Weijers, J. W. H., Schefuß, E., Herfort, L., Sinninghe Damsté, J. S., & Schouten, S. (2004). A novel proxy for sea surface temperature based on lipids of marine Crenarchaeota. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1–2), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.012>
- Hudson, E. D., Parrish, C. C., & Helleur, R. J. (2001). Biogeochemistry of sterols in plankton, settling particles and recent sediments in a cold ocean ecosystem (Trinity Bay, Newfoundland). *Marine Chemistry*, 76(4), 253–270. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(01\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(01)00066-4)
- Inostroza, L. (2015). El mito de pristinidad y los usos efectivos del territorio de la región de Magallanes, Patagonia Chilena: Forestal, minería y acuicultura. *Estudios Geográficos*, 76(278), 141–175. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201505>
- Jeng, W. L. (2006). Higher plant *n*-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbon contamination in marine sediments. *Marine Chemistry*, 102(3–4), 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2006.05.001>
- Kaiser, J., Schefuß, E., Lamy, F., Mohtadi, M., & Hebbeln, D. (2008). Glacial to Holocene changes in sea surface temperature and coastal vegetation in north central Chile: high versus low latitude forcing. *Quaternary Science Reviews*, 27(21–22), 2064–2075. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.025>
- Killops, S., & Killops, V. (2004a). Chapter 5. Chemical Stratigraphic Concepts and Tools. En: *Introduction to Organic Geochemistry*. (Eds) Killops, S., & Killops, V. Blackwell Publishing Ltd., pp. 166–245. <https://doi.org/10.1002/9781118697214.ch5>
- Killops, S., & Killops, V. (2004b). Chapter 3. Production, Preservation and Degradation of Organic Matter. En: *Introduction to Organic Geochemistry*. (Eds) Killops, S., & Killops, V. Blackwell Publishing Ltd., pp. 71–116. <https://doi.org/10.1002/9781118697214.ch3>
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

Lamy, F., Kilian, R., Arz, H. W., Francois, J.-P., Kaiser, J., Prange, M., & Steinke, T. (2010). Holocene changes in the position and intensity of the southern westerly wind belt. *Nature Geoscience*, 3(10), 695–699. <https://doi.org/10.1038/ngeo959>

Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, 16, 4134–4143. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2)

Martinic, M. (1985). *Última Esperanza en el tiempo*. Ediciones de la Universidad de Magallanes. 276 pp.

Martinic, M. (2006). El poblamiento rural en Magallanes durante el siglo XX. *Realidad y utopía. Magallania (Punta Arenas)*, 34(1), 5–20. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442006000100001>

Meyers, P. A. (1994) Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 144, 289–302. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)

Meyers, P. A. (1997). Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 27, 213–250. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(97\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(97)00049-1)

Meyers, P. A. (2003). Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 34(2), 261–289. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00168-7)

Noël, B., Lhermitte, S., Wouters, B. & Fettweis, X. (2025). Poleward shift of subtropical highs drives Patagonian glacier mass loss. *Nature Communications*, 16, 3795. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58974-1>

Pearson, A., & Eglinton, T. I. (2000). The origin of *n*-alkanes in Santa Monica Basin surface sediment: a model based on compound-specific  $\Delta^{14}\text{C}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  data. *Organic Geochemistry*, 31(11), 1103–1116. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(00\)00121-2](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(00)00121-2)

Pearson, K. (1896). VII. Mathematical contributions to the theory of evolution. —III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 187, 253–318. <https://doi.org/10.1098/rsta.1896.0007>

Pendoley, K. (1992). Hydrocarbons in Rowley Shelf (Western Australia) oysters and sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 24, 210–215. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(92\)90532-B](https://doi.org/10.1016/0025-326X(92)90532-B)

Perren, B. B., Hodgson, D. A., Roberts, S. J., Sime, L., Van Nieuwenhuyze, W., Verleyen, E., & Vyverman, W. (2020). Southward migration of the Southern Hemisphere westerly winds corresponds with warming climate over centennial timescales. *Communications Earth & Environment*, 1, 58. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00059-6>

Perren, B. B., Kaiser, J., Arz, H. W., Dellwig, O., Hodgson, D. A. & Lamy, F. (2025). Poleward displacement of the Southern Hemisphere Westerlies in response to Early Holocene warming. *Communications Earth & Environment*, 6, 164. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02129-z>

Pinilla, E., Soto, C., Soto, G., San Martín, J., Valdebenito, P., Reche, P., Venegas, O., Salar, P., Cortés, J., Vergara, M., & Arraigada, M. (2023). Instituto de Fomento Pesquero — Informe final. Convenio de desempeño 2022: Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2022–2023. Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño, 69 pp.

Poynter, J. G., & Eglinton, G. (1990). Molecular composition of three sediments from Hole 717C: the Bengal Fan. En: Cochran, J.R., Stow, D.A.V. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, Vol. 116, pp. 155–161. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.116.151.1990>

Rebolledo, L., Lange, C. B., Figueroa, D., Pantoja, S., Muñoz, P., & Castro, R. (2005). 20<sup>th</sup> century fluctuations in the abundance of siliceous microorganisms preserved in the sediments of the Puyuhuapi Channel (44° S), Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 78(3). <https://doi.org/10.4067/s0716-078x2005000300009>

Rebolledo, L., Lange, C. B., Bertrand, S., Muñoz, P., Salamanca, M., Lazo, P., Iriarte, J. L., Vargas, G., Pantoja, S., & Dezileau, L. (2015). Late Holocene precipitation variability recorded in the sediments of Reloncaví Fjord (41°S, 72°W), Chile. *Quaternary Research*, 84(1), 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.05.006>

Rebolledo, L., Bertrand, S., Lange, C. B., Tapia, F. J., Quiroga, E., Troch, M., Silva, N., Cárdenas, P., & Pantoja, S. (2019). Compositional and biogeochemical variations of sediments across the terrestrial-marine continuum of the Baker-Martínez fjord system (Chile, 48°S). *Progress in Oceanography*, 174, 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2018.12.004>

Salazar, Á., Thatcher, M., Goubanova, K., Bernal, P., Gutiérrez, J., & Squeo, F. (2024). CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile. *Climate Dynamics* 62, 2475–2498. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07034-9>

Schouten, S., Hopmans, E. C., & Sinninghe Damsté, J. S. (2013). The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review. *Organic Geochemistry*, 54, 19–61. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.09.006>

Schouten, S., Hopmans, E. C., van der Meer, J., Mets, A., Bard, E., Bianchi, T. S., Diefendorf, A., Escala, M., Freeman, K. H., Furukawa, Y., Huguet, C., Ingalls, A., Ménot-Combes, G., Nederbragt, A. J., Oba, M., Pearson, A., Pearson, E. J., Rosell-Melé, A., Schaeffer, P., & Sinninghe Damsté, J. S. (2009). An interlaboratory study of TEX86 and BIT analysis using high-performance liquid chromatography–mass spectrometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3), Q03012. <https://doi.org/10.1029/2008gc002221>

Schroeder, L., Robles, V., Jara-Arancio, P., Lapadat, C., Hobbie, S. E., Arroyo, M. T. K., & Cavender-Bares, J. (2024). Drivers of plant diversity, community composition, functional traits, and soil processes along an alpine gradient in the central Chilean Andes. *Ecology and Evolution*, 14(2). <https://doi.org/10.1002/ece3.10888>

Sepúlveda, J., Pantoja, S., Hughen, K. A., Bertrand, S., Figueroa, D., León, T., Drenzek, N.J., & Lange, C. B. (2009). Late Holocene sea-surface temperature and

precipitation variability in northern Patagonia, Chile (Jacaf Fjord, 44°S). *Quaternary Research*, 72(3), 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.06.010>

Shapiro, S. S., Wilk, M. B., & Chen, H. J. (1968). A Comparative Study of Various Tests for Normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1343–1372. <https://doi.org/10.2307/2285889>

Silva, N., & Vargas, C. A. (2014). Hypoxia in Chilean Patagonian fjords. *Progress in Oceanography*, 129, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.05.016>

Silva, N., Vargas, C. A., & Prego, R. (2011). Land–ocean distribution of allochthonous organic matter in surface sediments of the Chiloé and Aysén interior seas (Chilean Northern Patagonia). *Continental Shelf Research*, 31, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.09.009>

Smith, R. W., Bianchi, T. S., Allison, M., Savage, C., & Galy, V. (2015). High rates of organic carbon burial in fjord sediments globally. *Nature Geoscience*, 8(6), 450–453. <https://doi.org/10.1038/ngeo2421>

Ta, K., Peng, X., Xu, H., Du, M., Chen, S., Li, J., & Zhang, C. (2019). Distributions and sources of glycerol dialkyl glycerol tetraethers in sediment cores from the Mariana subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124, 857–869. <https://doi.org/10.1029/2018JG004748>

Thornton, S. F., McManus, J. (1994). Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38, 219–233. <https://doi.org/10.1006/ecss.1994.1015>

Vargas, C. A., Martínez, R. A., San Martín, V., Aguayo, M., Silva, N., & Torres, R. (2011). Allochthonous subsidies of organic matter across a lake–river–fjord landscape in the Chilean Patagonia: Implications for marine zooplankton in inner fjord areas. *Continental Shelf Research*, 31, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.06.016>

Villavicencio, N. A., Lindsey, E. L., Martin, F. M., Borrero, L. A., Moreno, P. I., Marshall, C. R., & Barnosky, A. D. (2016). Combination of humans, climate, and vegetation change triggered Late Quaternary megafauna extinction in the Última Esperanza region, southern Patagonia, Chile. *Ecography*, 39(2), 125–140. <https://doi.org/10.1111/ecog.01606>

Volkman, J. (2003). Sterols in microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 60, 495–506. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1172-8>

Wang, Y., Song, J., Duan, L., Yuan, H., Li, X., Li, N., Zhang, Q., Liu, J., & Ren, C. (2021). Combining sterols with stable carbon isotope as indicators for assessing the organic matter sources and primary productivity evolution in the coastal areas of the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 223, 104446. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104446>

Xiao, W., Wang, Y., Zhou, S., Hu, L., Yang, H., & Xu, Y. (2016). Ubiquitous production of branched glycerol dialkyl glycerol tetraethers (brGDGTs) in global marine environments: a new source indicator for brGDGTs. *Biogeosciences*, 13(20), 5883–5894. <https://doi.org/10.5194/bg-13-5883-2016>

Zhang, Y., Liu, N., Fu, H., Cui, H., & Liu, Z. (2024). Natural and anthropogenic influences on sterol geochemical characteristics in lake sediments and implications for using sterols as paleoenvironmental indicators. *Journal of Hydrology*, 634, 131146.

## RECURSOS ONLINE

CAMELS-CL: Explorador de cuencas. Disponible en: <https://camels.cr2.cl/>

*Rplum R package*. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/rplum/vignettes/rplum.html#fnref1>

Ley de Chile-Decreto 6: Desafecta Reserva Forestal "Alcalufes". Créase El Parque Nacional "Kawésqar" Y La Reserva Nacional "Kawésqar", En La Región De Magallanes Y De La Antártica Chilena. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1128360>

## **ANEXO AL SEMINARIO DE TITULO**

### ***CAMBIOS TEMPORALES EN EL APORTE DE MATERIA ORGÁNICA DE ORIGEN TERRÍGENO HACIA EL GOLFO ALMIRANTE MONTT, PATAGONIA CHILENA***

Carolina Antonia Toro Ávila

Tabla A1. Resumen de variables utilizadas en este estudio: *n*-alcanos, esteroles y GDGTs, índices con sus respectivas definiciones.

Tabla A2. Modelos de edad de los testigos MUC 57 y GAM 16.

Tabla A3. Datos geoquímicos de los testigos MUC 57 y GAM 16.

Tabla A4. Esteroles identificados en el sedimento del Golfo Almirante Montt.

Tabla A1. Resumen de variables utilizadas en este estudio: *n*-alcanos, esteroides y GDGTs, índices con sus respectivas definiciones.

Proxies	Definición	Referencias
<b><i>n</i>-alcanos</b>		
CPI (Índice preferencial de carbono)	Índice que determina el origen de los <i>n</i> -alcanos en los sedimentos.	Rebolledo <i>et al.</i> , 2019
ACL (Longitud media de la cadena)	Índice que refleja principalmente el tipo de vegetación.	Poynter & Eglinton, 1990
<b>Esteroides</b>		
Esteroides terrígenos ( <i>e.g.</i> , β-sitosterol, β-sitostanol, campesterol, campestanol y stigmasterol)	Indicador de aporte de materia orgánica terrestre.	Meyers, 2003; Volkman, 2003
<b>Glicerol Dialquil Glicerol Tetraéteres (GDGTs)</b>	Lípidos microbianos usados para calcular parámetros ambientales como temperatura y aporte terrestre.	Hopmans <i>et al.</i> , 2004
BIT (Índice Tetraéter ramificado e isoprenoide)	Índice para reconstruir la contribución de la materia orgánica del suelo a los sedimentos marinos y lacustres.	Hopmans <i>et al.</i> , 2004
Razón brGDGT IIIa/IIa	Indicador para distinguir el origen de los brGDGT en sedimento marinos.	Xia <i>et al.</i> , 2016

Tabla A2. Modelos de edad de los testigos MUC 57 y GAM 16.

MUC 57					
Profundidad (cm)	Profundidad compuesta (cm)	Año (min)	Año (max)	Año (mediana)	Año (promedio)
0,5	0,5	2022,7	2022,5	2022,6	2022,6
1,5	1,5	2022,0	2021,6	2021,7	2021,7
2,5	2,5	2021,3	2020,7	2021,0	2021,0
3,5	3,5	2020,2	2019,6	2019,9	2019,9
4,5	4,5	2019,1	2018,3	2018,7	2018,7
5,5	5,5	2017,9	2017,0	2017,4	2017,4
6,5	6,5	2016,5	2015,6	2016,0	2016,0
7,5	7,5	2015,5	2014,5	2014,9	2014,9
8,5	8,5	2014,7	2013,6	2014,1	2014,1
9,5	9,5	2013,3	2012,0	2012,6	2012,6
10,5	10,5	2010,6	2009,1	2009,8	2009,8
11,5	11,5	2006,5	2004,5	2005,4	2005,4
12,5	12,5	2000,8	1998,1	1999,2	1999,3
13,5	13,5	1994,0	1990,1	1991,7	1991,8
14,5	14,5	1986,3	1980,7	1983,0	1983,1
15,5	15,5	1978,1	1970,2	1973,2	1973,4
16,5	16,3	1971,2	1961,7	1964,7	1965,1
17,5	17,0	1966,3	1954,2	1958,3	1958,8
18,5	17,8	1962,0	1947,4	1952,6	1953,2
19,5	18,5	1958,6	1942,2	1948,3	1948,9
20,5	19,3	1954,2	1937,1	1943,6	1944,1
21,5	20,0	1950,1	1931,3	1939,0	1939,4
22,5	21,0	1945,6	1924,0	1933,4	1933,7
23,5	22,0	1942,0	1917,9	1928,5	1928,7
24,5	23,0	1938,8	1912,6	1924,1	1924,4
25,5	24,0	1936,2	1908,1	1920,4	1920,8
26,5	25,0	1934,4	1904,5	1917,6	1918,0
27,5	26,4	1932,6	1900,8	1914,6	1915,1
28,5	27,8	1931,3	1897,9	1912,5	1912,9
29,5	29,1	1929,9	1895,0	1910,4	1910,6
30,5	30,5	1928,1	1890,9	1907,4	1907,8
31,5	31,9	1926,0	1884,4	1903,4	1903,8
32,5	33,3	1923,4	1877,8	1899,0	1899,2

GAM16					
Profundidad (cm)	Profundidad compuesta (cm)	Año (min)	Año (max)	Año (mediana)	Año (promedio)
0,5	5,5	2017,9	2017,0	2017,4	2017,4
1,5	6,5	2016,5	2015,6	2016,0	2016,0
2,5	7,5	2015,5	2014,5	2014,9	2014,9
3,5	8,5	2014,7	2013,6	2014,1	2014,1
4,5	9,5	2013,3	2012,0	2012,6	2012,6
5,5	10,5	2010,6	2009,1	2009,8	2009,8
6,5	11,5	2006,5	2004,5	2005,4	2005,4
7,5	12,5	2000,8	1998,1	1999,2	1999,3
8,5	13,5	1994,0	1990,1	1991,7	1991,8
9,5	14,5	1986,3	1980,7	1983,0	1983,1
10,5	15,5	1978,1	1970,2	1973,2	1973,4
11,5	16,5	1969,6	1959,2	1962,6	1963,0
12,5	17,5	1963,1	1949,2	1954,1	1954,7
13,5	18,5	1958,6	1942,2	1948,3	1948,9
14,5	19,5	1952,7	1935,4	1942,0	1942,6
15,5	20,5	1947,4	1927,3	1936,0	1936,3
16,5	21,5	1943,7	1920,7	1930,8	1931,1
17,5	22,5	1940,3	1915,1	1926,1	1926,4
18,5	23,5	1937,3	1910,2	1922,0	1922,4
19,5	24,5	1935,2	1906,1	1918,8	1919,3
20,5	25,5	1933,7	1903,0	1916,4	1916,8
21,5	26,5	1932,5	1900,5	1914,4	1914,9
22,5	27,5	1931,6	1898,4	1912,9	1913,3
23,5	28,5	1930,6	1896,5	1911,5	1911,7
24,5	29,5	1929,5	1894,2	1909,7	1910,0
25,5	30,5	1928,1	1890,9	1907,4	1907,8
26,5	31,5	1926,7	1886,3	1904,6	1905,0
27,5	32,5	1925,0	1881,3	1901,5	1901,8
28,5	33,5	1922,9	1876,6	1898,2	1898,4
29,5	34,5	1920,4	1872,1	1894,4	1894,7
30,5	35,5	1917,2	1867,6	1890,3	1890,7
31,5	36,5	1914,4	1862,9	1886,4	1886,9
32,5	37,5	1912,3	1858,4	1882,9	1883,4

Tabla A3. Datos geoquímicos de los testigos MUC 57 y GAM 16.

Testigo	Estrato (cm)	%Corg	δ13Corg	(%)Fterr	n -alcanos totales µg/g TOC	n -alcanos totales Impares µg/g TOC	n -alcanos totales Pares µg/g TOC	CPI	ACL	Esteroles totales /TOC	%Esteroles _terrigenos	BIT_GDGTs	brGDGT Illa/Ila
MUC57	0,5	3,47	-24,65	71,01	86,89	42,91	43,98	1,03	28,35	3188,18	36,20	0,07	0,90
	1,5	3,25	-24,86	73,06	29,35	18,64	10,70	2,21	28,98	1642,40	52,02	0,09	0,75
	2,5	3,69	-24,91	73,52	30,12	17,59	12,53	1,93	29,17	1785,94	46,27	0,09	0,74
	3,5	4,33	-24,67	71,20	46,01	28,84	17,17	2,24	28,97	2024,36	37,12	0,10	0,77
	4,5	2,93	-23,89	63,83	46,98	26,21	20,77	2,39	28,99	1353,95	34,70	0,10	0,83
	5,5	2,84	-23,72	62,29	58,80	40,77	18,03	4,08	29,03	1916,27	36,81	0,17	1,04
	6,5	2,91	-23,76	62,62	80,56	48,04	32,52	1,75	29,32	715,46	34,60	0,11	1,04
	7,5	2,71	-23,50	60,15	40,10	27,49	12,61	3,49	29,20	701,64	26,89	0,15	0,92
	8,5	2,91	-23,27	58,05	54,65	37,28	17,38	3,08	29,42	422,72	28,96	0,14	0,95
	9,5	2,97	-23,29	58,22	50,88	32,90	17,98	2,48	29,21	690,56	27,54	0,15	1,01
	10,5	2,58	-23,16	56,96	44,12	31,14	12,98	3,31	29,22	808,79	28,54	0,17	0,97
	11,5	2,48	-22,86	54,17	60,71	36,95	23,75	1,94	29,45	537,42	26,52	0,15	0,95
	12,5	2,53	-23,06	56,01	50,92	33,01	17,91	2,53	29,42	384,69	30,04	0,16	1,01
	13,5	2,48	-22,88	54,37	54,82	36,41	18,41	2,93	29,27	389,52	23,54	0,16	0,89
	14,5	2,44	-22,83	53,86	42,89	27,03	15,87	2,29	29,19	558,89	35,33	0,15	0,97
	15,5	2,59	-22,84	54,00	61,58	48,22	13,36	4,71	29,41	935,78	30,03	0,17	0,99
	16,5	2,51	-22,99	55,41	49,72	33,54	16,19	2,59	29,30	501,64	35,63	0,09	1,06
	17,5	2,56	-22,90	54,56	49,90	32,88	17,02	2,14	29,19	428,16	31,30	0,12	0,81
	18,5	2,57	-22,55	51,26	63,07	49,74	13,33	4,46	29,33	1252,56	29,78	0,12	0,98
	19,5	2,32	-22,54	51,16	60,87	40,95	19,91	2,30	29,20	506,00	36,64	0,13	0,93
	20,5	2,60	-22,86	54,12	55,02	42,40	12,62	3,92	29,28	1063,13	37,34	0,17	0,84
	21,5	2,46	-22,74	53,01	46,97	31,10	15,87	2,63	29,26	520,76	26,99	0,14	0,87
	22,5	2,42	-22,45	50,29	66,77	46,50	20,26	3,39	29,22	629,66	32,57	0,12	0,82
	23,5	2,67	-22,41	49,94	65,21	42,97	22,24	2,91	29,27	981,31	27,58	0,12	0,89
	24,5	2,71	-22,00	46,01	66,72	43,72	23,01	3,21	29,26	1862,42	24,16	0,14	0,73
	25,5	2,49	-21,92	45,28	81,23	56,89	24,34	3,97	29,26	2468,52	24,08	0,12	0,76
	26,5	2,15	-22,75	53,09	90,55	61,81	28,74	3,04	29,29	1001,82	28,21	0,10	0,83
	27,5	2,06	-22,98	55,32	72,61	54,67	17,94	4,17	29,34	773,80	30,74	0,21	0,83
	28,5	2,06	-22,99	55,36	80,22	54,37	25,85	3,71	29,27	299,56	31,15	0,10	0,83
	29,5	2,20	-22,90	54,52	71,71	47,47	24,24	3,10	29,22	178,35	35,36	0,09	0,83
	30,5	2,27	-23,10	56,44	81,25	65,03	16,22	5,31	29,39	935,86	35,04	0,17	0,78

Tesigo	Estrab (cm)	%Corg	δ13Corg	(%)Flerr	n -alcanos totales µg/g TOC	n -alcanos totales Impares µg/g TOC	n -alcanos totales Pares µg/g TOC	CPI	ACL	Esteroles totales /TOC	% Esteroles_ terrigenos	BIT_GDGTs	brGDGT IIIa/IIa
GAM 16	0,5	3,71	-23,99	64,82									
	1,5	3,37	-23,71	62,13									
	2,5	2,84	-23,44	59,60									
	3,5	2,85	-23,20	57,34									
	4,5	2,11	-22,88	54,34									
	5,5	2,28	-22,77	53,32									
	6,5	2,59	-22,59	51,64									
	7,5	2,57	-22,41	49,92									
	8,5	1,84	-22,33	49,14									
	9,5	2,17	-22,23	48,21									
	10,5	2,00	-22,20	47,94	123,16	80,39	42,77	2,57	29,66	454,93	25,68		
	11,5	2,49	-22,01	46,10	140,64	85,32	55,33	2,17	29,05	744,34	42,48		
	12,5	2,19	-22,21	48,04	210,61	126,10	84,51	2,50	29,83	591,86	30,61		
	13,5	2,49	-21,96	45,68	61,04	36,46	24,58	2,03	29,41	507,25	35,78		
	14,5	2,19	-22,19	47,81	128,48	82,43	46,05	2,41	29,60	490,52	30,47		
	15,5	2,37	-22,56	51,31	117,79	76,40	41,39	2,70	29,67	529,42	28,64		
	16,5	2,28	-22,23	48,16	179,95	116,09	63,86	2,68	29,68	1513,98	24,17		
	17,5	2,72	-21,93	45,42	92,66	59,37	33,29	2,65	29,50	511,17	23,53		
	18,5	2,18	-22,12	47,19	211,37	108,81	102,56	2,32	29,79	610,04	25,09		
	19,5	2,53	-22,28	48,65	156,54	95,09	61,45	2,55	29,70	558,06	25,35		
	20,5	2,09	-22,08	46,81	120,28	70,97	49,32	2,53	29,48	736,90	32,74		
	21,5	2,63	-22,31	48,97						802,02	27,97		
	22,5	2,27	-21,84	44,49	106,50	65,74	40,76	2,26	29,65	1249,89	31,75		
	23,5	2,65	-21,71	43,33	74,63	45,17	29,45	2,01	29,58	1699,43	25,13		
	24,5	2,24	-21,29	39,37	90,67	56,10	34,57	2,26	29,64	2973,20	24,42		
	25,5	2,64	-22,21	48,03	51,92	33,25	18,67	2,09	29,57	3421,76	26,08	0,10	0,78
	26,5	1,95	-22,10	47,00	80,81	47,37	33,44	1,87	29,35	1554,95	28,30	0,09	0,98
	27,5	2,10	-22,32	49,08	80,10	49,45	30,65	2,19	29,49	464,93	36,11	0,08	0,87
	28,5	1,92	-22,33	49,17	89,21	54,06	35,15	2,14	29,40	545,49	39,26	0,07	1,03
	29,5	2,25	-22,53	51,05	70,01	42,10	27,92	2,05	29,48	468,11	40,59	0,06	0,99
	30,5	1,63	-22,09	46,87	95,21	55,83	39,38	1,97	29,31	615,57	40,19	0,07	0,91
	31,5	2,30	-22,66	52,25	101,22	59,19	42,03	1,99	29,39	723,90	45,83	0,08	0,82
	32,5	2,00	-22,20	47,96	135,88	75,23	60,65	1,95	29,42	818,43	34,25	0,07	0,91
	33,5	2,39	-22,18	47,76	104,48	63,96	40,51	2,44	29,27	589,99	38,21	0,08	0,80
	34,5	1,88	-22,15	47,42	135,14	79,34	55,80	2,62	29,47	791,41	36,73	0,07	0,77
	35,5	2,19	-21,57	41,98	120,04	74,70	45,34	2,87	29,36	436,34	33,85	0,07	0,95
	36,5	1,94	-22,16	47,55	146,75	87,81	58,94	2,64	29,46	541,29	38,69	0,08	0,97
	37,5	2,26	-22,23	48,22	115,75	70,55	45,20	2,83	29,43	578,10	34,18	0,06	0,92
	38,5	2,10	-22,39	49,73	104,76	60,73	44,03	2,24	29,40	480,15	39,93	0,07	1,08
	39,5	2,14	-22,49	50,64	114,79	66,51	48,28	2,58	29,40	438,20	35,94	0,07	0,97

Testigo	Estrato (cm)	%Corg	δ13Corg	(%)Flerr	n -alcanos totales µg/g TOC	n -alcanos totales Impares µg/g TOC	n -alcanos totales Pares µg/g TOC	CPI	ACL	Esteroles totales /TOC	% Esteroles_terri genos	BIT_GDGTs	brGDGT IIIa/IIa
GAM 16	40,5	2,02	-22,25	48,42	98,09	52,35	45,75	1,64	29,61	751,93	53,34	0,07	0,96
	41,5	2,15	-22,21	48,04	96,16	56,16	40,00	2,20	29,68	694,36	50,58	0,07	0,98
	42,5	1,81	-22,07	46,71	277,16	171,87	105,30	3,27	29,79	984,68	28,75	0,10	1,07
	43,5	2,28	-22,25	48,43	137,43	81,69	55,74	2,30	29,66	169,87	28,96	0,28	0,79
	44,5	1,87	-22,14	47,32	175,73	105,43	70,29	2,67	29,53	355,58	29,71	0,25	0,83
	45,5	2,14	-22,24	48,30	182,19	112,76	69,43	2,59	29,81	441,94	31,78	0,35	0,72
	46,5	2,00	-22,21	48,03	197,24	123,74	73,49	2,84	29,70	418,69	20,49	0,28	0,75
	47,5	2,06	-22,39	49,69	184,78	111,54	73,24	2,50	29,81	444,86	22,75	0,28	0,71
	48,5	1,73	-22,35	49,38	261,05	163,36	97,69	2,93	29,86	439,18	19,00	0,32	0,72
	49,5	2,23	-22,52	50,98	139,81	82,78	57,04	2,49	29,57	364,42	27,72	0,28	0,65
	50,5	1,80	-22,45	50,24	213,12	119,55	93,57	2,20	29,69	551,99	27,76	0,35	0,75
	51,5	2,14	-22,23	48,19	253,09	139,18	113,91	2,45	29,21	493,26	25,35		
	52,5	2,04	-22,41	49,87	95,00	53,64	41,36	1,98	29,36	274,18	17,37	0,10	0,97
	53,5	2,06	-22,45	50,31	92,02	54,46	37,56	2,13	29,40	344,46	17,50	0,08	0,80
	54,5	1,92	-22,37	49,50	106,48	62,73	43,75	2,19	29,34	347,26	22,72	0,07	0,90
	55,5	2,12	-22,07	46,67	97,16	57,29	39,86	1,97	29,39	408,82	18,92	0,07	0,91
	56,5	1,87	-22,20	47,97	97,45	59,22	38,23	2,24	29,29	226,19	20,37	0,07	0,99
	57,5	2,12	-22,61	51,76	125,97	73,06	52,91	2,05	29,76	395,62	22,48	0,06	1,07
	58,5	1,88	-22,93	54,78	193,02	115,29	77,73	2,25	29,40	363,18	23,00	0,07	0,90
	59,5	2,00	-22,73	52,89	129,23	75,62	53,61	2,08	29,56	325,37	15,99	0,08	0,97
	60,5	1,85	-22,48	50,53	144,57	84,44	60,13	2,13	29,49	272,33	19,44	0,08	0,92
	61,5	2,09	-22,66	52,23	141,27	85,23	56,04	2,32	29,12	472,17	37,73	0,09	0,88
	62,5	1,88	-22,53	51,08	172,81	111,94	60,86	3,04	29,49	251,94	38,93	0,14	0,95
	63,5	2,01	-22,59	51,56	243,41	151,27	92,14	3,33	30,03	225,42	26,55	0,09	1,02
	64,5	1,82	-22,51	50,80	242,54	151,44	91,10	3,22	29,82	192,09	20,39	0,11	0,89
	65,5	1,93	-22,38	49,63	245,09	158,14	86,95	3,99	30,09	227,41	26,65	0,12	0,82
	66,5	2,01	-22,54	51,09	179,40	116,35	63,05	3,00	29,76	196,94	25,77	0,08	0,94
	67,5	2,10	-22,68	52,41	181,65	118,10	63,55	3,43	29,69	243,56	22,84	0,10	0,90
	68,5	1,95	-22,39	49,71	154,53	105,80	48,73	3,83	29,59	201,45	20,23	0,09	1,01
	69,5	2,09	-22,44	50,21	227,39	150,72	76,68	4,67	30,11	291,18	21,80	0,17	0,98
	70,5	2,04	-22,53	51,03	219,52	148,88	70,65	4,06	29,29	457,84	36,76	0,11	0,84
	71,5	2,38	-22,95	55,03	164,88	107,91	56,97	3,54	29,88	219,92	21,63	0,07	0,94
	72,5	1,80	-23,12	56,60	135,85	87,83	48,02	2,89	29,48	188,36	17,75	0,09	1,02
	73,5	2,08	-22,96	55,10	149,02	99,55	49,47	2,98	29,61	215,99	22,79	0,09	0,96
	74,5	1,90	-22,57	51,46	209,66	141,89	67,77	3,73	29,70	217,20	15,12	0,07	0,93
	75,5	2,16	-22,59	51,57	162,26	106,78	55,48	3,54	29,78	184,57	17,21	0,08	0,88
	76,5	1,83	-22,29	48,81	229,91	146,44	83,48	3,27	29,82	289,57	19,29	0,09	1,01
	77,5	2,30	-22,38	49,61	133,97	87,84	46,14	3,35	29,60	200,92	18,15	0,09	0,87
	78,5	1,88	-22,54	51,09	155,97	102,88	53,09	3,53	29,85	288,54	19,10	0,09	0,97
	79,5	2,45	-22,11	47,04	129,66	83,84	45,82	3,57	29,90	182,09	19,30	0,09	0,96
	80,5	2,00	-22,21	47,99	176,36	116,11	60,25	3,69	29,60	352,77	20,56	0,08	1,00

Tabla A4. Esteroles identificados en el sedimento del Golfo Almirante Montt.

Número de carbono	Nombre corto	Nombre sisematico	Nombre común	Referencias
C26	C26 $\Delta^{5,22}$	24-nor-Cholesta-5,22E-dien-3 $\beta$ -ol		Son comunes en organismos de niveles tróficos superiores, además de ser resultado de la degradación de los esteroles microalgales dietéticos (Volkman, 2003).
	C26 $\Delta^{22}$	24-nor-5 $\alpha$ -cholest-22-en-3 $\beta$ -ol		Reportado en equinodermos (Goad <i>et al.</i> , 1972).
	C26 $\Delta^0$ (isómero)			
	C26 $\Delta^0$			
C27	C27 $\Delta^{5,22}$ (isómero)			
	C27 $\Delta^{5,22}$	Cholesta-5,22E-dien-3 $\beta$ -ol	22-Dehydrocholesterol	
	C27 $\Delta^{22}$	5 $\alpha$ -Cholest-22E-en-3 $\beta$ -ol	trans-Dehydrocholesterol	
	C27 $\Delta^5$	Cholest-5-en-3 $\beta$ -ol	Colesterol	Biomarcador para la comunidad marina eucariota (Volkman, 1986) producido por algunas algas (Volkman, 2003).
	C27 $\Delta^0$	5 $\alpha$ -Cholestan-3 $\beta$ -ol	Colestanol	Indicador de la reacción de oxidación del colesterol (Gagosian <i>et al.</i> , 1980).
C28	C28 $\Delta^{5,22}$	24-Methylcholesta-5,22E-dien-3 $\beta$ -ol	Brassicasterol	Asociado con diatomeas y Phaeocystis (e.g., Villinski <i>et al.</i> , 2008).
	C28 $\Delta^{22}$	24-Methyl-5 $\alpha$ -cholest-22-en-3 $\beta$ -ol	Brassicastanol	Reportado en equinodermos (Goad <i>et al.</i> , 1972).
	C28 $\Delta^5$	24-Methylcholest-5-en-3 $\beta$ -ol	Campesterol	Asociado con plantas vasculares (Volkman, 1986) y diatomeas (Villinski <i>et al.</i> , 2008).
	C28 $\Delta^0$	24-Methyl-5 $\alpha$ -cholestan-3 $\beta$ -ol	Campestanol	
C29	C29 $\Delta^{5,22}$ (isómero)			
	C29 $\Delta^{5,22}$	24-Ethylcholesta-5,22E-dien-3 $\beta$ -ol	Stigmasterol	Considerado el principal esteroles en las plantas vasculares (Volkman, 2003). También se ha observado en algunas diatomeas, dinoflagelados y algas prymnesiófitas (Volkman, 1986).
	C29 $\Delta^{22}$	24-Ethyl-5 $\alpha$ -cholest-22-en-3 $\beta$ -ol		
	4Me-C29 $\Delta^{22}$			
	C29 $\Delta^5$	24-Ethylcholest-5-en-3 $\beta$ -ol	$\beta$ -sitosterol	Asociado con plantas vasculares (Volkman, 1986). También se observa en Chlorophyta, cianobacterias, algas prymnesiófitas y algunas diatomeas (Volkman, 1986; Villinski <i>et al.</i> , 2008).
C29 $\Delta^0$	24-Ethyl-5 $\alpha$ -cholestan-3 $\beta$ -ol	$\beta$ -sitostanol		
C30	4Me-C30 $\Delta^{22}$	4,23,24-trimethyl-5-cholest-22E-en-3-ol	Dinosterol	Asociado principalmente con dinoflagelados (e.g., Volkman, 2003).