



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**PALEOECOLOGÍA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS HOLOCENOS DE LA
BAHÍA DE GUANAQUEROS, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

FRANCISCO JAVIER FONSECA VALDEBENITO

PROFESOR GUÍA:
CRISTINA ORTEGA CAURAPAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GABRIEL VARGAS EASTON
ALFONSO RUBILAR RODRIGUEZ
MARGARITA MARCHANT SAN MARTIN

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDECYT postdoctoral 3150706

SANTIAGO DE CHILE

2018

PALEOECOLOGÍA DE FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS HOLOCENOS DE LA BAHÍA DE GUANAQUEROS, REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE

La bahía de Guanaqueros (30°S) se ubica en la costa semiárida de Chile, que se caracteriza por un clima transicional entre el clima hiperárido del desierto de Atacama y el clima mediterráneo de la zona central de Chile. En esta área han ocurrido significativos cambios climáticos durante el fin del Pleistoceno y el Holoceno, los cuales han sido evaluados mediante el estudio paleoecológico de los foraminíferos bentónicos contenidos en un testigo de sedimento marino extraído desde el fondo de la bahía.

Las condiciones paleoecológicas en la bahía de Guanaqueros durante el Holoceno han sido inferidas a partir del análisis de la abundancia de los foraminíferos. Se identificaron 48 especies agrupadas en 28 géneros, 21 familias y 4 órdenes, siendo el Orden Rotaliina el más abundante (99,8%). Las especies más abundantes son *Bolivina seminuda*, *Nonionella auris*, *Cancris inflatus*, *Bolivina plicata*, *Bulimina marginata*, *Cassidulina auka*, *Epistominella exigua*, *Epistominella pacífica*, *Bolivina* sp.1, *Buccella peruviana* s.l., *Buliminella elegantissima* y *Uvigerina striata*.

Durante el Holoceno temprano se interpreta la transición de un ambiente sublitoral a uno de plataforma interna, marcado por la presencia de *Quinqueloculina seminula* y *Textularia gramen*, junto con una disminución progresiva en la oxigenación evidenciado por el aumento en la abundancia de las especies *B. seminuda* y *B. plicata*. La profundización del ambiente estaría relacionado al aumento del nivel del mar post-Último Máximo Glacial. La mayor presencia de las especies *Buccella peruviana* s.l. y *Epistominella exigua* indican condiciones frías, lo que sugiere una surgencia costera intensa asociada a una mayor influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental en esta región junto con condiciones más frías de la corriente de Humboldt. Durante el Holoceno medio, ya se habría establecido un ambiente de plataforma interna, de menor energía, con nivel de oxigenación aún más bajos y con un aumento en la temperatura de las aguas en relación con el Holoceno temprano. El amplio dominio de *B. seminuda* y la disminución de la mayoría de las especies, apuntan a condiciones mayores de hipoxia/anoxia respecto al Holoceno temprano. La escasa presencia de especies de ambientes más litorales, sumada a la sedimentación hemipelágica rítmica y a las laminaciones indican un bajo aporte de detritos desde la hoya hidrográfica, lo que sugiere una baja frecuencia de lluvias torrenciales asociada a condiciones neutras tipo-ENSO que habrían dominado este periodo. Durante el Holoceno tardío, la mayoría de las especies alcanzan su mayor abundancia. Especies como *Bolivina seminuda*, *B. plicata* y *Bulimina marginata* indican condiciones hipóxicas, pero con una oxigenación ligeramente mayor respecto al periodo anterior. La asociación de foraminíferos indica un ambiente de plataforma interna sin grandes variaciones en la temperatura. Las curvas de abundancia y la aparición esporádica de especies como *T. gramen*, *Q. seminula* y *Cibicidoides lobatulus*, apuntan a un ambiente de mayor energía. Esto es concordante con un mayor arribo de flujos de detritos causados por lluvias intensas más frecuentes asociadas al establecimiento de El Niño moderno hace 5000 años AP. Durante el último siglo, la gran disminución en la abundancia de la mayoría de las especies respecto al Holoceno tardío, tales como *C. inflatus* y *N. Auris*, sumado a la aparición de especies de aguas frías como *B. peruviana* s.l., indican un descenso en la temperatura y un leve aumento en la oxigenación de las aguas. Las bajas temperaturas durante este periodo pueden ser parte de la tendencia de enfriamiento de la costa del Norte de Chile durante las últimas décadas.

AGRADECIMIENTOS

Antes que todo, debo comenzar agradeciendo a mis padres, Nilda y Fernando. Sin su apoyo y paciencia, pese a todas las dificultades, nada de esto habría sido posible. A ellos les dedico este trabajo.

Agradezco profundamente a mi profe Guía, Cristina, por la infinita paciencia y la confianza que depositó en mí para participar en este proyecto. Sus correcciones, comentarios y consejos, siempre acompañados de palabras de aliento, sin duda hicieron más amena esta ardua labor. También agradezco al profesor Gabriel por haber confiado en mí y darme la oportunidad de introducirme al mundo de la Geología Marina y Oceanografía. Al profesor Alfonso no solo agradezco su apoyo en esta investigación, sino que también haber confiado en mí allá por el 2014, permitiéndome formar parte de cuerpo docente de su curso y realizar la practica en el servicio, labores que fueron fundamentales para definir mi camino por la geología y la paleontología, siendo un guía hasta el día de hoy. A ellos, junto con la profe Margarita, quien apoyó amablemente esta investigación desde Concepción y me recibió afectuosamente cuando mi visita, les agradezco todas las correcciones que hicieron que este trabajo fuera mejorando continuamente. Además, agradezco a Diego, Vale y Profe Luisa, con quien compartí en terreno y me fueron una grato aliento a mi trabajo.

Fueron muchas personas con las que compartí durante todos estos años en la universidad y a las que debo agradecer, lo que resulta en una difícil labor. Empiezo por agradecer a los amigos de plan común, que hicieron de ese paso mucho más ameno. A mis amigos que conocí participando en política de la facultad: Dani, Piga, Maringer, Coni, Lais y Foncho, grandes personas con las que compartimos inolvidables momentos. Entre ellos quiero nombrar especialmente a Gabriel, quien nos dejó este año, este trabajo quiero dedicarlo humildemente en su memoria, que su alegría siga con nosotros. Agradezco también a los amigos de geo, Guille, Eial, Rodri, Juanito, Cadiz, Chino, Dani, Marco, Claudito y Cristian, también a la Nicha, Jose, Lore, Ara, Coni y Fran, con quienes compartí en clases, terreno y en la vida en general. Agradecimiento especial a Pelaito y Fonsi, el mejor grupo de campo de la vida, y a Jercko, por todo el apaño. También especial agradecimiento al mejor grupo de Económica, Mauro, España y especialmente a Vale, grandes amigos que han sido un gran apoyo y compañía durante el final de este trabajo. Quiero agradecer también a Carla, quien fue un gran apoyo por gran parte de este camino. Finalmente, quiero agradecer a Juanma, con quien desde que nos conocimos forzamos la mejor amistad, y a su hijita Emmita, que llegó a alegrar la vida, gracias por el cariño y apoyo todo este tiempo.

Por otro lado, quiero agradecer a Christian Nievas, por su paciencia y buena onda para ayudarme cada vez que lo iba a molestar con algo del Laboratorio. A Tomás, por su ayuda y por todas esas largas jornadas en el laboratorio que sin duda se hicieron mucho más entretenidas, a Zaida, por su grata compañía y a Jessica, por su compañía y apoyo durante los últimos meses. A don Carlos y tía Jacqueline, por su ayuda y conversaciones, y a Blanca, por su apoyo y consejo, que sin duda fue fundamental para terminar este proceso.

A todos, les agradezco por hacer del paso por la universidad algo mucho más humano, donde no solo se viene a sacar un título, sino que también a formarse como personas para construir un país más justo en donde todos tengamos las mismas oportunidades.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	11
1.1	Introducción General	11
1.2	Hipótesis de trabajo	12
1.3	Objetivos	12
1.3.1	Objetivo general	12
1.3.2	Objetivos específicos	12
1.4	Ubicación y vías de acceso	13
1.5	Antecedentes Generales	14
1.5.1	Antecedentes geológicos generales de la costa semiárida de Chile	14
1.5.2	Sedimentología holocena del fondo marino de la bahía de Guanaqueros	19
1.5.3	Contexto océano-climático actual de la costa semiárida de Chile.....	21
1.5.4	Registros de variaciones climáticas durante el Holoceno	35
1.5.5	Registros de variaciones globales del nivel del mar.....	37
1.5.6	Foraminíferos y paleoecología	39
2	Sitio y Metodología.....	47
2.1	Sitio de Estudio: Bahía de Guanaqueros.....	47
2.2	Metodología.....	48
2.2.1	El testigo marino GUK1	48
2.2.2	Preparación de muestras	52
2.2.3	Separación, identificación de especies y cuantificación.....	53
2.2.4	Registro fotográfico de alta resolución SEM	55
3	Resultados	57
3.1	Fauna de foraminíferos	57
3.2	Curvas de abundancia e interpretación paleoecológica	83
3.2.1	Familia Bolivinidae	83
3.2.2	Familia Nonionidae	86
3.2.3	Familia Cancrisidae	87
3.2.4	Familia Buliminidae	89
3.2.5	Familia Pseudoparrellidae	89
3.2.6	Familia Cassidulinidae	90
3.2.7	Familia Uvigerinidae	91
3.2.8	Familia Trichohyalidae.....	91

3.2.9	Familia Anomalinidae	92
3.2.10	Familia Bulliminellidae	93
3.2.11	Familia Cibicididae	94
3.2.12	Familia Textulariidae.....	94
3.2.13	Familia Stainforthiidae	94
3.2.14	Familia Discorbidae.....	96
3.2.15	Otras familias del orden Rotaliina.....	96
3.2.16	Orden Lagenida (Familias Lagenidae y Vaginulinidae).....	96
3.2.17	Orden Miliolida (Familia Hauerinidae).....	98
3.2.18	Síntesis.....	98
4	Discusiones.....	102
4.1	Correlación con indicadores sedimentarios de las bahías de Guanaqueros y de Tongoy 102	
4.1.1	Unidad 4 (Holoceno temprano, <i>ca.</i> 9500 – 7600 años cal. AP).....	102
4.1.2	Unidad 3 (Holoceno medio, <i>ca.</i> 7600 – 5100 años cal. AP)	103
4.1.3	Unidad 2 (Holoceno tardío, <i>ca.</i> 5100 – 500 años cal. AP)	106
4.1.4	Unidad 1 (Último siglo).....	107
4.2	Implicancias océano-climáticas	109
5	Conclusiones	115
6	Bibliografía.....	117

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación y acceso a la bahía de Guanaqueros. Tomada y modificado de http://www.guanaqueros.cl/	13
Figura 1.2 a) Contexto geotectónico de la costa semiárida de Chile. b) Contexto geomorfológico de la costa semiárida de Chile. Rasgos morfotectónicos principales y topografía de la región de Coquimbo. Tomado de Ortega (2014).....	14
Figura 1.3 Mapa geológico del área de Tongoy y Guanaqueros. Qa: Depositos aluviales; Qc: Depósitos coluviales; Qr: Regolito; TQCc: Formación Coquimbo; Jv: Formación Algarrobal; Tjt: Unidad Talinay; Jpo: Unidad Puerto Oscuro; Kg1a, Kg1b, Kg2, Kg6, Kg7: Granitoides del Cretácico temprano; Ki: Intrusivos riolitas; Pzch: Complejo Metamorfico del Choapa; Línea gruesa: falla normal Puerto Aldea. Tomado y modificado de Le Roux et al., (2006).	15
Figura 1.4 Terrazas marinas y paleocostas en el área de Tongoy. A) Mapa geomorfológico de la Bahía de Tongoy; Líneas: Azul, terraza marina T1; Amarilla, terraza marina T2; Morada, terraza marina T3; Blanca segmentada, paleocostas. B) Ubicación del mapa geomorfológico en la Bahía de Tongoy. C) Perfil topográfico GPS transversal de la bahía de Tongoy, mostrando las terrazas marinas T1, T2 y T3, paleocostas (flechas blancas) y fechas U-Th en conchillas. Tomado de Saillard <i>et al.</i> (2012).	17
Figura 1.5 Perfil batimétrico TON8 WE de la Bahía de Tongoy, de 10 km de largo aprox. La escala vertical es 10x con respecto a la horizontal. Se indica proyección submarina de Falla de Puerto Aldea, y se sugieren fallas normales secundarias ubicadas a los pies de los escarpes. Tomado de Avilés, 2016.....	18
Figura 1.6 Geomorfología general de las cuencas de Tongoy y Guanaqueros, destacándose las quebradas que llegan a las bahías. Tomado de Avilés, 2016.	19
Figura 1.7 Descripción y estructuras sedimentarias presentes (Radiografía A) en las unidades de GUK1 diferenciadas en base a la escala de grises. Además, se presentan los límites de laminación, escala de grises y mediana d(0,5). Hay baja presencia de bioturbación en las distintas unidades y gran presencia de conchillas de gran tamaño (mm). Tomado de Avilés (2016).	21
Figura 1.8 Mapa climático del norte de Chile (29-33°S). Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM), 2016.....	22
Figura 1.9 Circulación atmosférica a escala global. Modificado de Murck <i>et al.</i> (1997); Tomado de Ortega (2014).....	24
Figura 1.10 Patrón típico de Circulación de Walker. Tomado y modificado de http://cambioclimaticoenergia.blogspot.cl/	24
Figura 1.11 Influencia estacional del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (A). Promedio de los vectores de vientos superficiales entre los años 2000 y 2004 (QSCAT) sobre el Océano Pacífico Suroriental durante el verano y el invierno austral. Se observa la posición más al norte del núcleo del anticiclón, así como la mayor intensidad del chorro de viento costero en la costa semiárida (30°S), durante el invierno austral. Área de estudio se indica con un rectángulo rojo. Modificado de Garreaud y Muñoz (2004), Flores-Aqueveque <i>et al.</i> (2014), Tomado de Ortega (2014).....	25
Figura 1.12 El Niño – Oscilación del Sur. a) Condiciones EL Niño, b) Condiciones Neutras, c) Condiciones La Niña. Modificado de Cane (2005), tomado de Ortega (2014).....	27

Figura 1.13 Condiciones anómalas en el Pacífico Tropical, El Niño y La Niña convencional versus El Niño y La Niña Modoki. a) Eventos El Niño se producen cuando los vientos alisios se debilitan; algunas veces, en el oeste, los Vientos del Oeste prevalecen. Esta condición se caracteriza por temperaturas oceánicas superficiales anómalamente cálidas en el este del océano, y es asociado con alteraciones en la termoclina y en la circulación atmosférica que hace que el este más húmedo y al oeste más seco. b) El evento El Niño Modoki es una condición anómala diferente. Las aguas más cálidas ocurren en el Pacífico central, y son confinadas por aguas más frías al este y al oeste, y estarían asociadas a distintos patrones de convección atmosférica. c) y d) muestran la fase opuesta de El Niño y El Niño Modoki, respectivamente. (Ashok y Yamagata, 2009).....	28
Figura 1.14 Condiciones meteorológicas medias durante a) la fase fría y b) la fase cálida del ciclo ENOS en el Pacífico Sur y circulación asociada en plano vertical sobre el ecuador. El anticiclón subtropical A y la baja cerca del extremo occidental del Pacífico ecuatorial B se representan junto a flechas que indican la intensidad relativa de los vientos alisios y las zonas de convergencia (achuradas) intertropical (ZCIT) y del Pacífico Sur (ZCPS). En b) se incluye el esquema de teleconexión PSA en la tropósfera alta (línea de puntos) y principales anomalías en la circulación atmosférica asociadas a él. Tomado de Rutllant (2004).	29
Figura 1.15 Esquema de los principales rasgos atmosféricos (presión a nivel de mar) asociados a la ocurrencia de períodos lluviosos en Chile central, aplicable para el evento del 18 de junio de 1991 (Modificado de Rutllant y Fuenzalida, 1991; tomado de Vargas <i>et al.</i> , 2000). AB: Anticiclón de Bloqueo. APSO: Anticiclón del Pacífico Suroriental. Simbología: 1- flujo de los vientos del oeste desviado hacia el norte; 2- trayectoria aproximada de avance de sistema frontal; 3- sistema frontal frío; 4-frente cálido; 5- sistema ocluido.	30
Figura 1.16 a) Oscilación Decadal del Pacífico, temperatura superficial del mar (TSM) en color, presión a nivel del mar (PNM) contorneada. b) Índice mensual PDO durante el siglo XX. Tomado y modificado de Mantua (1997) y Mantua y Hare (2002), respectivamente.	31
Figura 1.17 Corrientes en el borde oeste de Sudamérica durante el invierno (izquierda) y verano (derecha). WWD: West Wind Drift; PCCC: Perú-Chile Countercurrent; PUC: Perú Undercurrent; PCC: Perú-Chile Current; CCC: Chile Coastal Current; CHC: Cape Horn Current. Modificado de Strub <i>et al.</i> (1998).....	32
Figura 1.18 Esquema del transporte y espiral de Ekman en la costa subtropical de Chile. Tomado de Ortega (2014).....	34
Figura 1.19 Centros de surgencia costera intensa en parte de la costa subtropical de Chile. Promedio de vientos a 10 m de altura derivados de QSCAT durante Noviembre y Diciembre entre 1999 y 2008. A) promedio para la mañana (AM) b) promedio para la tarde (PM). Se observa la mayor intensidad del chorro de viento costero durante la tarde. Tomado de Ranh <i>et al.</i> (2011).	35
Figura 1.20 Nivel relativo del nivel del mar en el último ciclo glacial según datos obtenidos en localidades australianas. Tomado de Lambeck <i>et al.</i> (2002).....	38
Figura 1.21 Esquema de foraminífero del Orden Allogromiida. Tomado de Nández y Malumián (2007).	39
Figura 1.22 Zoogeografía de América del Sur. Tomado y modificado de Boltovskoy y Wright (1976).	45
Figura 2.1 Bahía de Guanaqueros, donde se destaca la Quebrada Lagunillas. La estrella amarilla indica lugar de extracción de testigo GUK1.....	48

Figura 2.2 Fotografía y radiografía de testigo de sedimento tomado de la bahía de Guanaqueros (GUK1). Tomado de Avilés (2016).....	49
Figura 2.3 Curva de edades calculadas para GUK1 mediante exceso de ²¹⁰ Pb considerando una tasa de sedimentación de 0,067 cm/año.....	50
Figura 2.4 a) Bolsa de sedimento (muestra 92). b) Fracción de sedimento íntegro a analizar. c) Vaso de precipitado con sedimento en proceso de disgregación. d) Tamices utilizados (212 µm, 150 µm y 63 µm). e) Vaso de precipitado con papel filtro. f) Fracción de la muestra ya tamizada y etiquetada, camino a ser secada en el horno.....	53
Figura 2.5 Lupa Binocular electrónica OLYMPUS, bandeja de recolección de foraminíferos y pincel delgado para separación, materiales utilizados en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Muestra en proceso de separación.	54
Figura 2.6 Microscopio electrónico de Barrido, en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. En la imagen, obtención de imágenes en alta resolución mediante electrones secundarios.....	55
Figura 2.7 Esquema del funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido. Tomado de https://ssyf.ua.es/	56
Figura 2.8 Equipo Cressington Sputter Coater 108/108auto, a la derecha para el metalizado con Carbono y a la Izquierda para metalizado con oro, en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.....	56
Figuras 3.1: 1. <i>Angulogerina angulosa</i> , Vista lateral. 2. <i>Bolivina interjuncta</i> , Vista dorsal. 3. <i>Bolivina plicata</i> , Vista lateral.....	63
Figura 3.2: 1a. <i>Bolivina seminuda</i> , Vista dorsal. 1b. <i>Bolivina seminuda</i> , Vista lateral. 2. <i>Bolivina spissa</i> , Vista dorsal.....	64
Figura 3.3: 1. <i>Bolivina striatula</i> , Vista dorsal. 2. <i>Bolivina</i> sp.1, Vista dorsal. 3. <i>Bolivina</i> sp.2, Vista dorsal.....	65
Figura 3.4: 1a. <i>Buccella peruviana</i> s.l., Vista dorsal. 1b. <i>Buccella peruviana</i> s.l., Vista ventral.....	66
Figura 3.5: 1. <i>Bulimina marginata</i> , Vista lateral. 2. <i>Buliminella elegantissima</i> , Vista lateral.....	67
Figura 3.6: 1a. <i>Cancris inflatus</i> , Vista ventral. 1b. <i>Cancris inflatus</i> , Vista dorsal.....	68
Figura 3.7: 1. <i>Cassidulina auka</i> , Vista dorsal. 2a. <i>Cibicides aknerianus</i> , Vista dorsal. 2b. <i>Cibicides aknerianus</i> , Vista ventral.....	69
Figura 3.8: 1. <i>Cibicidoides lobatulus</i> , Vista dorsal. 2. <i>Cibicidoides variabilis</i> , Vista ventral. Fig. 18. <i>Cibicidoides wuellerstorfi</i> , Vista dorsal.....	70
Figura 3.9: 1. <i>Discorbis peruvianus</i> , Vista dorsal. 2a. <i>Discorbis williamsoni</i> , Vista dorsal. 2b. <i>Discorbis williamsoni</i> , Vista ventral.....	71
Figura 3.10: 1. <i>Epistominella exigua</i> , Vista dorsal. 2a. <i>Epistominella pacifica</i> , Vista dorsal. 2b. <i>E. pacifica</i> , Vista ventral.....	72
Figura 3.11: 1. <i>Epistominella</i> sp., Vista dorsal. 2a. <i>Globobulimina pacifica</i> , Vista lateral. 2b. <i>Globobulimina pacifica</i> , Vista apertural.....	73
Figura 3.12: 1a. <i>Hanzawaia boueana</i> , Vista ventral. 1b. <i>H. boueana</i> , Vista lateral. 1c. <i>H. boueana</i> , Vista dorsal.....	74
Figura 3.13: 1. <i>Lagena laevis</i> , Vista lateral. 2. <i>Lagena striata</i> , Vista lateral. 3. <i>Lagena</i> sp., Vista lateral.....	75
Figura 3.14: 1. <i>Lenticulina convergens</i> , Vista lateral. 2. <i>Melonis</i> sp., Vista lateral.....	76
Figura 3.15: 1. <i>Nonionella auris</i> , Vista ventral. 2. <i>Nonionella chiliensis</i> , Vista ventral. 3. <i>Nonionella turgida</i> , Vista umbilical.....	77

Figura 3.16: 1. <i>Nonionoides grateloupi</i> , Vista ventral. 2. <i>Quinqueloculina seminula</i> , Vista ventral. 3. <i>Stainforthia fusiformis</i> , Vista lateral.....	79
Figura 3.17: 1. <i>Textularia gramen</i> , Vista dorsal. 2. <i>Trifarina earlandi</i> , Vista lateral. 3. <i>Triloculina trigonula</i> , Vista apertural.....	80
Figura 3.18: 1. <i>Uvigerina peregrina</i> , Vista lateral. 2. <i>Uvigerina striata</i> , Vista lateral. 3. <i>Virgulinella rotundata</i> , Vista lateral.....	82
Figura 3.19 Curvas de abundancia de la familia Bolivinidae. a) Curva de <i>Bolivina seminuda</i> b) Curva de <i>B. plicata</i> c) Curva de <i>B. interjuncta</i> d) Curva de <i>Bolivina</i> sp.1. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	85
Figura 3.20 Curvas de abundancia de la familia Nonionidae. a) Curva de <i>Nonionella auris</i> b) Curva de <i>N. turgida</i> c) Curva de <i>Nonionella</i> sp.1 d) Curva de <i>Nonionoides grateloupi</i> e) Curva de <i>Pullenia</i> sp. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	87
Figura 3.21 Curvas de abundancia de las familias Cancrisidae y Buliminidae. a) Curva de <i>Cancris inflatus</i> b) Curva de <i>Bulimina marginata</i> c) Curva de <i>Globobulimina pacifica</i> . Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.....	88
Figura 3.22 Curvas de abundancia de las familias Pseudoparrellidae y Cassidulinidae. a) Curva de <i>Epistominella exigua</i> b) Curva de <i>Epistominella pacifica</i> c) Curva de <i>Cassidulina auka</i> d) Curva de <i>Cassidulina</i> sp. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.....	90
Figura 3.23 Curvas de abundancia de las familias Uvigerinidae, Trichohyalidae y Anomalinidae. a) Curva de <i>Uvigerina peregrina</i> b) Curva de <i>U. striata</i> c) Curva de <i>Buccella peruviana</i> s.l. d) Curva de <i>Hanzawaia boueana</i> e) Curva de <i>Hanzawaia</i> sp. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.....	92
Figura 3.24 Curvas de abundancia de las familias Bulliminellidae y Cibicididae. a) Curva de <i>Buliminella elegantissima</i> b) Curva de <i>Cibicides aknerianus</i> c) Curva de <i>Cibicidoides wuellerstorfi</i> d) Curva de <i>C. lobatulus</i> . Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	93
Figura 3.25 Curvas de abundancia de las familias Textulariidae (del orden Textulariida), Stainforthiidae y Discorbidae (del orden Rotaliina). a) Curva de <i>Textularia gramen</i> b) Curva de <i>Stainforthia fusiformis</i> c) Curva de <i>Discorbis peruvianus</i> d) Curva de <i>Discorbis williamsoni</i> . Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	95
Figura 3.26 Curvas de abundancia de las familias Lagenidae y Vaginulinidae (del orden Lagenida) y Hauerinidae del orden Miliolida. a) Curva de <i>Lagena striata</i> b) Curva de <i>Stainforthia Lenticulina convergens</i> c) Curva de <i>Quinqueloculina seminula</i> d) Curva de <i>Triloculina trigonula</i> . Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	97
Figura 3.27. Asociación de foraminíferos para cada unidad, con especies que alcancen un porcentaje mayor a 0,3% del total de individuos para cada unidad. Se utiliza curva de <i>Bolivina plicata</i> como referencia. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	100
Figura 3.28 Gráfico de abundancia acumulada de las especies con abundancia total superior a 3% del total de foraminíferos. Separación de Unidades mediante líneas punteadas.	101

Figura 4.1 Variabilidad cada 0,5 cm del tamaño de grano (en μm) de 4 modas distintas calculadas en el testigo GUK1, donde en rojo muestra la variación del volumen de base a techo, y en azul las variaciones del tamaño de grano. Tomado de Avilés, 201	104
Figura 4.2 Principales cambios ecológicos durante el Holoceno reflejados en las curvas de abundancia de las 4 especies más representadas. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	110
Figura 4.3 a) Escorrentía en la bahía de Tongoy (TO04). b) Intensidad de escorrentía en la bahía de Tongoy (TO04). c) Intensidad de escorrentía en la bahía de Tongoy (TK2). d) Intensidad de escorrentía en la bahía de Guanaqueros (GUK1). e) Curva de abundancia de <i>B. seminuda</i> . f) Curva de abundancia de <i>B. plicata</i> . a) y b) tomadas de Ortega <i>et al.</i> (enviado). c) y d) tomadas de Avilés (2016). Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.	113

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Dataciones mediante radiocarbono en muestras de sedimento y en muestras de conchillas de especies de foraminíferos bentónicos y planctónicos, para el testigo GUK1. Para la calibración se utilizó CALIB 7.0.4.	51
Tabla 3.1 Abundancia de las principales familias de foraminíferos encontradas en el registro sedimentario de Guanaqueros, con sus géneros y especies.	57

1 Introducción

1.1 Introducción General

La bahía de Guanaqueros se ubica en la costa semiárida de Chile (30-32°S), al sur del desierto hiperárido de Atacama. La disponibilidad de agua es muy limitada (Ortega *et al.*, 2012), y la ocurrencia de lluvias es condicionada por la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) (Ortega, 2014), concentrándose en los meses de invierno y primavera austral (Garreaud *et al.*, 2009).

La geomorfología de la bahía, costa lobulada y protegida (Araya-Vergara, 1976), ha permitido que el registro sedimentario de fondo marino se conserve casi intacto, lo que a su vez permite la realización de diversos estudios océano-climáticos (Ortega, 2014; Avilés, 2016).

Los cambios paleoclimáticos responden a fenómenos climáticos de diversas escalas (Labeyrie *et al.*, 2013), tanto en el margen oriental del Pacífico como a escala mundial. El estudio paleoclimático ha sido abordado por varios autores, que han empleado distintas metodologías para acrecentar el conocimiento que se tiene de la variación del clima desde el pasado reciente. Uno de estos métodos corresponde al estudio de foraminíferos en sedimentos provenientes de testigos de fondo marino.

Los foraminíferos corresponden a organismos protistas casi exclusivamente marinos que, dada su abundancia, extensión en el registro fósil y sensibilidad a variaciones ambientales, son considerados excelentes bioindicadores de cambios ecológicos (Boltovskoy y Wright, 1976). La mayoría de los estudios de foraminíferos realizados en nuestro país se basan en representantes bentónicos, es decir, que viven asociados al fondo marino. En base a ellos, se ha establecido que el área de estudio se encuentra ubicada en la biozona conocida como Subprovincia Norte de Chile, caracterizada por especies de aguas templadas con representantes de aguas cálidas (Boltovskoy y Wright, 1976). Trabajos sobre organismos planctónicos (que flotan en la columna de agua) son más bien escasos (Figuerola *et al.*, 2005).

En esta investigación se analiza el testigo de fondo marino GUK1 proveniente de la bahía de Guanaqueros, que fue anteriormente estudiado desde el punto de vista estratigráfico y sedimentológico (Avilés, 2016), junto con el testigo TK2 proveniente de la bahía de Tongoy, siendo datados atribuyéndolos al Holoceno. En el testigo proveniente de Guanaqueros se plantea determinar la variabilidad de la abundancia de las distintas especies de foraminíferos bentónicos. La presencia de especies planctónicas es más reducida, por lo que su estudio tanto para geocronología (al ser organismos planctónicos, anularía el efecto reservoreo en las edades obtenidas mediante isotopía de radiocarbono) como para paleoecología, queda pendiente para futuras investigaciones.

Es importante destacar que al estar contenidos en sedimentos atribuidos al Holoceno, los foraminíferos se consideran subfósiles, es decir, organismos del pasado que no han experimentado el proceso completo de fosilización. Para efectos de esta investigación, se utiliza el prefijo “Paleo” como acepción de antiguo, sin implicar necesariamente el tiempo requerido para llevar a cabo este proceso.

Esta investigación busca profundizar el conocimiento disponible sobre los cambios océano-climáticos y ecológicos ocurridos en el pasado reciente por medio del estudio de la fauna de foraminíferos presente en sedimentos asignados al Holoceno de la bahía de Guanaqueros.

1.2 Hipótesis de trabajo

En la costa semiárida de Chile han ocurrido variaciones océano-climáticas durante el Holoceno. Los cambios en la diversidad y abundancia de foraminíferos bentónicos se correlacionan con los grandes cambios océano-climáticos planteados mediante estudios oceanográficos y continentales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar las condiciones oceano-climáticas en la costa semiárida de Chile a través de estudio de foraminíferos en los sedimentos de la bahía Guanaqueros.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer un registro paleo-ecológico basado en los foraminíferos presentes en los sedimentos del fondo marino de la bahía de Guanaqueros.
- Contrastar las variaciones paleo-ecológicas detectadas a partir de los foraminíferos con los estudios sedimentológicos de la bahía de Guanaqueros
- Determinar la relación entre las variaciones paleo-ecológicas y los procesos océano-climáticos que afectan la costa semiárida de Chile

1.4 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio corresponde a la bahía de Guanaqueros, zona costera entre los 30°12'00'' y 30°06'00'' S, ubicada en la IV región de Coquimbo, a 35 km aproximadamente al sur de Coquimbo. Pertenece a la Provincia del Elqui, Comuna de Coquimbo.

La principal ruta de acceso corresponde a la ruta 5 (Carretera Panamericana), tomando el enlace a Guanaqueros 18 kilómetros más al norte del acceso a Tongoy. La entrada consta de una plaza de peaje a la que sigue un camino pavimentado de aproximadamente 4 Kilómetros (Figura 1.1).



Figura 1.1 Ubicación y acceso a la bahía de Guanaqueros. Tomada y modificado de <http://www.guanaqueros.cl/>

1.5 Antecedentes Generales

1.5.1 Antecedentes geológicos generales de la costa semiárida de Chile

La bahía de Guanaqueros se ubica en la parte más septentrional de la llamada costa semiárida de Chile, que se extiende entre los 30 y 32° S, inmediatamente al sur del desierto de Atacama (Figura 1.2a). Esta zona se localiza en el segmento morfotectónico de la cordillera de Los Andes (entre los 27,5 y 33°S) conocido como *flat slab*, que se caracteriza por un bajo ángulo de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, cercano a 10° (Cahill e Isacks, 1992). Esto se asocia a un fuerte acoplamiento interplaca, una corteza continental muy comprimida y ausencia de volcanismo cuaternario en la región (Pardo *et al.*, 2002), que se explicaría por la subducción asísmica de la dorsal de Juan Fernández (Yañez *et al.*, 2002; Le Roux *et al.*, 2005a; Le Roux *et al.*, 2005b, Charrier *et al.*, 2007). Sin embargo, datos geotérmicos y resultados reológicos que describen la partición entre los regímenes frágil y dúctil de la corteza indicarían que la Zona de Wadati-Benioff en esta región no sería plana (Muñoz *et al.*, 2005).

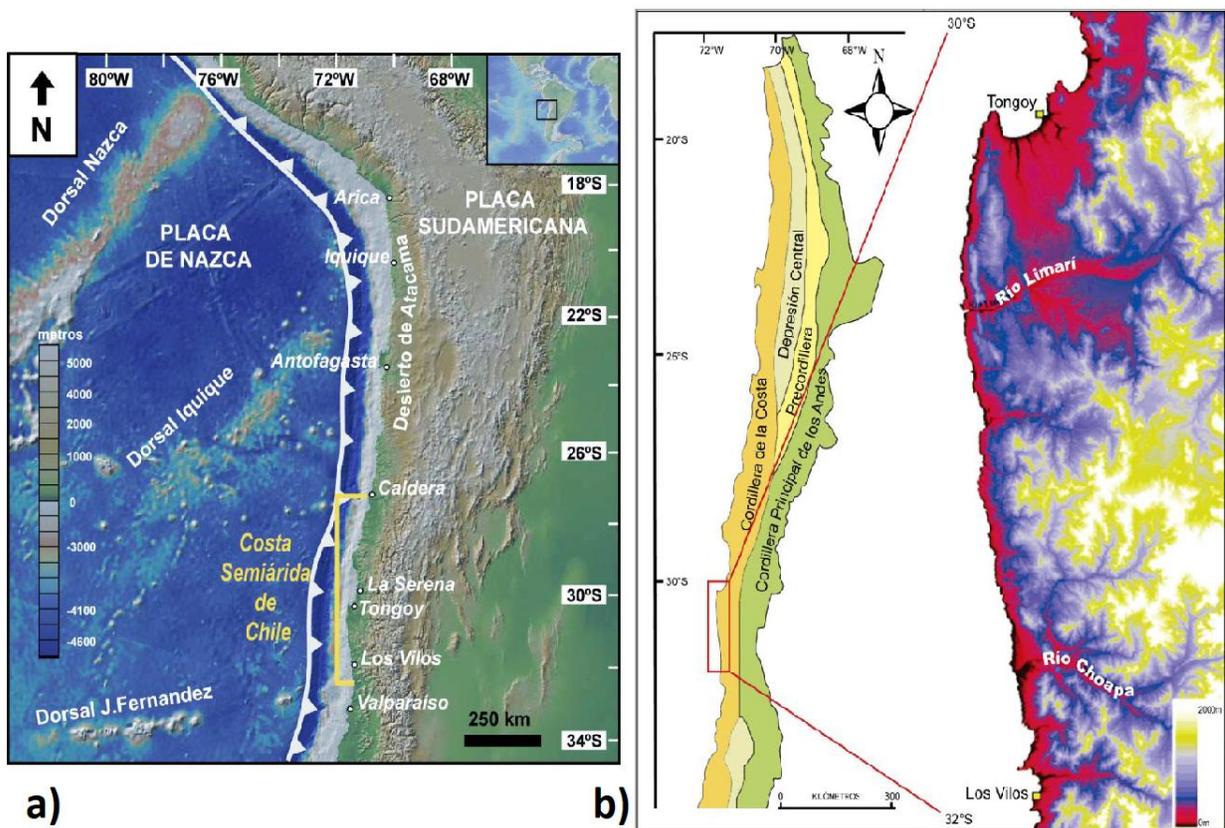


Figura 1.2 a) Contexto geotectónico de la costa semiárida de Chile. b) Contexto geomorfológico de la costa semiárida de Chile. Rasgos morfotectónicos principales y topografía de la región de Coquimbo. Tomado de Ortega (2014).

Esta área también se caracteriza por la ausencia total de Depresión Intermedia, rasgo morfotectónico presente tanto en la zona norte como en la zona central de Chile. Dada esta ausencia, la Cordillera de la Costa toma contacto con la Cordillera de los Andes, siendo la transición entre ellas un drástico aumento de elevación topográfica (Figura 1.2b). De esta forma, al oeste la Cordillera de la Costa limita con la Planicie Costera, franja estrecha compuesta por una serie de plataformas marinas, mientras que, al este, la topografía alcanza mayor altura en el área conocida como Cordillera Media, llegando incluso a los 3.200 m de altura aprox. (Paskoff, 1970; Ota *et al.*, 1995).

La cordillera de la costa se constituye en su parte occidental por basamento paleozoico sedimentario y metamórfico, mientras que en su parte oriental afloran rocas volcano-sedimentarias mesozoicas, ambas partes intruídas por una faja plutónica mesozoica con orientación norte-sur, cuyas edades aumentan hacia el este (Figura 1.3; Rivano y Sepúlveda, 1991; SERNAGEOMIN, 2003; Emparán y Pineda, 2006; Rodríguez *et al.*, 2013). Las rocas del borde occidental de la Cordillera afloran formando extensiones hacia el mar con orientación norte-sur, protegiendo las bahías de la zona, como lo son la Punta Lengua de Vaca en la Bahía de Tongoy y la Punta Guanaqueros en la bahía de Guanaqueros, formadas por la Unidad Talinay y Unidad Puerto, respectivamente (Figura 1.3; Le Roux *et al.*, 2006).

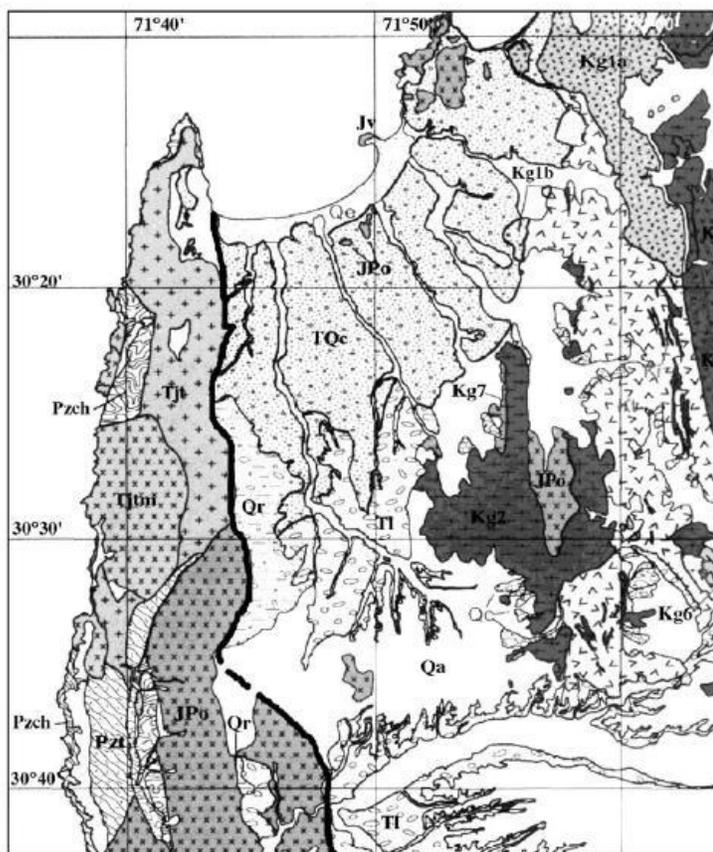


Figura 1.3 Mapa geológico del área de Tongoy y Guanaqueros. Qa: Depositos aluviales; Qc: Depósitos coluviales; Qr: Regolito; TQc: Formación Coquimbo; Jv: Formación Algarrobal; Tjt: Unidad Talinay; Jpo: Unidad Puerto Oscuro; Kg1a, Kg1b, Kg2, Kg6, Kg7: Granitoides del Cretácico temprano; Ki: Intrusivos riolitas; Pzch: Complejo Metamórfico del Choapa; Línea gruesa: falla normal Puerto Aldea. Tomado y modificado de Le Roux *et al.*, (2006).

Al interior de los valles principales y bordeando la costa se expone una cubierta sedimentaria cenozoica. En los valles principales, estos sedimentos son de origen continental y corresponden a gravas fluviales no consolidadas y a brechas aluviales de la Formación Confluencia (Paskoff, 1970; Rivano y Sepúlveda, 1991), que conforman terrazas fluviales de depositación de edad mio-pliocena, las que se han visto modificadas por pedimentación cuaternaria (Rodríguez *et al.*, 2013). Por su parte, en la costa los depósitos son de origen marino y corresponden a lutitas, areniscas, coquinas y calizas de la Formación Coquimbo (Moscoso *et al.*, 1982; Emparán y Pineda, 2006; Le Roux *et al.*, 2006), que constituyen terrazas de abrasión marina pleistocenas (Paskoff, 1970; Ota *et al.*, 1995; Benado, 2000; Saillard *et al.*, 2009; Saillard *et al.*, 2012). Ambas formaciones se inter-digitan, por lo que se interpreta que corresponden a un cambio lateral de un ambiente continental a uno marino (Emparán y Pineda, 2006; Le Roux *et al.*, 2006). Se ha determinado, mediante dataciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en conchillas marinas, que la Formación Coquimbo fue depositada durante una serie de transgresiones y regresiones relacionadas a movimientos tectónicos tanto locales como regionales, junto con variaciones eustáticas del nivel del mar durante un extenso período, entre los *ca.* 11 y 1,2 Ma en el área de Tongoy (Le Roux *et al.*, 2006). La Formación Confluencia no posee datos geocronológicos, pero se ha asumido una edad miocena a pleistocena basada en su interdigitación con la Formación Coquimbo (Emparán y Pineda, 2006).

Respecto al desarrollo tectónico, las principales estructuras geológicas presentes en la costa semiárida corresponden, de norte a sur, a las fallas El Romeral, Puerto Aldea, Quebrada del Teniente, y Silla del Gobernador, las que se orientan generalmente en dirección NNO-SSE a NNE-SSO (Rodríguez *et al.*, 2013) y conformarían la extensión sur del Sistema de Fallas de Atacama (Arabasz, 1971) denominado Segmento El Romeral–La Silla del Gobernador (Charrier *et al.*, 2007). Este sistema de fallas controla la geomorfología de la Cordillera de la Costa en gran parte del norte de Chile (Riquelme *et al.*, 2003). Particularmente, en la zona de tongoy-Altos de Talinay, Le Roux *et al.* (2006), mediante dataciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de conchillas marinas, indicaron que la falla Puerto Aldea habría controlado la depositación de la Formación Coquimbo mediante movimientos normales e inversos. Esto concordaría con las reactivaciones normales e inversas del Sistema de Fallas de Atacama en el Norte Grande de Chile desde el Cenozoico tardío (Delouis *et al.*, 1998; Riquelme *et al.*, 2003; Allmendinger y González, 2010).

Las plataformas costeras han sido estudiadas exhaustivamente en el área de Altos de Talinay, donde se ha definido una sucesión de 5 plataformas (Paskoff, 1970; Ota *et al.*, 1995; Benado, 2000; Saillard, 2008; Saillard *et al.*, 2009; Saillard *et al.*, 2012): T_I a 425 ± 15 , T_{II} a 170 ± 20 , T_{III} a 55 ± 5 , T_{IV} a 25 ± 3 y T_V a 6 ± 1 m s.n.m. (Figura 1.4; Saillard *et al.*, 2009). Estas terrazas han sido asignadas, mediante edades de exposición de superficie de ^{10}Be , al estadio isotópico marino (MIS) 17, al sub-estadio isotópico (MISS) 9c, MISS7e, MISS5e y MIS1, respectivamente (Saillard *et al.*, 2009). Según Ota *et al.* (1995), la falla de Puerto Aldea habría afectado solo a las terrazas más altas, T_I y T_{II}. Más tarde, Saillard *et al.* (2009) indicaron que estas terrazas evidencian desplazamientos normales tanto de la falla Puerta Aldea como de Quebrada del Teniente.

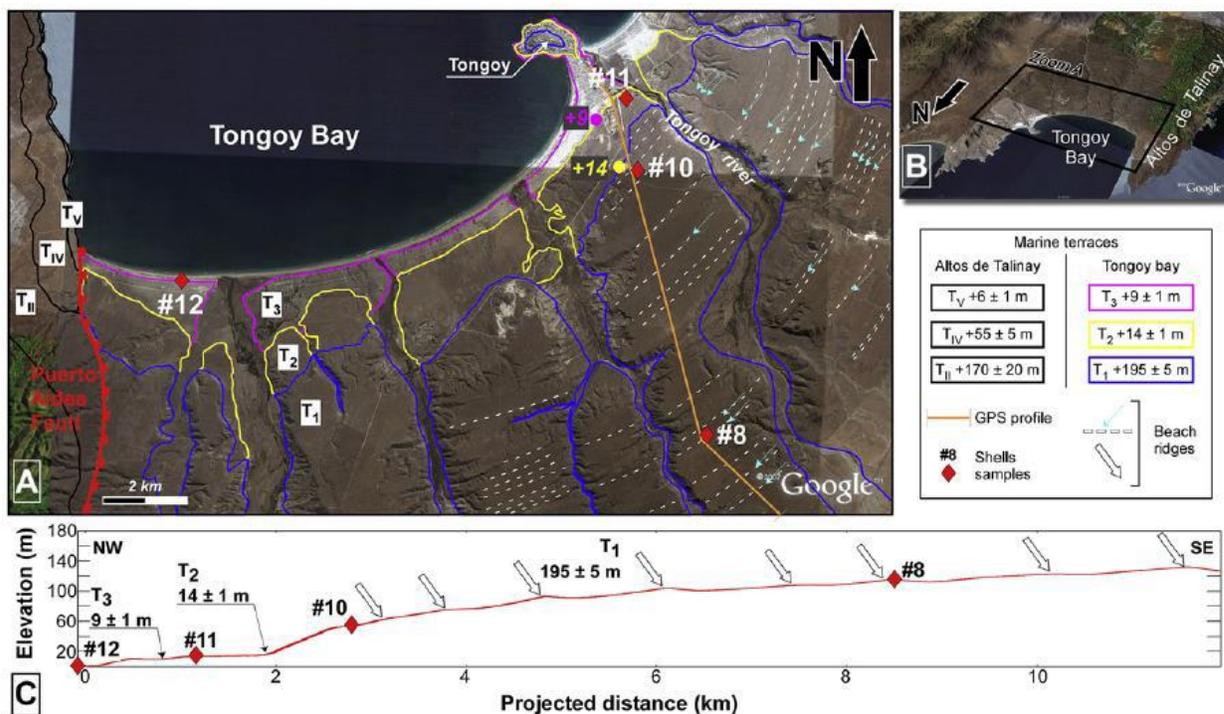


Figura 1.4 Terrazas marinas y paleocostas en el área de Tongoy. A) Mapa geomorfológico de la Bahía de Tongoy; Líneas: Azul, terraza marina T1; Amarilla, terraza marina T2; Morada, terraza marina T3; Blanca segmentada, paleocostas. B) Ubicación del mapa geomorfológico en la Bahía de Tongoy. C) Perfil topográfico GPS transversal de la bahía de Tongoy, mostrando las terrazas marinas T1, T2 y T3, paleocostas (flechas blancas) y fechas U-Th en conchillas. Tomado de Saillard *et al.* (2012).

En la bahía de Tongoy están preservados tres niveles de terrazas marinas: T₃, T₂ y T₁, cuyas elevaciones corresponden a 9 ± 1 , 14 ± 1 y 195 ± 5 m s.n.m., respectivamente (Figura 1.4; Paskoff, 1970 y 1999; Benado, 2000; Saillard, 2008, Saillard *et al.*, 2012). Estas terrazas estarían lateralmente conectadas con las terrazas marinas de Altos de Talinay: T₃ y T₂ estarían asociadas a T_V y T_{IV}, respectivamente, y T₁ estaría conectada de manera menos clara a T_{II} (Saillard 2008; Saillard *et al.*, 2009). En la bahía de Tongoy, la terraza T₁ ha preservado sucesivas paleocostas que habrían resistido la erosión debido a la temprana cementación del depósito fosilífero calcáreo, que recibe el nombre de calcreta (Thomas, 1958; Pfeiffer *et al.*, 2011).

Basado en edades U-Th datadas en conchillas marinas, $94,5 \pm 1,5$ ka en T₂ y 411 ± 170 y 361 ± 77 ka en T₁, se ha concluido que el área de Tongoy y Altos de Talinay se habrían convertido en un bloque rígido al menos desde el Pleistoceno medio, en algún momento entre 230–320 ka, por lo que la Falla Puerto Aldea no habría tenido actividad detectable desde entonces (Saillard *et al.*, 2012). Sin embargo, Avilés (2016) identificó, mediante perfiles batimétricos, escarpes morfológicos que dislocan el fondo marino al norte de la plataforma continental de la bahía de Tongoy, lo que sugiere fallas normales secundarias producto del reacondicionamiento de los estratos a reactivaciones normales de la Falla Puerto Aldea, por lo que dicha falla tendría una prolongación submarina y una actividad reciente a escala del Cuaternario tardío (Figura 1.5).

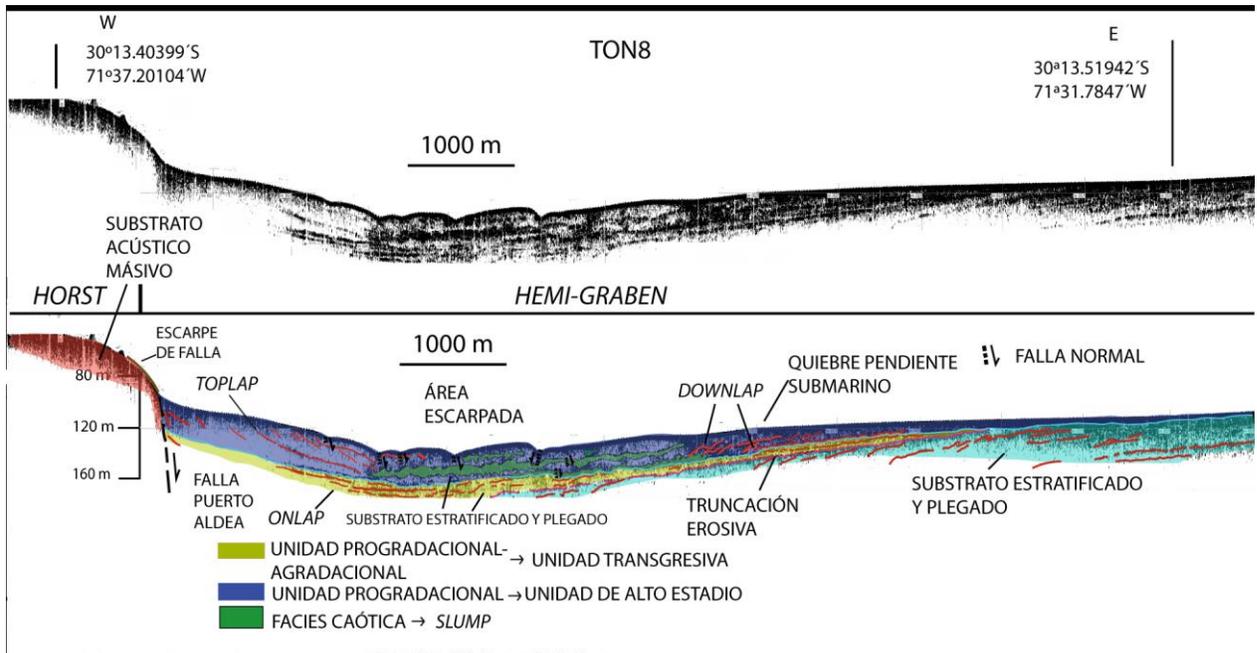


Figura 1.5 Perfil batimétrico TON8 WE de la Bahía de Tongoy, de 10 km de largo aprox. La escala vertical es 10x con respecto a la horizontal. Se indica proyección submarina de Falla de Puerto Aldea, y se sugieren fallas normales secundarias ubicadas a los pies de los escarpes. Tomado de Avilés, 2016.

Finalmente, la geomorfología de las costas en esta área corresponde a un sistema de cuencas-bahía con forma de anfiteatro, descritas como costas lobuladas y protegidas (Araya-Vergara, 1976) que reciben sedimentos desde su respectiva hoya hidrográfica a través de diversas quebradas. Particularmente, la bahía de Guanaqueros se encuentra protegida por Punta Guanaqueros, y su hoya hidrográfica tiene una superficie aproximada de 500 km². La mayoría de las quebradas que llegan a su cuenca son cortas y poco profundas, destacándose solo la Quebrada Lagunillas por su gran extensión, a diferencia de la cuenca de la Bahía de Tongoy, que presenta una mayor cantidad de quebradas más largas y profundas (Figura 1.6).

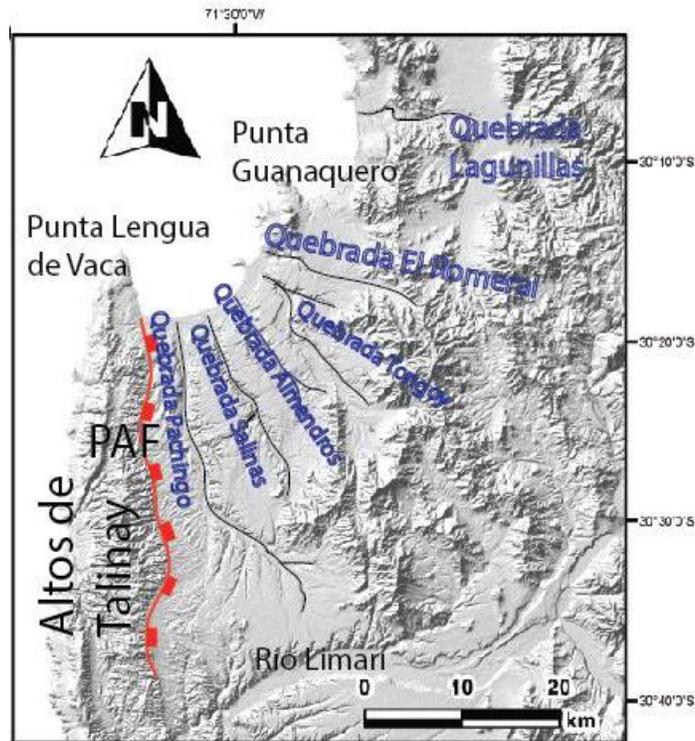


Figura 1.6 Geomorfología general de las cuencas de Tongoy y Guanaqueros, destacándose las quebradas que llegan a las bahías. Tomado de Avilés, 2016.

1.5.2 Sedimentología holocena del fondo marino de la bahía de Guanaqueros

Avilés (2016) realizó un estudio sedimentológico de los testigos marinos TK2 y GUK1 obtenidos en las bahías de Tongoy y Guanaqueros, respectivamente, pudiendo definir distintas unidades en cada testigo. Las unidades 1, 2 y 3 están presentes en ambos testigos, y se caracterizan por una sedimentación hemipelágica con influencia detrítica dada por flujos aluvionales esporádicos de alta energía, que arrastrarían líticos encausados en las quebradas presentes en las hoyas hidrográficas de las bahías, y que se hacen más frecuentes durante eventos de El Niño. Además, los importantes flujos de restos biogénicos encontrados en el fondo de las bahías se explican dada la gran productividad primaria provocada por los eventos de surgencia costera que caracterizan a ambas bahías.

Respecto a la Bahía de Guanaqueros en particular, se definieron en total 4 unidades (Figura 1.7):

La **unidad 4** (desde los 100 a los 73 cm) se asigna al Holoceno temprano (*ca.* 9500-7500 años AP) en base a la cronología de ^{14}C , es la unidad con mayor tamaño de grano (mayoritariamente arena fina) y presenta un mayor tamaño y porcentaje de conchillas que disminuye hacia el techo. Se interpreta como una transición entre un ambiente con hidrodinámica litoral somera (ambiente infralitoral submareal) a uno de sedimentación hemipelágica (ambiente

de plataforma) que se mantiene por todo el resto del registro sedimentario por el alto estadio global post-Último máximo Glacial desde los 7 ka AP (Lambeck et al., 2002).

La **unidad 3** (desde los 73 a los 43 cm) se asigna al Holoceno medio (*ca.* 7500-5500 años AP), presenta el menor tamaño de grano (mayoritariamente limo medio) y notorias y múltiples laminaciones, lo que sugiere una sedimentación rítmica por posibles periodos con variaciones en la surgencia y productividad primaria asociada, típica de ambientes hipóxicos a anóxicos. La sedimentación hemipelágica de un ambiente profundo con un menor aporte detrítico se relacionaría con las condiciones tipo La Niña que han sido sugeridas por registros paleoclimáticos previos (Vargas *et al.*, 2006), caracterizada por un clima de sequía en la costa semiárida del Norte de Chile para el Holoceno medio. Esta unidad se correlaciona con la **unidad 3** de TK2, la cual no presenta laminaciones.

La **unidad 2** (desde los 43 a los 6 cm), correspondiente al Holoceno tardío (*ca.* 5500 años AP al último siglo), es mayoritariamente arena muy fina en su base disminuyendo el tamaño de grano hacia el techo (limo grueso). Registra un aumento del tamaño y porcentaje de minerales que se mantiene hasta el techo del testigo desde los 5500 a 5300 años cal AP, lo que sugiere un cambio hidrológico a escala milenial. Este abrupto cambio se interpreta como una mayor frecuencia de flujos detríticos de gran energía, los cuales arrastran minerales detríticos desde el continente hasta asentarse en el fondo marino. Estos datos concuerdan con registros paleoclimáticos previos que postulan que en el Holoceno tardío aumentaría la frecuencia de lluvias intensas asociadas al comienzo del evento de El Niño como se conoce hoy en día (Rodbell *et al.*, 1999; Jenny *et al.*, 2002; Vargas *et al.*, 2006), lo que ocasionaría una mayor frecuencia de flujos aluvionales que llegarían hasta el fondo marino. Esta unidad se correlaciona con la **unidad 2** de TK2, la cual registra un abrupto aumento del tamaño de grano.

La **unidad 1** (desde los 6 cm al techo), asignada al último siglo (datado a través de exceso de ^{210}Pb), registra un aumento gradual del tamaño de grano de la mediana $d(0,5)$ con respecto a la unidad 2, desde los 6 cm (base) hasta los 3,5 cm para luego disminuir el tamaño de grano al techo. Esto indicaría que el tamaño de lúcticos arrastrados al fondo marino sería mayor, al menos, desde el último siglo. Esto podría relacionarse con lo propuesto con Ortlieb *et al.* (2002), quienes indicaron un cambio en el patrón de teleconexión trópico-extratropical del Pacífico Sur relacionados a ENSO que habría ocurrido abruptamente desde el 1817 CE. Esta unidad se correlaciona con la **unidad 1** de TK2, la cual presenta un aumento gradual del tamaño y porcentaje de la moda 2 secundaria desde los 6 a los 4 cm, y luego mantiene este tamaño de grano hasta el techo.

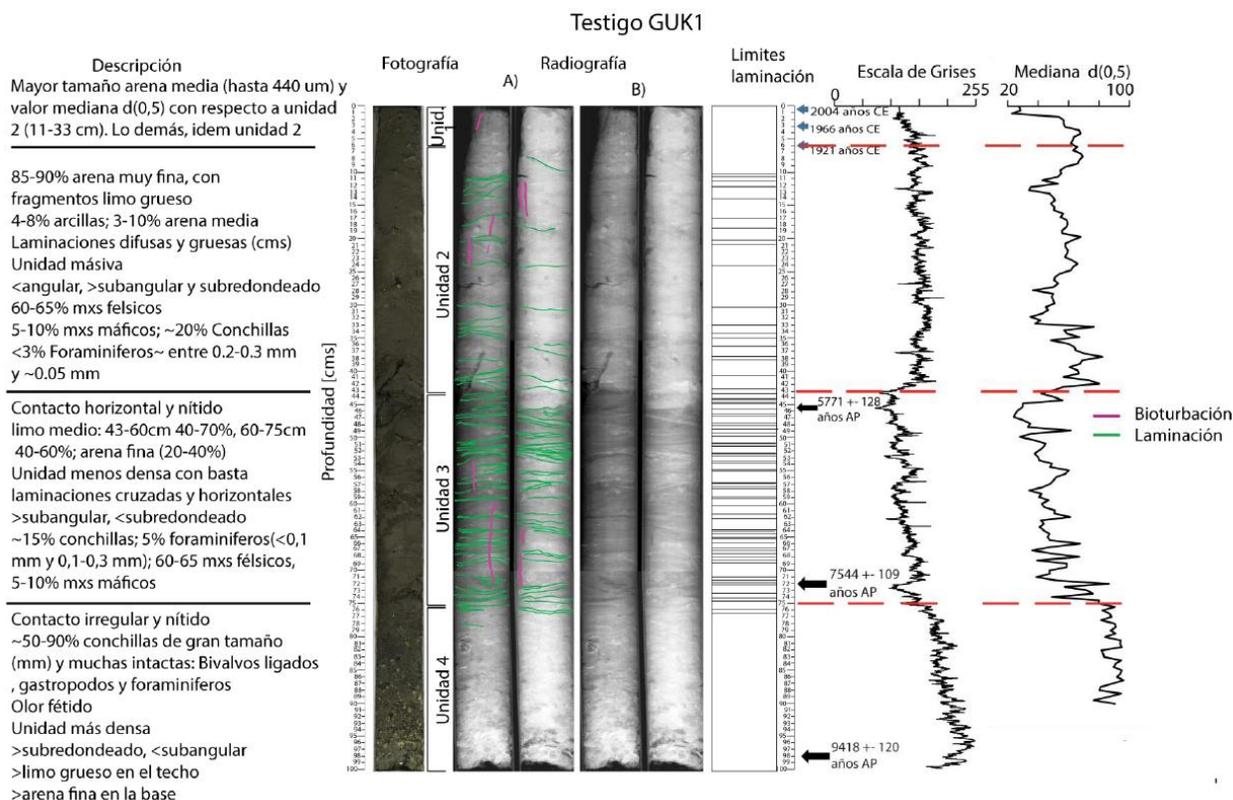


Figura 1.7 Descripción y estructuras sedimentarias presentes (Radiografía A) en las unidades de GUK1 diferenciadas en base a la escala de grises. Además, se presentan los límites de laminación, escala de grises y mediana d(0,5). Hay baja presencia de bioturbación en las distintas unidades y gran presencia de conchillas de gran tamaño (mm). Tomado de Avilés (2016).

1.5.3 Contexto océano-climático actual de la costa semiárida de Chile

El clima de las costas de Chile entre los 30 y 32°S se describe como un clima semiárido o de estepa, donde predomina un régimen hidrológico con déficit de humedad durante gran parte del año, con periodos de lluvias esporádicas durante los meses de invierno y primavera austral (Garreaud *et al.*, 2009). Este clima se encuentra gobernado tanto por factores atmosféricos como oceanográficos, como lo son el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS), los Vientos del Oeste, los Vientos Alisios y la Corriente Fría de Humboldt. A estos factores se suma la influencia de las características topográficas de la costa.

1.5.3.1 Clima y meteorología actual de la costa semiárida de Chile.

El clima de la costa semiárida de Chile (30-32°S) corresponde a un clima de transición entre el clima hiperárido de Atacama y el clima mediterráneo de la zona central de Chile (Figura 1.8), con una limitada disponibilidad de agua que depende de la ocurrencia de lluvias esporádicas que se concentran durante el invierno y la primavera austral (Garreaud *et al.*, 2009). Estos frentes se vuelven más intensos y recurrentes durante las fases cálidas de El Niño Oscilación del Sur

(ENSO: El Niño-Southern Oscillation), que resulta del debilitamiento del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (ASPS), además de la mayor frecuencia y/o persistencia de anticiclones de bloqueo localizados al suroeste de Sudamérica producto del patrón de teleconexión trópico-extratropical Pacífico-América del Sur (PSA: Pacific South America), asociado a ENSO (Rutllant y Fuenzalida, 1991; Mo y Higgins, 1998; Curtis y Adler, 2003; Ortega *et al.*, 2012).

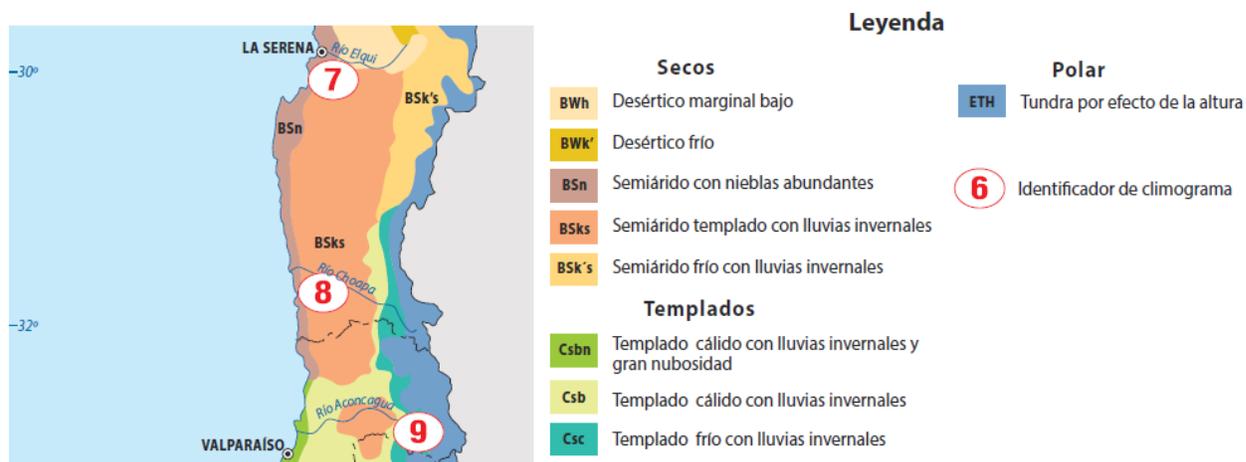


Figura 1.8 Mapa climático del norte de Chile (29-33°S). Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM), 2016.

Según datos obtenidos por la Dirección meteorológica de Chile (DMC) en 2015, la temperatura media anual fue de 14,4°C con una temperatura media máxima anual de 18,8°C y una mínima media anual de 11,5°C, mientras que las precipitaciones alcanzaron los 111 mm anuales. La evapotranspiración potencial anual alcanza los 351 mm (CIREN, 1990). Las precipitaciones muy rara vez exceden el 50% de la evapotranspiración potencial, lo que ocurriría solo en años lluviosos asociados a eventos de El Niño.

El principal efecto del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (ASPS) sobre el clima de la costa semiárida de Chile es bloquear la influencia de masas de aire cargadas de humedad provenientes de latitudes más altas. Por otro lado, la Corriente fría de Humboldt (impulsada por la circulación atmosférica, particularmente los vientos alisios) modera el régimen térmico, limitando de esta manera la formación de nubes que podrían generar precipitación. Además, los vientos del oeste en los años de debilitamiento del ASPS permiten que se potencie la surgencia costera, haciendo que el agua cálida superficial se desplace al oeste y el agua fría profunda ascienda, lo que provoca una disminución de humedad y por tanto periodos más secos (Ruddiman, 2009).

La topografía de la costa de norte y centro de Chile permite encausar los vientos que son impulsados hacia el norte por el Anticiclón Subtropical (Strub *et al.*, 1998), además de permitir el ingreso de masas de aire marino hacia los valles en las zonas donde la Cordillera de la Costa desaparece, mientras que en zonas de mayor altitud aumenta la influencia de neblina costera.

El anticiclón Subtropical del Pacífico Sur genera también una estabilidad atmosférica que favorece la persistencia de estratocúmulos sobre el mar, lo que ocurriría principalmente durante la primavera austral (Rutllant *et al.*, 1998; Garreaud, 2009). La cubierta de nubes forma parte de

una capa límite marina, fría y húmeda sobre el Pacífico Suroriental, que es contenida por una inversión térmica intensa y persistente que se origina por el contraste térmico entre la fría superficie del mar con el aire más tibio sobre ella (Garreaud *et al.*, 2001). Esta inversión térmica se ve reforzada por las temperaturas superficiales de las aguas más bajas y temperaturas del aire más cálidas de lo normal al acercarse a los 30°S, lo que da lugar a una cubierta de nubes aún más persistente y a una mayor frecuencia de neblina costera, como se observa en el Parque Nacional Fray Jorge (Garreaud *et al.*, 2009). Este patrón de anomalías guarda similitud con las que ocurren durante la fase fría de ENSO, por lo que años de La Niña están asociados a una mayor frecuencia de Camanchaca, mientras que años de El Niño a una menor frecuencia de neblina (Garreaud *et al.*, 2009).

1.5.3.2 *Circulación atmosférica a gran escala*

Los patrones de circulación de masas de agua superficiales en los océanos y los patrones de circulación de masas de aire en la atmósfera guardan una estrecha relación, siendo las primeras conducidas tanto por los patrones de circulación atmosféricos como por la forma de las cuencas oceánicas. La circulación oceanográfica frente a la costa semiárida de Chile se encuentra influenciada por dos patrones de circulación atmosféricos, como lo son los vientos alisios en las latitudes bajas y los vientos del oeste en las latitudes medias, además de la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (ASPS).

La circulación atmosférica se origina como respuesta a la diferencia de radiación solar que recibe la superficie terrestre. El movimiento de las masas de aire genera celdas de convección (Figura 1.9), en donde aire cálido y húmedo cercano a la superficie asciende dada su menor densidad, comienza a enfriarse, precipita y desciende como aire frío y seco. En las zonas donde ocurre la convergencia en altura y descenso de aire frío y seco se producen núcleos de altas presiones donde los vientos divergen en superficie. Por efecto de la rotación de la tierra, en el hemisferio sur los vientos que divergen de los centros de altas presiones lo hacen en una rotación de sentido antihorario. El centro de altas presiones frente a la costa semiárida se conoce como **Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (ASPS)**, que es producto del descenso de aire relativamente seco proveniente de la parte alta de la nubosidad asociada a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), patrón de circulación conocido como Celda de Hadley, en donde aire seco diverge en altura en dirección a los polos y, a su vez, a menor altura el aire converge hacia el ecuador. La rotación antihorario del ASPS permite que los vientos tengan un movimiento hacia el ecuador encausados por la orografía a lo largo de la costa subtropical del continente (Strub *et al.*, 1998). El permanente descenso de aire relativamente seco que caracteriza al ASPS es la principal responsable de la extrema aridez al norte de la zona de estudio, ya que inhibe la formación de nubosidad encargada de generar precipitaciones. De esta forma, el anticiclón subtropical permite una gran estabilidad atmosférica en gran parte del borde occidental del continente.

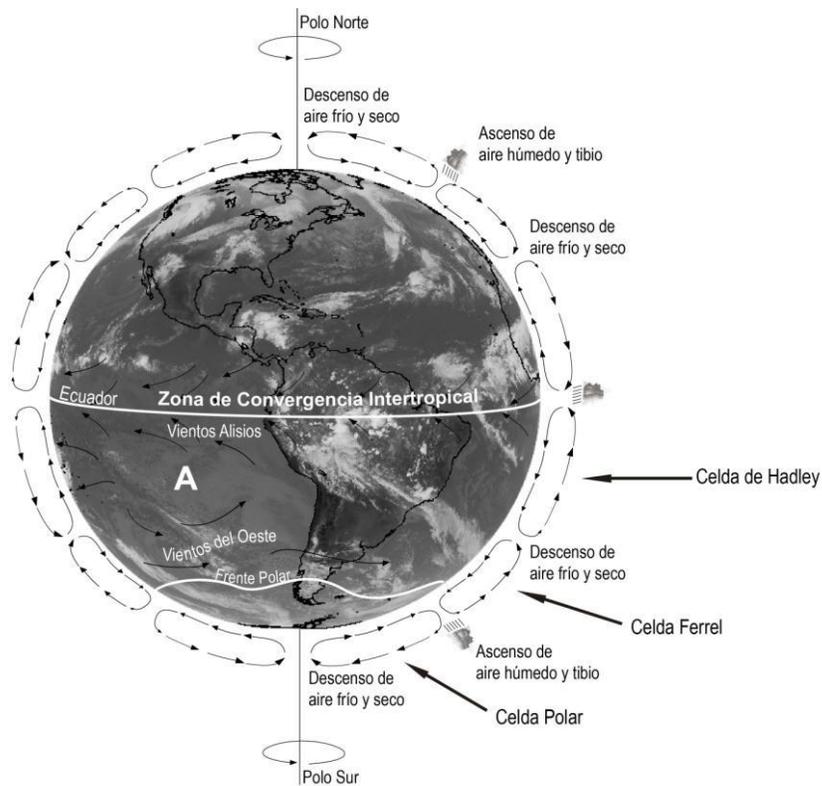


Figura 1.9 Circulación atmosférica a escala global. Modificado de Murck *et al.* (1997); Tomado de Ortega (2014).

Sumado a lo anterior, el flanco norte del anticiclón Subtropical toma contacto con vientos que van en dirección oeste, conocidos como **vientos alisios**. Estos vientos corresponden a la rama descendente de la circulación de Walker (Figura 1.10) sobre el Pacífico ecuatorial oriental. La circulación de Walker es una circulación atmosférica de carácter latitudinal, que se desarrolla sobre el Pacífico ecuatorial y consiste en un movimiento convectivo en el cual un flujo se dirige hacia el oeste en superficie (vientos alisios) para luego ascender en el Pacífico ecuatorial occidental, donde el flujo tomaría una dirección hacia el este en niveles altos de la tropósfera, para finalmente volver a descender a lo largo de la zona ecuatorial al este de la zona de ascenso.

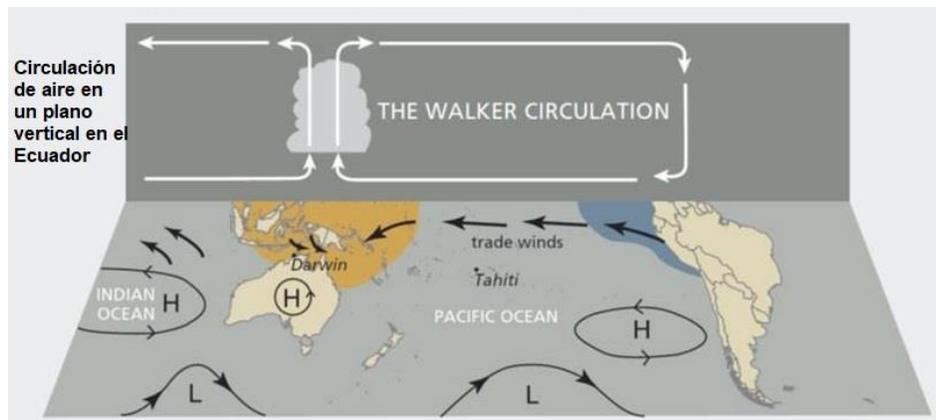


Figura 1.10 Patrón típico de Circulación de Walker. Tomado y modificado de <http://cambioclimaticoenergia.blogspot.cl/>

A su vez, en su flanco sur, el Anticiclón Subtropical interactúa con los **vientos del oeste**, los que se desplazan de oeste a este en latitudes medias, que son producidos por una fuerte disminución de las presiones con isóbaras que se orientan en dirección este-oeste. Este rasgo atmosférico favorece el desarrollo de sistemas frontales desde el oeste conduciéndolos hacia las costas de Chile. La interacción entre estos dos sistemas, vientos del oeste y Anticiclón Subtropical del Pacífico, produce un desplazamiento estacional; durante el verano austral la influencia del ASPS alcanza en promedio los 38°S, mientras que durante el invierno austral su influencia solo alcanza los 28°S (Figura 1.11. Fuenzalida, 1982). De esta forma, durante el verano austral el Anticiclón subtropical no permite el ingreso de sistemas frontales provenientes del oeste hacia las costas del norte y centro de Chile, siendo las precipitaciones casi inexistentes durante los meses de verano. Por el contrario, como la influencia del Anticiclón Subtropical se desplaza hacia el norte durante el invierno austral, permitiría el ingreso de sistemas frontales hacia las costas del norte y centro de Chile, lo que concentra los periodos de lluvias durante los meses de invierno. De esta forma, la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, y su interacción con el cinturón de vientos del oeste, rige el ciclo anual de lluvias en la costa semiárida y central de Chile, concentrándolas durante el invierno y siendo casi inexistentes en el verano (Fuenzalida, 1982).

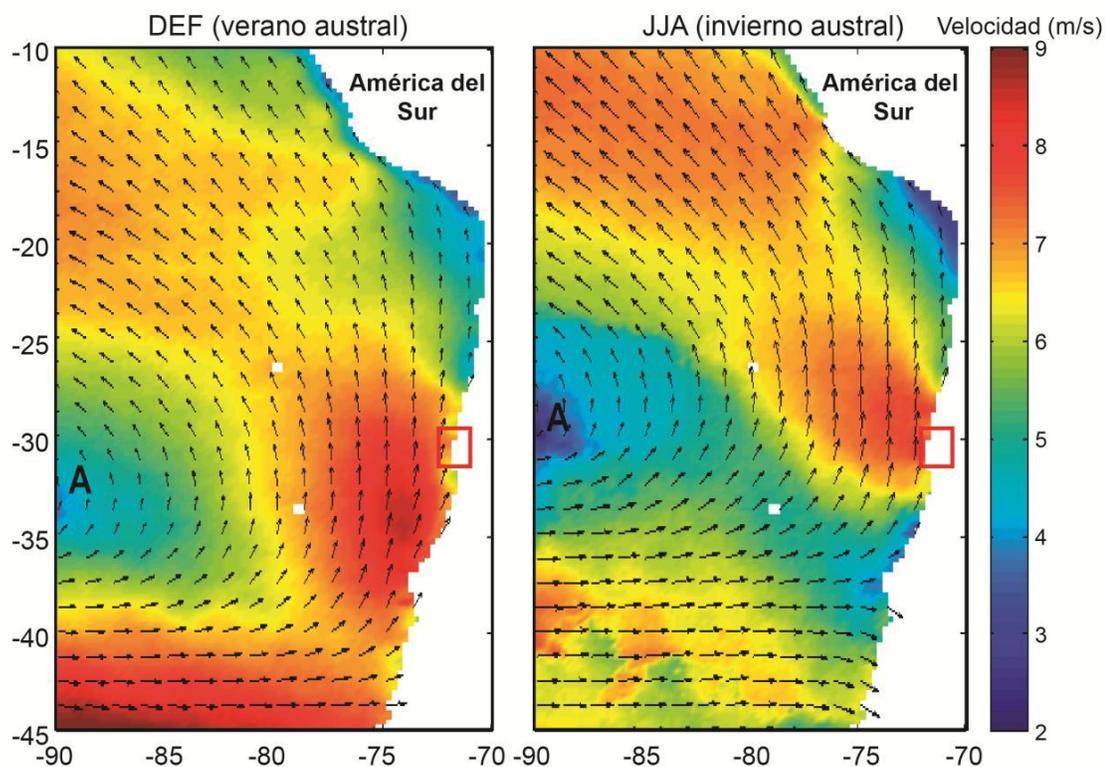


Figura 1.11 Influencia estacional del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (A). Promedio de los vectores de vientos superficiales entre los años 2000 y 2004 (QSCAT) sobre el Océano Pacífico Suroriental durante el verano y el invierno austral. Se observa la posición más al norte del núcleo del anticiclón, así como la mayor intensidad del chorro de viento costero en la costa semiárida (30°S), durante el invierno austral. Área de estudio se indica con un rectángulo rojo. Modificado de Garreaud y Muñoz (2004), Flores-Aqueveque *et al.* (2014), Tomado de Ortega (2014).

1.5.3.3 *El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y Oscilación Decadal del Pacífico*

Cada 2 a 7 años aproximadamente, fuertes eventos de lluvias capaces de generar inundaciones y aluviones ocurren durante el invierno y primavera austral, y afecta a toda la costa semiárida del norte de Chile. Este fenómeno se asocia a la fase cálida de **El Niño Oscilación del Sur** (El Niño-Southern Oscillation, ENSO), modo oscilatorio del sistema acoplado océano-atmósfera del Océano Pacífico tropical, que interrumpe la circulación normal en el Océano Pacífico y provoca años más lluviosos en el borde occidental del continente.

Esta oscilación del sistema océano-atmosférico en el Pacífico Ecuatorial se produce debido al contraste de temperatura oceánica superficial y de presión entre ambos extremos del Océano Pacífico, parte occidental y parte oriental, lo que conlleva una retroalimentación positiva pese a recibir la misma cantidad de radiación solar en estas latitudes (Bjerknes, 1969; Cane, 2005). De esta manera, se reconocen 2 fenómenos que modifican las condiciones normales de circulación del Pacífico Ecuatorial, como lo son los fenómenos de El Niño y La Niña, que corresponden a las fases cálida y fría de ENSO, respectivamente (Figura 1.12):

- Durante años de **condiciones normales o neutras** (Figura 1.12b), el clima de la costa semiárida de Chile es gobernado por la circulación atmosférica antes descrita (ASPS, vientos alisios y del oeste), además de la acción de corrientes marinas que provocan el fenómeno de surgencia costera, donde masas de agua cálidas superficiales son desplazadas mar adentro y masas de agua frías profundas son alzadas, lo que provoca un enfriamiento de la costa. Por otro lado, los vientos alisios conducen masas de agua superficiales cálidas hasta el Pacífico Occidental donde se acumulan, generando mayor humedad y precipitación en Australia e Indonesia. El aire pierde humedad y asciende, desplazándose a gran altura hacia el este, contribuyendo a que el borde del continente se mantenga en condiciones frías y secas.
- Durante el **fenómeno de El Niño** (Figura 1.12a), el extremo oriental del Pacífico comienza a calentarse debido a la disminución de la surgencia ecuatorial, lo que provoca el hundimiento de la termoclina exponiendo aguas más cálidas. La disminución de la surgencia es producida por el debilitamiento de los vientos alisios debido al menor contraste de temperatura superficial del océano, lo que conlleva una menor presión en el Pacífico Occidental que en el Oriental (Cane, 2005). La exposición de aguas cálidas aumenta la carga de vapor de agua en la atmósfera, lo que determina que los años de El Niño sean años más lluviosos de lo normal.
- Durante el **fenómeno de La Niña** (Figura 1.12c), el mayor contraste de temperatura y, por tanto, la mayor presión sobre el extremo Occidental produce que los vientos alisios se intensifiquen. Esto provoca que la surgencia costera aumente, lo que alza la termoclina exponiendo aguas frías en el Pacífico oriental, por lo que comienza a enfriarse. El ascenso de aguas frías no permite el traspaso de vapor de agua a la atmósfera, por lo que los años de La Niña sean más secos de lo normal.

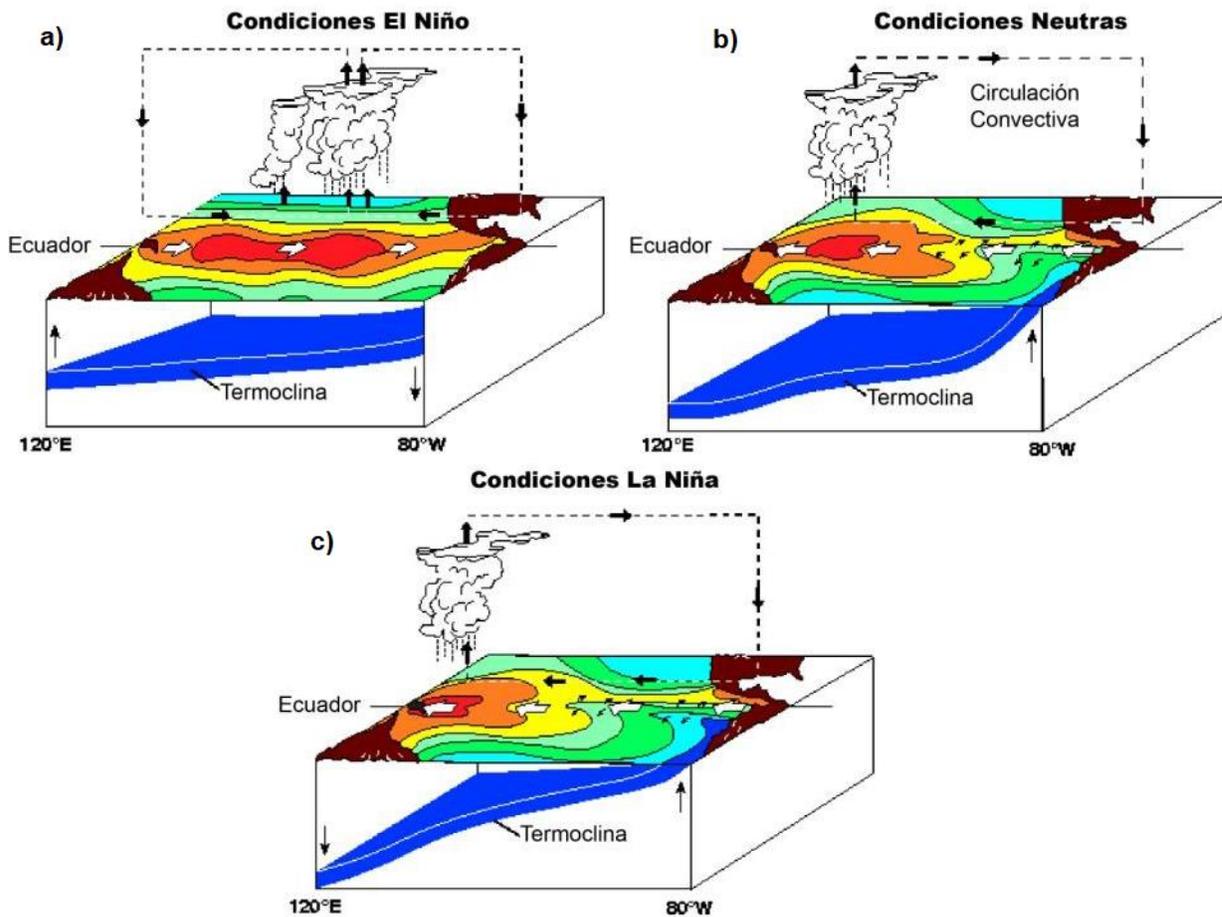


Figura 1.12 El Niño – Oscilación del Sur. a) Condiciones EL Niño, b) Condiciones Neutras, c) Condiciones La Niña. Modificado de Cane (2005), tomado de Ortega (2014).

Para definir las condiciones de El Niño, La Niña y periodos de Condiciones normales se han creado diversos índices. Uno de estos índices es el **Índice de Oscilación del Sur (SOI)**, que se basa en las diferencias de presión a nivel del mar entre la isla de Tahiti en la Polinesia Francesa y la ciudad de Darwin en Australia (Chen, 1982). Valores negativos sostenidos de SOI indican condiciones El Niño, mientras que los valores positivos sostenidos indican condiciones La Niña. Por otro lado, el **índice Océano El Niño (ONI)** se basa en la anomalía de temperatura superficial del mar (TSM) registrada en una región del Pacífico Ecuatorial (5°S a 5°N y 170°W a 120°W) conocida como Niño 3.4. Se utiliza como período base el rango comprendido entre los años 1971 a 2000 y los datos se obtienen con el método de medias móviles aplicado a periodos de tres meses. Para calcular este índice, se utiliza la temperatura perteneciente al banco de datos Extended Reconstructed Sea Surface Temperatura (ERSST.v2) del National Climatic Data Center de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Valores mayores o iguales a +0.5°C durante 3 meses continuos indican condiciones de El Niño, valores menores a -0,5°C indican condiciones de La Niña y los valores intermedios indican Condiciones Neutras.

El aumento de temperatura oceánica superficial en el Pacífico central registrado durante los últimos años, que estaría limitado por el enfriamiento al este y oeste, ha permitido plantear un nuevo tipo de fenómeno del Pacífico Tropical que difiere de El Niño convencional o El Niño Pacífico oriental. Este nuevo fenómeno ha recibido el nombre de El Niño Modoki, Pseudo el Niño, El Niño Central o El Niño Pacífico Central (Figura 1.13) y se ha observado desde fines de los 70 (Ashok *et al.*, 2007). El aumento de temperatura en el Pacífico central estaría asociado a distintos patrones de convección atmosférica (e.g. Ashok y Yamagata, 2009; Yu y Giese, 2013). Se ha propuesto que el aumento de la frecuencia de condiciones Modoki están relacionadas con el calentamiento global, y si el calentamiento global aumenta, se espera que estos eventos en el Pacífico central ocurran con mayor frecuencia (Yeh *et al.*, 2009).

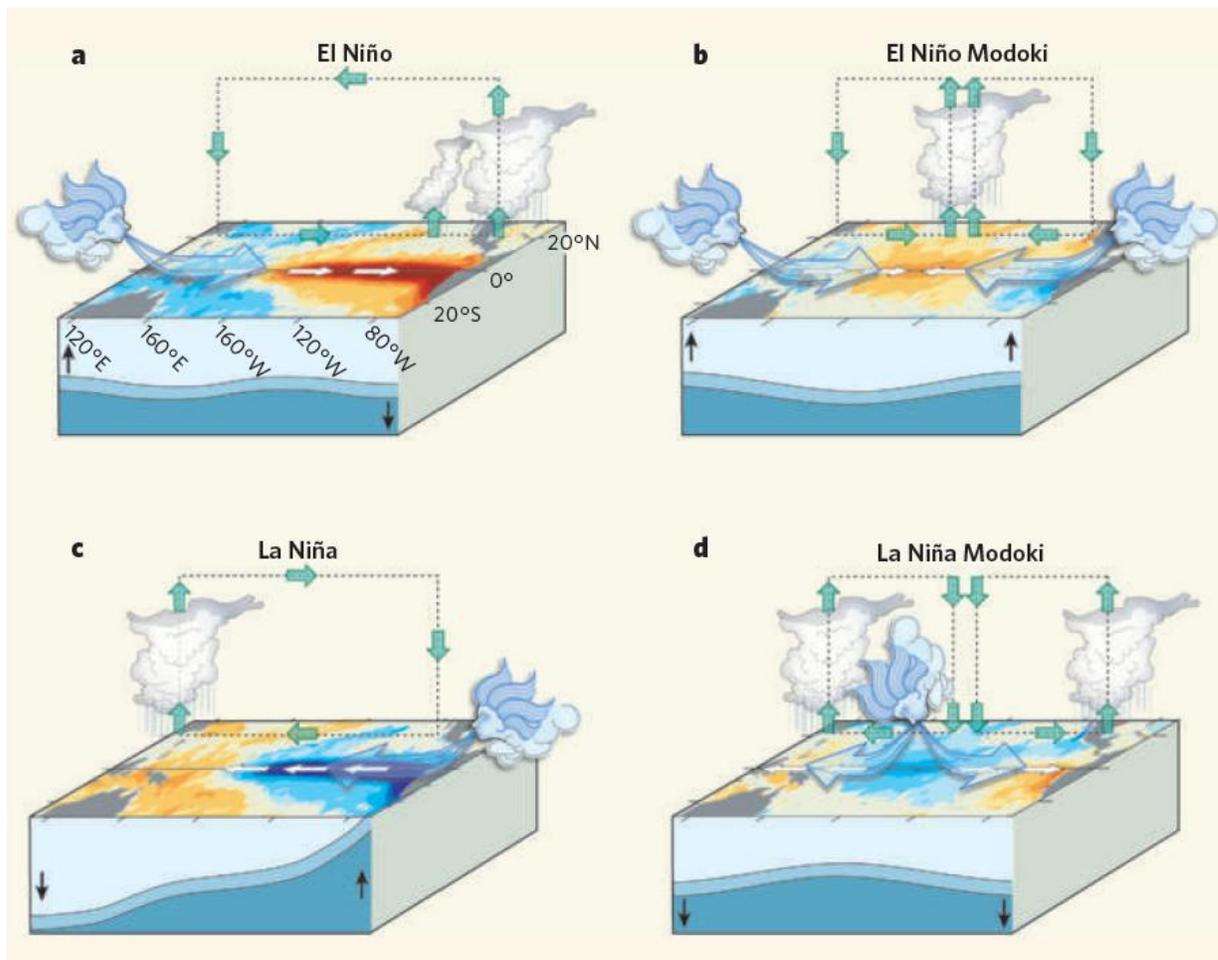


Figura 1.13 Condiciones anómalas en el Pacífico Tropical, El Niño y La Niña convencional versus El Niño y La Niña Modoki. a) Eventos El Niño se producen cuando los vientos alisios se debilitan; algunas veces, en el oeste, los Vientos del Oeste prevalecen. Esta condición se caracteriza por temperaturas oceánicas superficiales anómalamente cálidas en el este del océano, y es asociado con alteraciones en la termoclina y en la circulación atmosférica que hace que el este más húmedo y al oeste más seco. b) El evento El Niño Modoki es una condición anómala diferente. Las aguas más cálidas ocurren en el Pacífico central, y son confinadas por aguas más frías al este y al oeste, y estarían asociadas a distintos patrones de convección atmosférica. c) y d) muestran la fase opuesta de El Niño y El Niño Modoki, respectivamente. (Ashok y Yamagata, 2009).

En la costa subtropical del Chile, el fenómeno de El Niño genera el debilitamiento del Anticiclón Subtropical de Pacífico Suroriental y, en respuesta a un patrón de **teleconexión trópico-extratropical PSA** en la tropósfera alta originado en la convección anómala sobre el Pacífico ecuatorial central (Figura 1.14), también se produce la persistencia o alta frecuencia de anticiclones de bloqueo al oeste de la Península Antártica (Rutllant, 2004), conduciendo la trayectoria de las tormentas hacia latitudes menores de las habituales y permitiendo la ciclogénesis e incursiones de estos frentes a lo largo de la costa central y semiárida de Chile (Rutllant y Fuenzalida, 1991; Montecinos y Aceituno, 2003).

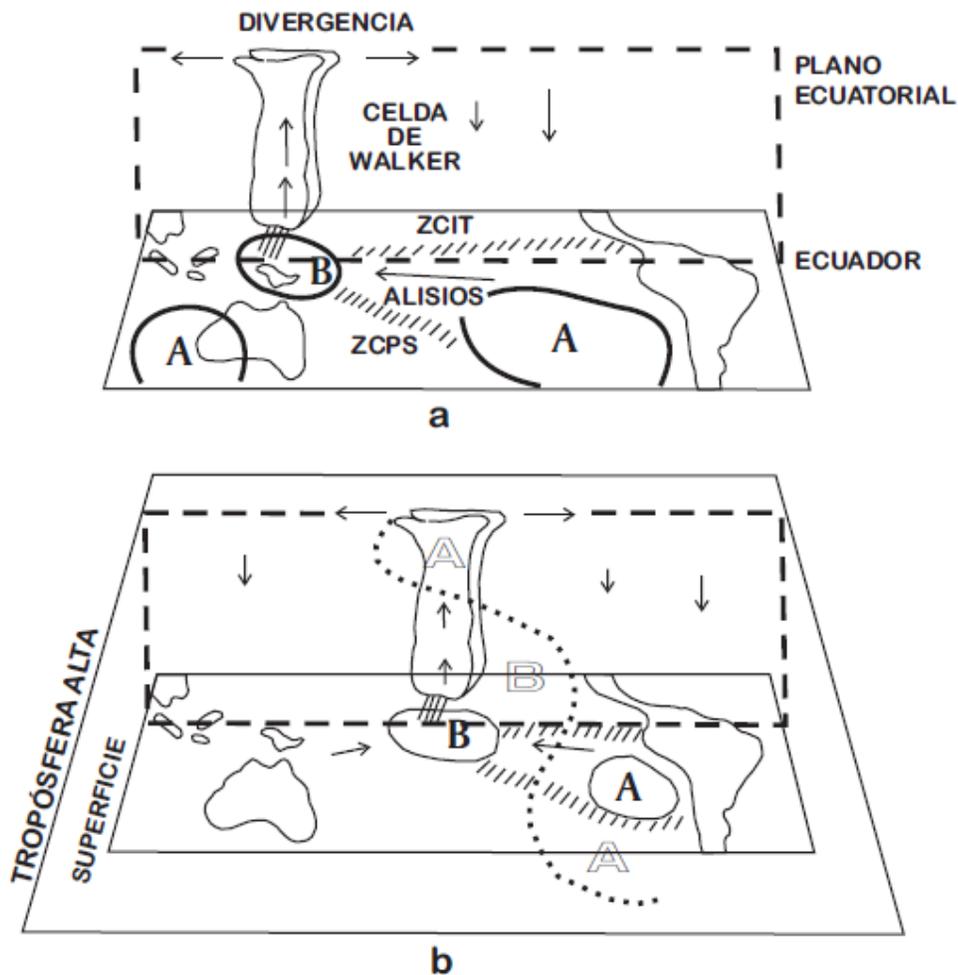


Figura 1.14 Condiciones meteorológicas medias durante a) la fase fría y b) la fase cálida del ciclo ENOS en el Pacífico Sur y circulación asociada en plano vertical sobre el ecuador. El anticiclón subtropical A y la baja cerca del extremo occidental del Pacífico ecuatorial B se representan junto a flechas que indican la intensidad relativa de los vientos alisios y las zonas de convergencia (achuradas) intertropical (ZCIT) y del Pacífico Sur (ZCPS). En b) se incluye el esquema de teleconexión PSA en la tropósfera alta (línea de puntos) y principales anomalías en la circulación atmosférica asociadas a él. Tomado de Rutllant (2004).

Los eventos anómalos de lluvias que han ocurrido muy ocasionalmente en el norte de Chile en conexión con El Niño se han explicado por la combinación de una debilitada inversión de subsidencia (anticiclón más débil) sumado al episódico calentamiento del océano costero. Esto genera un estado de inestabilidad atmosférica potencial que permitiría, junto a corrientes en chorro hacia el norte de Chile, el alcance de las incursiones frontales originadas en las latitudes medias (Vargas *et al.*, 2000; 2006). Este mecanismo produce fuertes tormentas convectivas, como las registradas en Antofagasta durante el año 1991 (Figura 1.15; Garreaud y Rutllant, 1996; Vargas *et al.*, 2000).

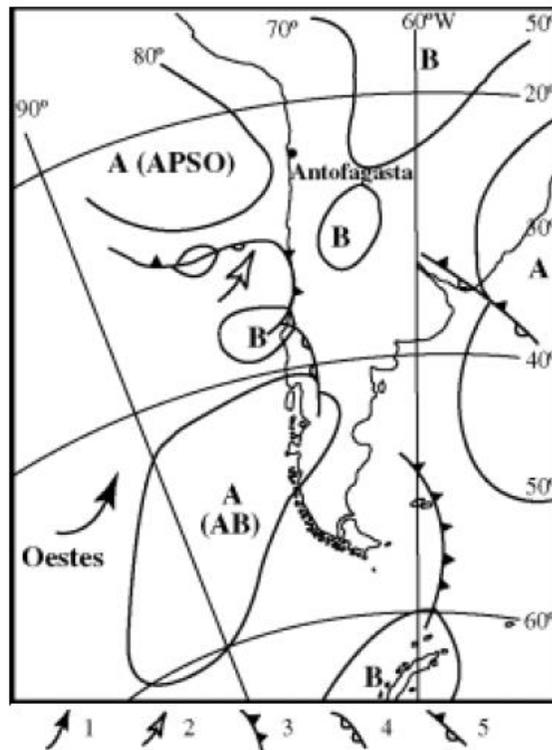


Figura 1.15 Esquema de los principales rasgos atmosféricos (presión a nivel de mar) asociados a la ocurrencia de períodos lluviosos en Chile central, aplicable para el evento del 18 de junio de 1991 (Modificado de Rutllant y Fuenzalida, 1991; tomado de Vargas *et al.*, 2000). AB: Anticiclón de Bloqueo. APSO: Anticiclón del Pacífico Suroriental. Simbología: 1- flujo de los vientos del oeste desviado hacia el norte; 2- trayectoria aproximada de avance de sistema frontal; 3- sistema frontal frío; 4- frente cálido; 5- sistema ocluido.

Además de la variabilidad climática a escala interanual que introduce ENSO en las costas de Chile y Perú, datos recopilados a nivel global evidencian un patrón de variabilidad a escala decadal sobre gran parte del Océano Pacífico, que incide sobre el clima de manera similar a ENSO, denominado variabilidad tipo ENSO (Mantua *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 1997; Garreaud y Battisti, 1999). Esta **Oscilación Decadal del Pacífico** (Pacific Decadal Oscillation, PDO) (Figura 1.16a) tiene como índice PDO la componente principal de la variabilidad mensual de la temperatura superficial del Océano Pacífico Norte, al norte de la latitud 20°N para el período comprendido entre los años 1900 y 1993 (Mantúa *et al.*, 1997). Se han identificado 2 ciclos de la

PDO en el siglo XX, el primero con una prevalencia de la fase fría desde 1890 a 1924 y una prevalencia de la fase cálida desde 1925 a 1946; y la segunda con una prevalencia de fase fría desde 1947 a 1976 y una prevalencia de fase cálida desde 1977 hasta fines de los años 90 (Figura 1.16b). Se ha sugerido que la PDO corresponde al patrón global tipo ENSO en el Pacífico Norte (Power et al., 1999; Folland, 2002). Diversos autores han observado un aumento en las precipitaciones en el borde occidental de Sudamérica desde los años 70 (Garreaud *et al.*, 2009; Quintana y Aceituno, 2012), lo que podría relacionarse con el cambio de polaridad (de frío a cálido) de la PDO, sumado al debilitamiento de ASPS y el aumento de la prevalencia de condiciones El Niño. Hasta el día de hoy, las causas de las condiciones ENSO y tipo ENSO, al igual que el vínculo entre ellas, son aún desconocidas.

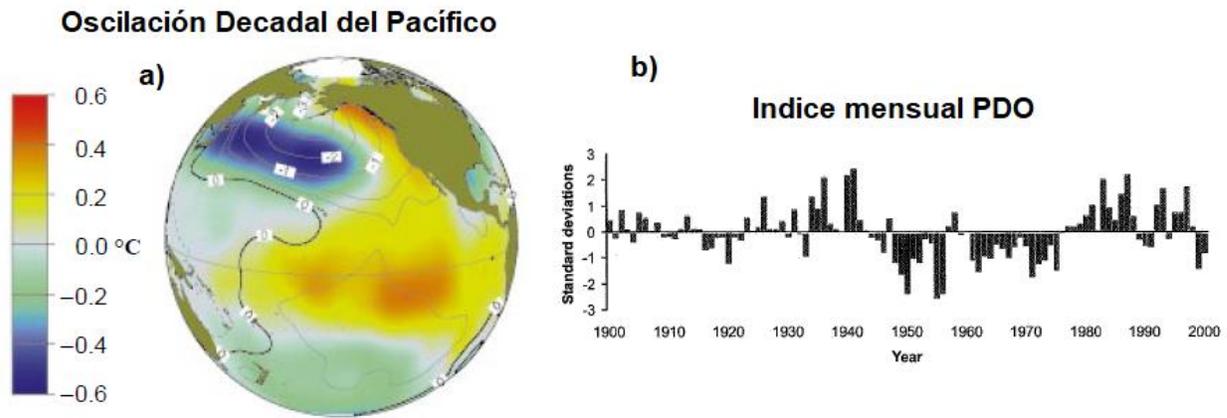


Figura 1.16 a) Oscilación Decadal del Pacífico, temperatura superficial del mar (TSM) en color, presión a nivel del mar (PNM) contorneada. b) Índice mensual PDO durante el siglo XX. Tomado y modificado de Mantua (1997) y Mantua y Hare (2002), respectivamente.

1.5.3.4 Circulación oceanográfica a gran escala

La circulación de masas de agua frente a la costa del Norte y Centro de Chile es conducida principalmente por los vientos alisios (Montecino y Lange, 2009), y forma parte de un gran sistema de corrientes marinas conocido como **Sistema de Corriente de Humboldt** (Figura 1.17), que se extiende por más de 1000 kilómetros mar adentro.

En el norte y centro de Chile, las principales masas de agua que circulan (Figura 1.17), según Strub et al., (1998), son:

- Agua Subtropical Superficial (*Subtropical Surface Water*; STW) ($T > 18,5^{\circ}\text{C}$; $S > 34,9$). Se encuentra a una profundidad entre 12-35 m junto a la costa, siendo más fría y menos salina que la masa de agua frente a Perú.
- Agua Ecuatorial Subsuperficial (*Equatorial Subsurface Water*; ESSW) ($8,5^{\circ}\text{C} < T < 10,5^{\circ}\text{C}$; $34,4 < S < 34,8$). Se encuentra en las regiones costeras, entre 300-700 m de profundidad. La “Contracorriente del Perú” (*Perú Undercurrent* o *Poleward*

Undercurrent; PUC), con características similares a esta corriente y concentraciones de oxígeno extremadamente bajas (<0,25-0,5 ml/l), a menudo alcanza la superficie costera debido a procesos de surgencia.

- Aguas Subantárticas (*Subantarctic Water*; SAAW) ($11,5^{\circ}\text{C} < T < 14,5^{\circ}\text{C}$; $34,1 < S < 34,8$). Se encuentra a 20-50 m de profundidad continuo a la costa, y a mayor profundidad hacia el océano.
- Aguas Intermedias Antárticas (*Antarctic Intermediate Water*; AAIW) ($T \approx 5,5^{\circ}\text{C}$; $34,3 < S < 34,5$). Circula a 500-600 m de profundidad, acercándose en ocasiones a la superficie durante períodos de fuerte surgencia.

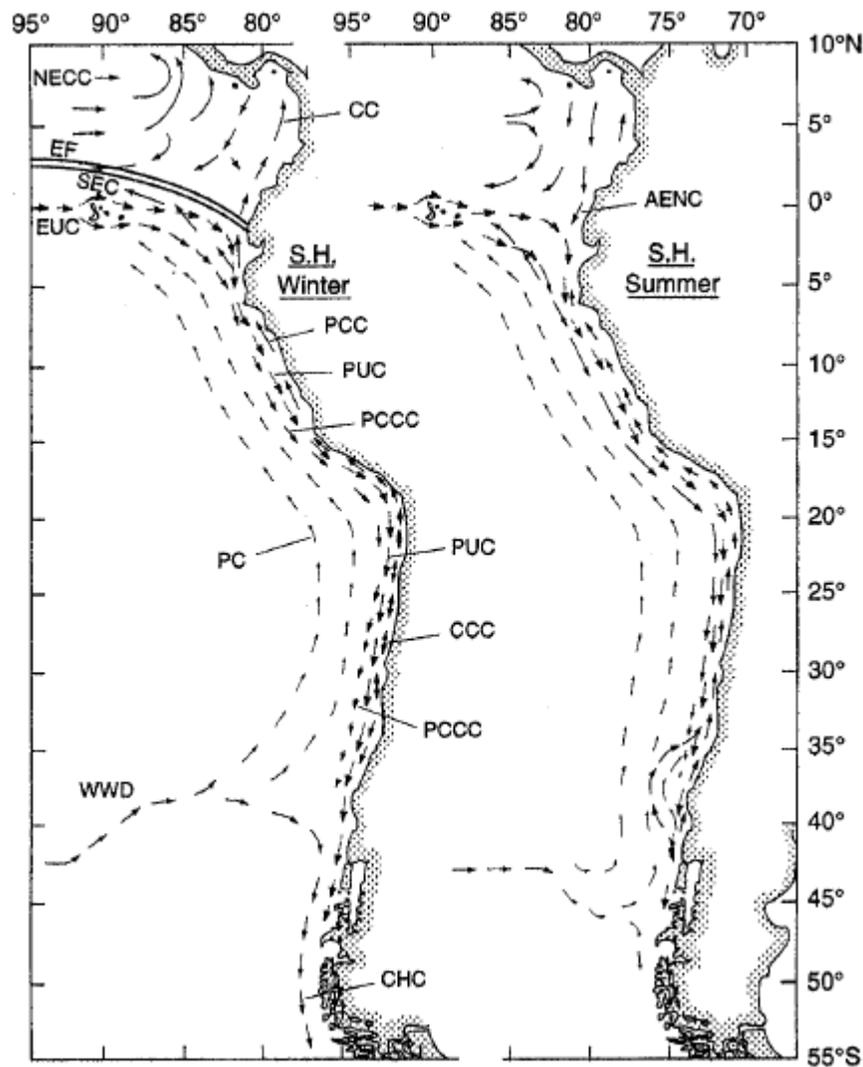


Figura 1.17 Corrientes en el borde oeste de Sudamérica durante el invierno (izquierda) y verano (derecha). WWD: West Wind Drift; PCCC: Perú-Chile Countercurrent; PUC: Perú Undercurrent; PCC: Perú-Chile Current; CCC: Chile Coastal Current; CHC: Cape Horn Current. Modificado de Strub *et al.* (1998).

Las corrientes marinas que se desplazan hacia el norte a lo largo de la costa de Chile provienen de la “Corriente de la Deriva del Oeste” (*West-Wind Drift*, WWD) o “Corriente Circumpolar Antártica”, que mueve masas de agua fría en dirección Oeste en las latitudes medias. Al acercarse a la costa, esta corriente se divide en dos ramas: una corriente hacia el Ecuador conocida como “Corriente de Perú-Chile” (*Perú-Chile Current*, PCC) o “Corriente de Humboldt”; y otra corriente hacia el Polo Sur conocida como “Corriente de Cabo de Hornos” (*Cape Horn Current*, CHC) (Strub *et al.*, 1998). Por su parte, la Corriente de Perú-Chile (PCC) también se divide en dos: una corriente que circula próxima a la costa denominada “Corriente Costera” (*Chile Coastal Current*, CCC), asociada a los sistemas de surgencia costeros; y la Corriente de Perú-Chile propiamente tal (Perú-Chile Current; PCC), que circula a mayor distancia de la costa y por lo tanto tiene poco efecto sobre las corrientes costeras.

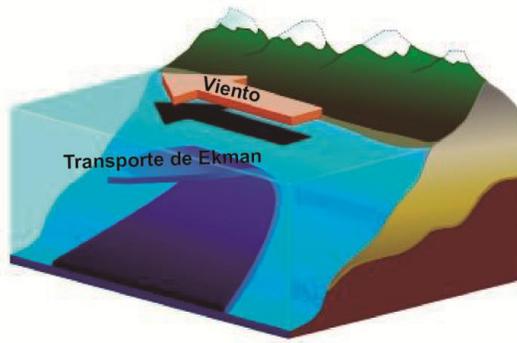
Por otro lado, la circulación bajo superficie frente a las costas de Perú y norte de Chile es predominantemente un flujo que se dirige hacia el sur desde latitudes más bajas. Se reconocen dos corrientes subsuperficiales con dirección sur: la “Contracorriente de Perú-Chile” (*Perú-Chile Countercurrent*, PCCC) que circula alejada de la costa (100 a 300 km de la costa); y la “Contracorriente del Perú” (*Perú Undercurrent*, PUC) que se acerca un poco más a la costa y circula entre el talud y la plataforma exterior.

1.5.3.5 Efectos océano-climáticos locales: Surgencia Costera y Transporte de Ekman

A lo largo de la costa chilena hay zonas con una alta producción primaria y, por lo tanto, particularmente ricos en recursos pesqueros (Strub *et al.*, 1998), entre ellas Punta Lengua de Vaca (30°S) (Figuroa y Moffat, 2000). Esto estaría relacionado con condiciones topográficas favorables para el desarrollo máximo de vientos costeros del sur asociados al giro anticiclónico de ASPS (Rahn *et al.*, 2011), que provocan un efecto conocido como Surgencia Costera.

Los vientos costeros del sur asociados al giro anticiclónico de ASPS frente a la costa subtropical de Chile, junto con el efecto de Coriolis, desplaza masas de agua hacia el oeste, en un proceso llamado transporte de Ekman (Figura 1.18a). El efecto de Coriolis hace que masas de agua que han sido puestas en movimiento por los vientos en dirección al norte sean desviadas a la izquierda en el hemisferio sur producto de la rotación terrestre. Debido a la fricción, las capas más superficiales se mueven en un ángulo de 45°, y considerando a la columna de agua como un conjunto de varios estratos en que cada uno se mueve cada vez más lento producto de la fricción, el movimiento resulta en una espiral (conocida como espiral de Ekman) que se dirige cada vez más a la izquierda hasta que la fricción sea nula (Figura 1.18b). A pesar de que la dirección de movimiento es distinta para cada capa, el flujo de agua promedio resulta perpendicular y a la izquierda de los vientos costeros del sur. El desplazamiento al oeste de las masas de aguas superficiales provoca el alzamiento de aguas profundas más frías ricas en nutrientes desde las Aguas Ecuatoriales Sub-superficiales (Strub *et al.*, 1998) favoreciendo la producción primaria y, por tanto, un notable aumento en los recursos pesqueros.

a) Transporte de Ekman



b) Espiral de Ekman

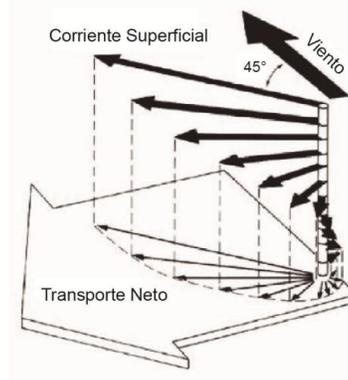


Figura 1.18 Esquema del transporte y espiral de Ekman en la costa subtropical de Chile. Tomado de Ortega (2014).

Son varias las localidades donde la surgencia es realmente significativa producto de sus condiciones topográficas favorables, entre ellas Lavapie (36°S), Curaumilla (33°S), Punta Lengua de Vaca (30°S), Punta de Choros (28,5°S) y Mejillones (23°S) (Figura 1.19; Figueroa y Moffat, 2000). Rahn *et al.* (2011) estudiaron el mecanismo mediante el cual se desarrolla un máximo viento costero en la bahía de Tongoy: durante las mañanas una briza oceánica superficial penetra desde la bahía hacia la terraza marina, mientras que durante las tardes esta briza es anulada por vientos del sur que avanzan por tierra, lo que sería producto de la inversión de la celda convectiva local sobre la bahía, provocada por aire tibio advechado desde la terraza marina, creando una capa límite residual sobre la bahía de Tongoy (Figura 1.19). El máximo de viento costero entonces sería producto del gradiente de presión generado por la celda convectiva local de la tarde sobre la bahía de Tongoy, la cual refuerza los vientos costeros del sur localizados justo al norte de Punta Lengua de Vaca (Rahn *et al.*, 2011).

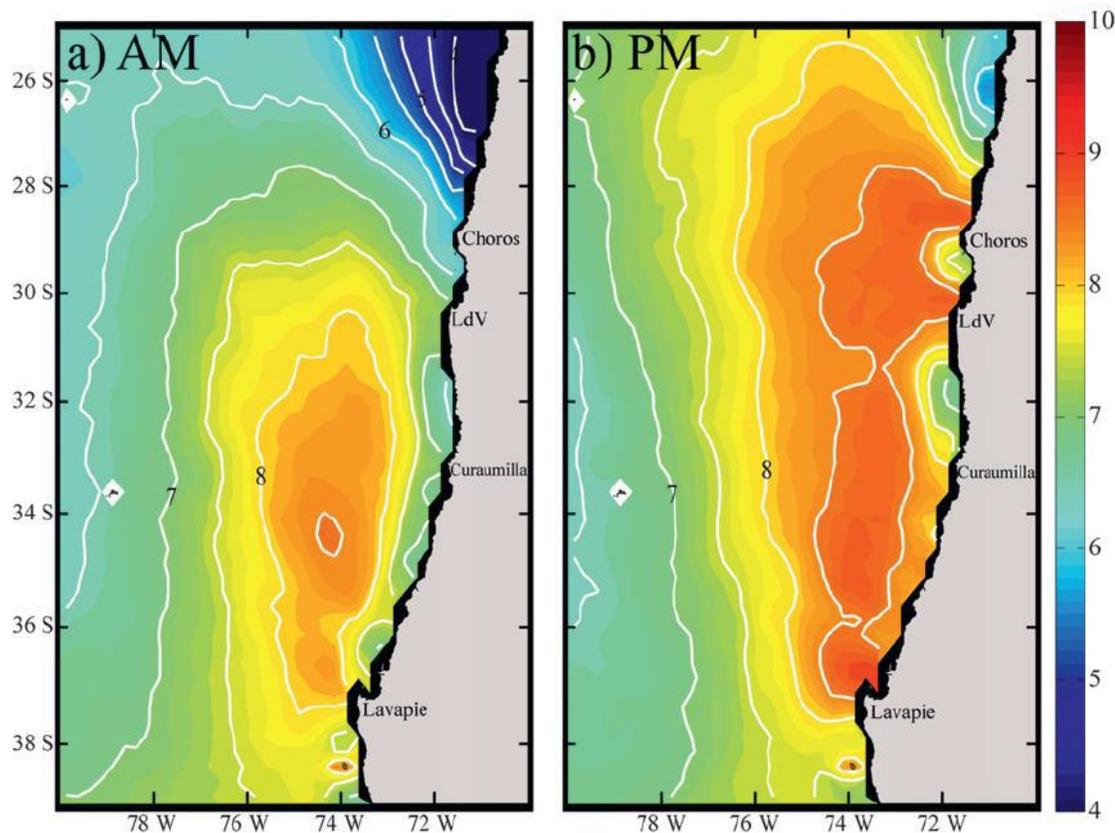


Figura 1.19 Centros de surgencia costera intensa en parte de la costa subtropical de Chile. Promedio de vientos a 10 m de altura derivados de QSCAT durante Noviembre y Diciembre entre 1999 y 2008. A) promedio para la mañana (AM) b) promedio para la tarde (PM). Se observa la mayor intensidad del chorro de viento costero durante la tarde. Tomado de Ranh *et al.* (2011).

1.5.4 Registros de variaciones climáticas durante el Holoceno

Estudios anteriores basados en registros oceanográficos y continentales indican que la costa del Pacífico Sureste ha tenido intervalos que la han situado entre condiciones más húmedas y más secas que las condiciones actuales (Maldonado y Villagrán, 2006; Latorre *et al.*, 2002; Ortega *et al.*, 2012; Ortega *et al.*, 2014; Aguilar *et al.*, 2013), generándose significativos cambios climáticos durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno (Sandweiss *et al.*, 1996; Rodbell *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2002; Moy *et al.*, 2002; Kaiser *et al.*, 2005; Vargas *et al.*, 2006; Ortlieb *et al.*, 2011; Ortega *et al.*, 2012; Ortega, 2014).

A través de registro de polen, se han sugerido períodos de sequía y de expansión de tierras pantanosas durante el Holoceno temprano en la costa semiárida de Chile, mientras que para el Holoceno medio se han planteado condiciones persistentemente secas (Maldonado y Villagrán, 2006; Maldonado *et al.*, 2010). Registros sedimentarios y de polen del fondo de la laguna Aculeo

(33°50'S; Jenny *et al.*, 2002) en Chile central también sugieren condiciones áridas durante el Holoceno medio, y aún más áridas durante el Holoceno temprano (9.500-8.500 cal años A.P.).

Varios autores han expuesto que el comienzo de las manifestaciones de El Niño convencional a lo largo de la costa oriental del Pacífico habría ocurrido hace 5.500 a 5.300 años, cuando el patrón de teleconexión trópico-extratropical relacionado a ENSO habría comenzado a operar (Rodbell *et al.*, 1999; Moy *et al.*, 2002; Vargas *et al.*, 2006; Donders *et al.*, 2008). Registros sedimentarios de Los Vilos evidencian una menor frecuencia de lluvias intensas hace 8600 a 5700 años cal. AP asociadas a condiciones neutras tipo-ENSO (Ortega *et al.*, 2013). El inicio de la influencia de El Niño estaría evidenciado en las costas del sur de Perú y norte de Chile por la cronoestratigrafía de depósitos aluviales (Vargas *et al.*, 2000, Vargas *et al.*, 2006), mientras que más al norte, en Laguna Pallcacocha, Ecuador, estaría evidenciado por el aumento de sedimentación clástica producto del posible aumento de lluvias asociadas a El Niño (Rodbell, *et al.*, 1999).

Testigos marinos extraídos frente a las Costas de Chile han registrado cambios paleoceanográficos importantes durante el Holoceno, principalmente relacionados con cambios en la temperatura superficial del mar (TSM). Durante el Holoceno temprano la TSM sería fría, mientras que el Holoceno medio registra una TSM más tibia, para luego mostrar una tendencia decreciente de la TSM durante los últimos 2000 años (Kim *et al.*, 2002; Lamy *et al.*, 2002, 2004 y 2007; Kaiser *et al.*, 2005; Ortlieb *et al.*, 2011).

Por otro lado, asociaciones de especies de foraminíferos planctónicos indicaron que la surgencia costera, la cual está relacionada a una gran intensidad de viento costero y un aumento en la productividad primaria, habría sido intensa hace 13.000 años, habría decrecido durante el Holoceno temprano y medio, para finalmente aumentar hace 3.000 años producto de una mayor variabilidad de ENSO (Marchant *et al.*, 1999).

Las variaciones latitudinales de la posición e intensidad de los Vientos del Oeste y del Anticiclón Subtropical del Pacífico durante el Pleistoceno tardío-Holoceno serían la causa de los cambios climáticos evidenciados durante el Holoceno (Heusser, 1990; Villagrán y Varela, 1990; Veit, 1996; Grosjean *et al.*, 1997; Lamy *et al.*, 1999, 2002; Jenny *et al.*, 2002, 2003; Villa-Martínez *et al.*, 2003; Maldonado y Villagrán, 2006; Vargas *et al.*, 2006; Maldonado *et al.*, 2010), siendo sugeridas condiciones tipo La Niña durante el Holoceno temprano (Vargas *et al.*, 2006) y durante el Holoceno medio (Kaiser *et al.*, 2005; Carré *et al.*, 2011).

Con respecto a los últimos siglos, estudios paleoclimáticos basados en la comparación de datos históricos entre las regiones de Perú-Ecuador y Chile central, muestran que hay una buena correlación entre ellos durante los siglos XIX y XX, y una fuerte relación con el evento El Niño. Sin embargo, entre los siglos XVI y XVIII, específicamente antes del año 1817, estos registros presentan fuertes discrepancias que no pueden ser asignadas sólo a una carencia de información, ya que eventos de fuerte intensidad no muestran tener mejor correlación que eventos menores y, en muchos casos, datos en una región apuntan a condiciones de La Niña mientras que en la otra se apunta a condiciones de El Niño (Ortlieb *et al.*, 2002). Esto ha sugerido un cambio en el comportamiento entre las precipitaciones y el modo de funcionamiento de ENSO (Aceituno y Montecinos, 1993), y particularmente el abrupto establecimiento de un patrón de teleconexión diferente al actual (Ortlieb *et al.*, 2002). Vargas *et al.* (2007) mostraron, a partir del estudio de

flujos lúricos y de carbón orgánico y del análisis de paleo-TSM derivado de alquenonas en sedimentos marinos del sur de Perú y norte de Chile, que efectivamente hubo un cambio océano-climático durante el siglo XIX, caracterizado por un período de transición entre los años 1820 y 1878. Este cambio es evidenciado por un marcado aumento de la surgencia costera y la productividad primaria junto con una disminución de la TSM, asociado a la amplificación e intensificación de la variabilidad interdecadal tipo ENSO de los vientos del sur a lo largo de la costa árida del norte de Chile y el sur de Perú.

Sifeddine *et al.* (2008) también mostraron un cambio en indicadores geoquímicos y sedimentarios en 1820 CE en la costa central de Perú (12-14°S), los cuales señalan que el clima cambió de lluvioso a árido junto con el incremento de condiciones redox en el sedimento y que luego, desde 1870 habría aumentado la productividad y la surgencia conducida por los vientos. A fines del siglo XX estas condiciones habrían seguido intensificándose (Sifeddine *et al.*, 2008) mientras que la TSM de la costa peruana experimentaba un enfriamiento constante (0.3-0.4°C por década), lo cual apoya escenarios que podrían relacionar la intensificación de la surgencia costera al calentamiento global (Gutiérrez *et al.*, 2011).

Estos antecedentes señalan que el borde occidental de la costa subtropical de Sudamérica efectivamente ha sufrido el impacto de las variaciones océano-climáticas asociadas a la influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur y de ENSO. Sin embargo, a escala milenial todavía no existe un consenso respecto del escenario paleoclimático durante el Holoceno temprano y medio. Además, respecto de los últimos siglos a escalas menores, las interpretaciones están basadas solo en registros influenciados por el borde nororiental del anticiclón, limitando una interpretación latitudinal completa de su comportamiento.

1.5.5 Registros de variaciones globales del nivel del mar

Las variaciones globales del nivel del mar durante el cuaternario son consecuencia del incremento y decaimiento de las capas de hielo, resultando en un complejo modelo espacial y temporal donde interactúan la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y la tierra sólida, con respuesta a distintas escalas de tiempo (Lambeck *et al.*, 2001).

El inicio de las glaciaciones del Pleistoceno se produjo hace unos 3 Ma con la formación de capas de hielo permanentes en las latitudes altas del hemisferio norte. Los cambios en el nivel del mar dejaron evidencia directa de la intensidad y el momento de los ciclos glaciales, pero las observaciones más directas y precisas de las variaciones del nivel del mar existen solo para el último ciclo glacial, desde aproximadamente 130 ka hasta el presente (Lambeck *et al.*, 2002). Los datos del volumen de hielo en períodos anteriores a este se obtienen mediante indicadores

indirectos contenidos en poros de conchillas de foraminíferos calcáreos. Estos organismos registran la firma isotópica y química del agua de mar en la que vivieron, siendo de particular importancia la razón $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (Mix y Ruddiman, 1984; Shackleton, 1967).

Lambeck *et al.* (2002), describieron las variaciones globales del nivel del mar que ocurrieron en el Cuaternario haciendo un énfasis en el último ciclo glacial. Durante el Último Máximo Glacial (Last Glacial Maximum, LGM), que tuvo lugar entre los 30 ka y 19 ka AP, las temperaturas disminuyeron fuertemente y se generó una acumulación de capas de hielo, factores que provocaron la disminución del nivel del mar, que en su nivel más bajo llegó cerca de los 130 m bajo el nivel actual (Figura 1.20).

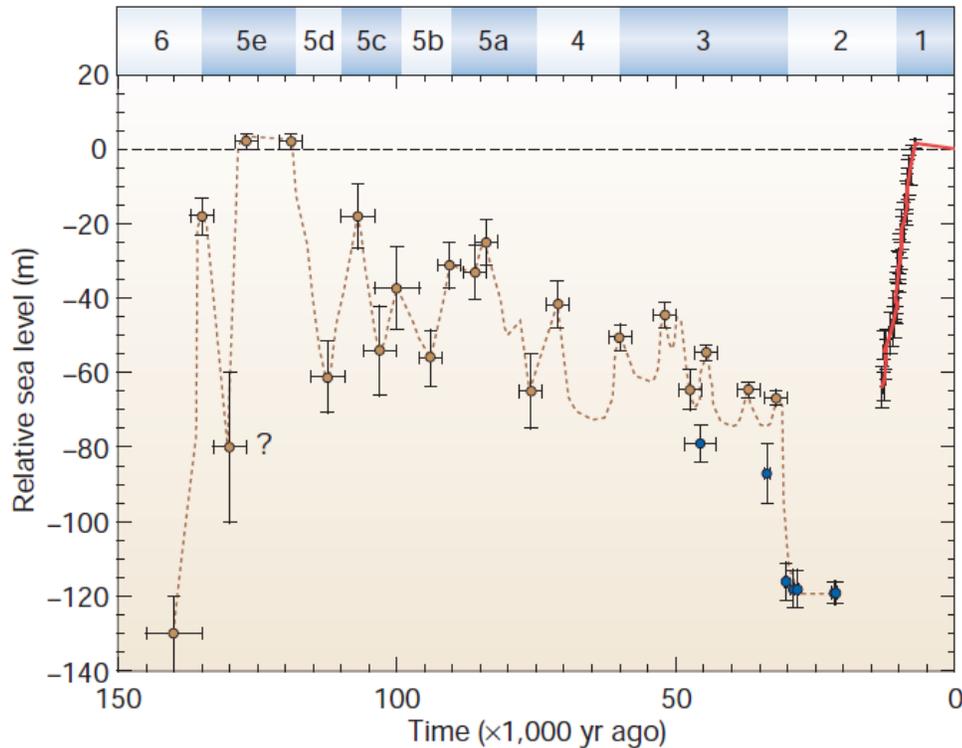


Figura 1.20 Nivel relativo del nivel del mar en el último ciclo glacial según datos obtenidos en localidades australianas. Tomado de Lambeck *et al.* (2002).

Durante el período post-Último Máximo Glacial, desde los 19 ka AP, ocurrieron sucesivos derretimientos globales de los hielos hasta aproximadamente los 7 ka AP, que ocasionaron la subida del nivel del mar hasta alcanzar un nivel cercano al actual (Lambeck *et al.*, 2002).

1.5.6 Foraminíferos y paleoecología

1.5.6.1 Foraminíferos: *Biología e importancia*

Los Foraminíferos son organismos unicelulares casi exclusivamente marinos pertenecientes al reino de los protistas (Sen Gupta, 1999) o al reino de los cromistas (Cavalier Smith, 1998). Están conformados por un protoplasma y una conchilla de variada composición y forma, cuyo tamaño promedio no supera las 200 μm , aunque algunas especies pueden alcanzar los 10 cm. En su mayoría corresponden a organismos bentónicos, es decir, que viven asociados al fondo o sustrato marino. Su primer registro se remonta al Cámbrico y habitan desde fondos oceánicos hasta la zona intertidal y desde los polos hasta el Ecuador. Su reproducción es compleja, presentando alternancia de generaciones en la mayoría de las especies: una generación con reproducción asexual (gamonte) y otra con reproducción sexual (agamonte) (Náñez y Malumián, 2007).

Dada su gran abundancia, su amplia extensión en el registro fósil y su gran sensibilidad a variaciones ambientales, son considerados excelentes bioindicadores de cambios ecológicos, y se utilizan ampliamente para interpretaciones paleoambientales (Náñez y Malumián, 2007).

El cuerpo blando de estos organismos, conocido como protoplasma, se puede dividir en protoplasma cameral o endoplasma, que se encuentra al interior de la conchilla, y un protoplastama pseudopodial o ectoplasma, que se encuentra fuera de la conchilla, formando pseudópodos (Figura 1.21). En el endoplasma se encuentran el núcleo y algunos organelos y es donde ocurren los procesos vitales, como el metabolismo, mientras que el ectoplasma en forma de finos pseudópodos son los responsables del movimiento, captura, fijación, construcción de la conchilla, etc.

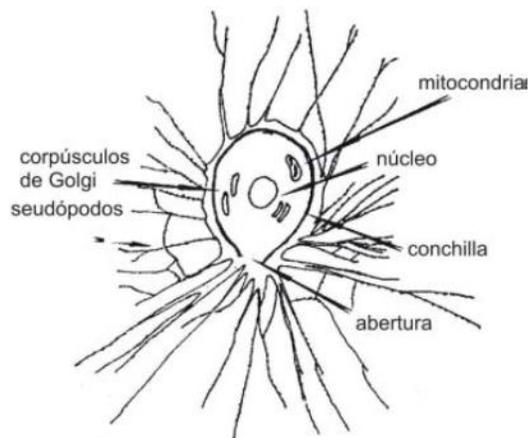


Figura 1.21 Esquema de foraminífero del Orden Allogromiida. Tomado de Náñez y Malumián (2007).

Por otro lado, el cuerpo duro de los foraminíferos corresponde a la conchilla, que según su composición se pueden clasificar en 4 grupos: calcáreas, silíceas, orgánicas y aglutinadas, siendo las primeras las más comunes. Las conchillas están compuestas por una o más cámaras; las conchillas uniloculares se encuentran integradas por una sola cámara, mientras que las multiloculares lo están por varias, separadas por tabiques o septos. Respecto a estas últimas, la

primera cámara recibe el nombre de prolóculo, y las siguientes pueden crecer siguiendo diversos patrones de enroscamiento. Las paredes suelen presentarse perforadas, siendo la abertura el orificio principal por donde emerge el protoplasma. Para fines estratigráficos y paleoecológicos, el estudio se centra en las conchillas, ya que es el material que se preserva después de la muerte de los organismos (Boltovskoy, 1965).

1.5.6.2 Ecología

La interacción entre los foraminíferos y el ambiente donde habitan permite establecer ciertas condiciones límites para la existencia de estos organismos. Según Boltovskoy y Wright (1976), es posible distinguir 2 áreas para cada especie, una donde pueden vivir y otra donde puede vivir y multiplicarse, siendo esta última de menor extensión. Un gran número de factores ecológicos influyen sobre la actividad vital de los foraminíferos y condicionan su distribución. Dentro de los factores más estudiados se encuentran la temperatura, la salinidad y la profundidad (presión). Menos conocidos son la naturaleza del sustrato y la alimentación, y en especial la influencia de la luz, la turbidez del agua, el pH, el contenido de oxígeno y el carbonato de calcio, entre otros. Estudiar estos factores por separado no es del todo pertinente, ya que están íntimamente relacionados, por lo que se deben evaluar en conjunto.

Los datos ecológicos son obtenidos de foraminíferos actuales, en su mayoría mediante estudio de cultivos de foraminíferos, y en menor medida en medios naturales. Estos datos son aplicados a estudios de foraminíferos del pasado (fósiles) realizando comparaciones que buscan ser lo más certeras posibles. Dada la escasa posibilidad de encontrar especies similares en distintas épocas (por el proceso evolutivo), también se pueden realizar comparaciones a nivel genérico y análisis de un conjunto bionómico que ayude a dilucidar las condiciones ecológicas dominantes en épocas pasadas (Boltovskoy y Wright, 1976).

Según Boltovskoy y Wright (1976), la **temperatura** es de gran importancia para toda la vida marina en general, y para los foraminíferos en particular. Se pueden diferenciar distintos límites de temperatura según su efecto biológico, como por ejemplo, temperatura máxima y mínima tolerable para vivir, crecer o reproducirse. La temperatura desempeña un importante papel en la ecología de los foraminíferos, principalmente porque:

- Controla su distribución, en especial geográfica (horizontal). La diferencia en la fauna de foraminíferos en diversos mares del mundo permite definir áreas de distribución de foraminíferos, pudiéndose distinguir áreas donde predominan especies de aguas frías, templadas y cálidas. A su vez, estas áreas están divididas en provincias y subprovincias zoogeográficas. La provincia zoogeográfica donde se encuentra ubicada la zona de estudio se describe en el apartado siguiente. Por otra parte, la distribución vertical puede deberse a condiciones térmicas o batimétricas, lo que es difícil dilucidar en la columna de agua.
- Tiene influencia en la morfología de la conchilla, pudiendo una misma especie presentar variaciones en forma y tamaño a distintas temperaturas. Además, a bajas temperaturas se ha observado un aumento en el tamaño de la conchilla, lo que se acentúa en foraminíferos aglutinados.

Por otro lado, los mismos autores mencionan la importancia de la **salinidad** para los foraminíferos, habiendo límites inferiores y superiores de tolerancia para sobrevivir, crecer o reproducirse. A rangos de salinidad normal (30‰ -40‰), no se ve mayormente afectada alguna especie, pero si disminuye (18‰-30‰, aguas mixohalinas), se observa un descenso en la cantidad de organismos. A menores salinidades, las especies pueden sobrevivir pero no reproducirse. La salinidad de esta forma condiciona la distribución geográfica. Si bien la salinidad en el mar abierto es relativamente uniforme, se puede lograr una zonación horizontal en lugares donde hay mezcla con aguas dulces. Por último, también se ha observado una influencia en el tamaño, ornamentación y forma de las conchillas al acercarse a los límites de tolerancia de salinidad, pero el tenor de esta influencia no está del todo claro.

La **profundidad** es un factor ecológico muy complejo, ya que otros, como la temperatura, luz, cantidad de oxígeno, etc., varían también con ella, y en un ambiente natural es difícil medir su influencia en forma aislada. Sin embargo, la definición de zonaciones verticales prueba que la profundidad es un factor ecológico de gran importancia, más aún cuando mediante cultivos se ha logrado deducir el efecto de la presión sin modificar ninguno de los otros factores. Se ha determinado que algunos foraminíferos son más afines a ciertas profundidades, por ejemplo, los miembros del género *Bolivina* son frecuentes en aguas más profundas (Boltovskoy y Wright, 1976), mientras que otras especies no parecen verse influenciadas por la profundidad, al tener un amplio rango batimétrico (Boltovskoy y Wright, 1976). También se han observado cambios morfológicos al aumentar la profundidad. Bandy (1960) mencionó varios ejemplos: los ejemplares de *Cibicides* son más achatados y tienen suturas más prominentes al aumentar la profundidad (*C. aknerianus* y *C. pseudoungerianus* en la plataforma y *C. wuellerstorfi* en la zona batial); los miembros de la familia Rotaliidae adquieren un margen más romo (las especies de *Cancris* en plataforma y *Valvulineria*, *Baggina* y *Gyroidina* en grandes profundidades); especies de los géneros *Bulimina*, *Bolivina* y *Uvigerina* aumentan su tamaño y ornamentación (Boltovskoy y Wright, 1976). Varios autores han intentado realizar una zonación de la fauna de foraminíferos según la profundidad, planteando diferencias en sus límites. Pese a esto, las discrepancias no son sustanciales y es posible establecer una correlación con las distintas zonas del fondo oceánico. Boltovskoy y Wright (1976) plantearon la siguiente síntesis:

- **Zona intertidal** (litoral, playa de marea): Entre niveles de pleamar y bajamar. Cambios bruscos de las condiciones ecológicas y energía. Entre las que resisten este ambiente destacan: especies adherentes pertenecientes a los géneros *Cibicides*, *Acervulina*, *Planorbulina*, *Peneroplis*; especies de paredes gruesas como *Elphidium crispum*, *Quinqueloculina seminulum*, *Rotalia beccarii*; grupos con conchillas diminutas que permitan moverse entre granos. También se han encontrado *Buliminella elegantissima*, *Miliammina fusca*, *Nonion depressulus*, *Miliominella*, entre otros.
- **Zona Sublitoral**: Fondo oceánico desde el nivel de bajamar hasta el talud, es decir, gran parte de la plataforma continental. Se extiende hasta los 200 m de profundidad aprox. Se reconocen 3 subzonas: **1) Zona de Turbulencia**: Donde tienen lugar los movimientos del agua causados por tormentas, mareas, resacas, etc, y alcanza hasta los 20 m de profundidad aprox. Se caracteriza por foraminíferos de paredes gruesas y fuertes o con caparazón adherida al sustrato, teniendo muchas especies en común con la zona intertidal. Son comunes los miembros de los géneros *Elphidium*, *Rotalia*, *Quinqueloculina*, *Poroepionides* y *Textularia*. **2) Plataforma interna**: Hasta los 50-70 m de profundidad

aprox. Presenta fauna más variada y numerosa que la zona anterior. Se reduce el porcentaje de aglutinados (ejemplares de *Textularia*, *Trochammina*) y a los géneros dominantes (*Elphidium*, *Rotalia*, *Quinqueloculina*) se suman representantes de Miliolidae (*Triloculina*, *Spiroloculina*, *Massilina*) y luego *Discorbis*, *Buliminella* y *Buccella*. Aumenta el porcentaje de miembros de las familias Lagenidae y Buliminidae. Condiciones continuamente más favorables permitirían un mejor desarrollo de las especies. 3) **Plataforma externa**: Hasta los 200 m de profundidad aprox. El número de géneros y especies aumenta notablemente, mientras que el porcentaje de especies aglutinadas es drásticamente menor. Aumentan los foraminíferos planctónicos. Se incrementa también la frecuencia de las especies hialinas de las familias Lagenidae, Buliminidae y del género *Cibicides*. Están ausentes las especies dominantes en ambientes costeros. Se consideran como dominantes de esta zona los representantes de *Cassidulina*, *Cibicides*, *Nonion*, *Nonionella*, *Uvigerina* y *Virgulina*, y de los aglutinados *Bigenerina*.

- **Zona Batial**: Abarca desde el límite inferior de la Plataforma continental y finaliza cerca de los 3000 m de profundidad. Se distingue un límite entre los 800 a 1000 m, que separa dos subzonas: **1) Talud Superior**: Con mayor porcentaje de especies planctónicas, mientras que las especies aglutinadas son poco abundantes. Los géneros con especies dominantes son: *Bolivina*, *Uvigerina*, *Cassidulina*, *Gyroidina*, *Chilostomella*, *Allomorphina*, *Pullenia*, *Bulimina*, etc. Dentro de los porcelanoides, *Pyrgo* es muy importante. **2) Talud inferior**: Disminuye la fauna en diversidad y cantidad. Aumenta el porcentaje de especies aglutinadas, pero sigue siendo bajo. Los géneros con especies más comunes son: *Bulimina*, *Epistominella*, *Glomospira*, *Gyroidina* y otros.
- **Zona abisal** (mar profundo): Zona mejor conocida en su parte superior. Aumenta considerablemente el porcentaje de especies aglutinadas más primitivas. Se consideran típicas de aguas profundas las especies pertenecientes a los géneros *Technitella*, *Cyclammina* y *Thurammina* y a la Familia Astrorhizidae. La dominancia de las especies aglutinadas se ha explicado por las altas presiones, bajas temperaturas y poco oxígeno, lo que generaría un régimen de equilibrio entre los gases que impediría a los foraminíferos usar el carbonato disuelto en el agua.

La **cantidad de oxígeno** disuelto en el agua tiene un importante rol ecológico para todo el mundo orgánico. Proviene principalmente de la fotosíntesis, y en menor medida de la atmósfera (mediante lluvia, difusión, oleaje, etc.), y presenta una relación inversa con la temperatura. Algunos foraminíferos necesitan mayor cantidad de oxígeno que otros para vivir y reproducirse, mientras que otras toleran cantidades de oxígeno muy limitadas. Diversos autores han estudiado la respuesta de ciertas especies a distintas cantidades de oxígeno: *Bolivina seminuda* y *Suggrunda eckisi* pueden tolerar cantidades de oxígeno muy bajas, incluso menores a 0,1 ml/L (Emery y Hülsemann, 1961); las mismas especies han sido encontradas en aguas con 0,38 y 0,58 ml/L respectivamente (Smith, 1963); los miembros del género *Bolivina* son considerados como los más resistentes a la deficiencia de oxigenación, junto con *Suggrunda* y *Brizalina*, mostrándose morfológicamente afectados (Boltovskoy, 1965). En los géneros *Bolivina*, *Buliminella*, *Uvigerina*, *Bulimina* y *Globobulimina* hay especies adaptadas para vivir en zonas de mínimo oxígeno y, al parecer, su abundancia aumenta a menor cantidad de oxígeno disuelto (Boltovskoy, 1991; Sen Gupta y Machain-Castillo, 1993).

Sin duda hay una relación entre la fauna de foraminíferos bentónicos y el **sustrato**, especialmente para las especies aglutinadas. Lamentablemente este factor ha sido poco estudiado y a menudo ha llevado a resultados contradictorios, dada la dificultad para evaluar su propia influencia (Boltovskoy y Wright, 1976).

1.5.6.3 Provincia zoogeográfica chilena-peruana

La fauna de foraminíferos característica de las costas de Chile y Perú ha sido reunida en la Provincia chilena-peruana, que limita al sur con el área de Tierra del Fuego, posiblemente cerca de la entrada occidental del Estrecho de Magallanes, y al norte con la bahía de Guayaquil (Boltovskoy y Theyer, 1970). Esta extensa provincia se caracteriza por una fauna de aguas templadas, que difiere fuertemente de la fauna encontrada al sur de Tierra del Fuego, de aguas frías, y al norte de la bahía de Guayaquil, de aguas cálidas, reunidas en la provincia panameña (Boltovskoy y Theyer, 1970).

Varias especies caracterizan a toda la provincia chilena-peruana, principalmente *Buccella peruviana*, s.l., *Cancris inflatus*, *Nonionella auris*, *N. chiliensis* y *Uvigerina striata*. También hay variaciones faunísticas dentro de la misma provincia, habiéndose reconocido 3 subprovincias: sur de Chile, norte de Chile y peruana (Figura 1.22; Boltovskoy y Wright, 1976).

La subprovincia del sur de Chile se extiende hasta los 39-40° S. Presenta muchas especies en común con la subprovincia de la Patagonia Sur, pero sin el predominio de *Buccella peruviana*, s.l. y la ausencia de *Elphidium* (género muy abundante en la costa atlántica). Además, destaca la presencia de especies desconocidas en el resto de América del Sur (*Cassidulina bradyi*, *Hoeglundina pleurostomata*, etc) (Boltovskoy y Wright, 1976).

La subprovincia del norte de Chile, ubicada entre 39-40° S y 15° S. Se diferencia de las subprovincias adyacentes por tener una fauna caracterizada por *Bolivina plicata*, *B. punctata*, *Bulimina pulchella*, *Cancris inflatus*, *Cassidulina auka*, *Eponides meridionalis*, *Globobulimina pacifica*, *Glabratella pileolus*, *Nonionella chiliensis* y otras. Los miembros de *Elphidium* son muy escasos. A diferencia de la subprovincia sur, esta subprovincia tiene varias especies que son de clima cálido, mientras que la mencionada se caracteriza por una fauna de aguas templado-frías (Boltovskoy y Wright, 1976).

Más al norte, a lo largo de la costa chileno-peruana, se observa un marcado aumento en la proporción de foraminíferos de aguas cálidas. Se han encontrado especies de aguas templado-cálidas tales como *Rotalia rosea*, *Eponides repandus*, *Discorbis consobrinus* y *Trochammina kellestae* en aguas peruanas y ecuatoriales (Cushman y Kellett, 1929). Este cambio faunístico define a la subprovincia peruana, que se encuentra delimitada entre los 15°S y la Bahía de Guayaquil, la que se caracteriza por *Bolivina costata*, *B. punctata*, *Cancris inflatus*, *Discorbis corus*, *Eponides repandus*, *Nonion pizarrense*, *Rotalia rosea*, etc (Boltovskoy y Wright, 1976).

El área de estudio se encuentra en la subprovincia del Norte de Chile, por lo que la asociación faunística actual correspondería a una fauna de foraminíferos de aguas templado-frías, con presencia de especies de aguas cálidas.

Los estudios más recientes de foraminíferos actuales a lo largo de toda la costa de Chile se han centrado principalmente en las especies bentónicas, mencionando excepcionalmente algunas especies planctónicas. Al sur de los 40°S, en el sector de Magallanes, los canales patagónicos y el área Antártica, los foraminíferos bentónicos actuales han sido estudiados ampliamente (Hromic, 1996, 1999, 2001a, 2001b, 2001c, 2002, 2009, 2011, 2012; Hromic y Montiel, 2011; Hromic *et al.*, 2012; Zapata y Alarcón, 1988; Zapata *et al.*, 1995; Zapata y Moyano, 1996, 1997). Más al norte, en Chile central (33° - 40°S), la fauna de foraminíferos bentónicos y su distribución se encuentra también bien documentada (Figueroa *et al.*, 2005, 2006; Ingle *et al.*, 1980; Pujol, 1977; Tapia, 2003). Figueroa *et al.* (2005) estudiaron la fauna actual de foraminíferos bentónicos del orden Rotaliina en las costas del centro sur de Chile (36° - 44°S), encontrando 61 especies distintas, distribuidas en 29 géneros y 19 familias de Rotalínidos, que fueron obtenidos a profundidades de entre 125 y 3.485 m. Por otra parte, Figueroa *et al.* (2006) estudiaron los representantes de los órdenes Lagenina, Miliolina y Robertinina mencionando 56 especies distintas, distribuidas en 21 géneros y 11 familias. En cambio, en el norte de Chile (18° - 23°S), los trabajos sobre foraminíferos bentónicos son escasos (Paez *et al.*, 2001; Zapata y Gutiérrez, 1995; Zapata y Cea, 2004), y en particular los de foraminíferos en las islas chilenas (Marchant *et al.*, 2004; Zapata, 1999; Zapata y Olivares, 2000).

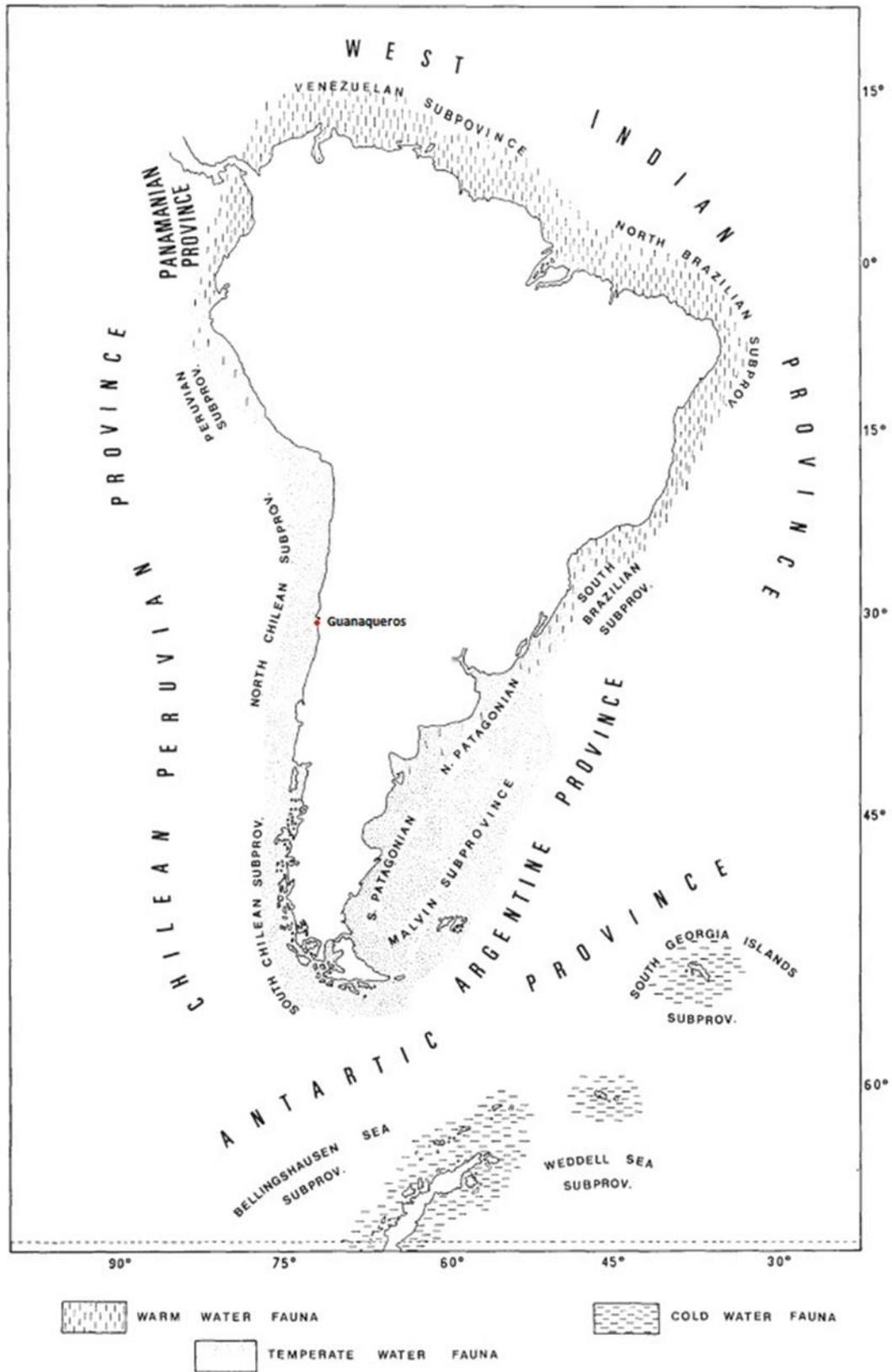


Figura 1.22 Zoogeografía de América del Sur. Tomado y modificado de Boltovskoy y Wright (1976).

Por otro lado, el estudio de foraminíferos planctónicos en las costas de Chile, si bien son menos abundantes (Marchant, 1997; Marchant y Guzmán, 2002; Marchant y Gajardo, 2010), han permitido caracterizar los eventos océano-climáticos. En Coquimbo (30°S), además de las especies típicas de la zona de transición y las especies de aguas cálidas indicadoras de eventos de El Niño conocidas en el sector (*Globigerinella aequilateralis*, *Globorotalia crassaformis* y *Pulleniatina obliquiloculata*), se identificaron 6 especies propias de aguas cálidas indicadoras de eventos de El Niño que aparecieron por primera vez en esta área con El Niño 1997-98: *Globigerinoides sacculifer*, *G. trilobus*, *Globigerinella digitata*, *Hastigerina digitata*, *Globorotalia theyeri* y *G. tumida* (Coloma et al., 2005). Estudios de variaciones estacionales de foraminíferos planctónicos en Iquique (20°S) y Concepción (36°S) durante 2005 y 2006 indican que en Iquique, en condiciones normales aumenta el flujo de individuos y carbonato con máximos en septiembre y octubre 2005, confirmando la presencia de surgencia costera en ese período, mientras que en Concepción durante El Niño 2006 el flujo de individuos y carbonato presentó máximos durante la época estival evidenciando surgencias, que sin embargo, son de menor duración (enero-febrero) respecto a lo descrito en condiciones normales para esta área (Gajardo y Marchant, 2012). Entre 2006 y 2007, el estudio de la depositación de foraminíferos planctónicos permitió determinar una asociación de foraminíferos típica de aguas subantárticas durante condiciones neutras y durante La Niña asociada a la presencia de aguas frías, mientras que durante El Niño se presentó una mezcla de especies de aguas frías y cálidas, respondiendo al incremento de la temperatura (Gajardo et al., 2013a). El estudio de isótopos estables de oxígeno en conchillas de *Globigerina bulloides* y *Neogloboquadrina incompta* frente a las costas de Concepción (36°S) durante El Niño 2006 mostraron la presencia de eventos de surgencias en la época estival durante condiciones normales (enero - abril) con incrementos significativos en el flujo de individuos, de carbonato y diversidad, que habrían terminado anticipadamente durante el evento El Niño 2006 (abril - octubre) (Gajardo et al., 2013b). El cambio en la paleoproduktividad registrado en la Corriente de Perú-Chile desde altos niveles durante el Último Máximo Glacial (UMG) evidenciado por las altas tasas de acumulación de carbono orgánico, ópalo y carbonato biogénicos, hasta niveles más bajos en el Holoceno temprano y medio se ve reflejado en el cambio de dominio de *Neogloboquadrina pachyderma* (sin) a *N. pachyderma* (dex.) (Hebbeln et al., 2002; Mohtadi y Hebbeln, 2004). Marchant et al. (1998) estudiaron el flujo de foraminíferos planctónicos durante El Niño 1991-92 y condiciones normales 1993-94, encontrando flujos más altos durante el período de condiciones normales. Variaciones estacionales e interanuales de flujo de foraminíferos planctónicos durante 1993-98 en Concepción (30°S) mostraron un aumento en el flujo y abundancia de especies que en condiciones normales no representaban más del 10% de la asociación faunística (Marchant et al., 2004). Las variaciones en la fauna de foraminíferos planctónicos frente a las costas de Chile indican una disminución en la surgencia y productividad durante el Holoceno temprano y medio evidenciado por la elevada abundancia de *Neogloboquadrina pachyderma* (dex.), mientras que durante los últimos 3000 años la surgencia habría aumentado, reflejada en el aumento de la abundancia de *N. pachyderma* (sin.) y por otro lado, las condiciones serían más cálidas, indicada por un mayor abundancia relativa de *N. dutertrei*, probablemente debido a eventos El Niño más frecuentes e intensos (Marchant et al., 1999,2004).

2 Sitio y Metodología

2.1 Sitio de Estudio: Bahía de Guanaqueros

El área de estudio corresponde a la zona costera entre los 30°12'00'' y 30°06'00'' S, ubicada en la IV región de Coquimbo, a 35 km aproximadamente al sur de Coquimbo, específicamente en la bahía de Guanaqueros (Figura 1). Esta bahía se encuentra protegida de los vientos predominantes del SW por una pequeña península conocida como Punta de Guanaqueros, macizo rocoso que cierra la bahía al SW dejándola abierta en dirección NW.

La playa de Guanaqueros se encuentra inmediatamente al norte de la bahía de Tongoy, y se extiende por 17 km de longitud de playa. Dentro de la clasificación geomorfológica utilizada por Araya-Vergara (1976), esta bahía pertenece al tipo de costa lobulada y protegida, con amplia extensión de terrazas marinas y una plataforma más bien estrecha.

La hoya hidrográfica de la bahía de Guanaqueros se extiende en una superficie de 500 km² aproximadamente, en donde la mayoría de las quebradas que llegan a su cuenca son cortas y poco profundas, destacándose únicamente la quebrada Lagunillas por su gran extensión. Producto de la escasa extensión de las quebradas de esta bahía, el aporte sedimentario desde el continente producto de períodos de escorrentía es menor en comparación a otras bahías con quebradas más extensas, como la bahía de Tongoy (Avilés, 2016).

El testigo de sedimento de fondo marino GUK1 de 100 cm se extrajo desde el interior de la bahía (30°9,7'S; 71°26,4'W), a los 88 m b.n.m., en el borde oriental de la península Punta de Guanaqueros (Figura 2.1). Está compuesto mayoritariamente por limo grueso-medio color café verdoso y en menor medida presenta arena media. Los sedimentos se habrían preservado gracias a la Punta de Guanaqueros, que protege la bahía desde el suroeste. Posee una resolución que permite interpretar variaciones hidrológicas a escala secular durante al menos los últimos 10 ka AP.

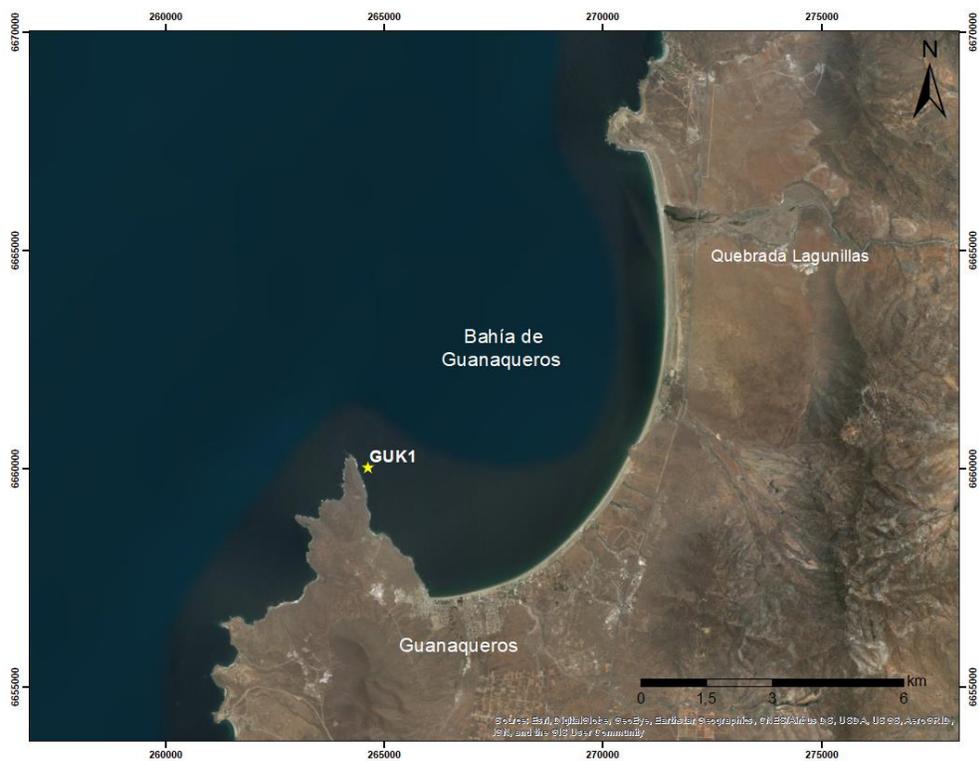


Figura 2.1 Bahía de Guanaqueros, donde se destaca la Quebrada Lagunillas. La estrella amarilla indica lugar de extracción de testigo GUK1.

2.2 Metodología

2.2.1 El testigo marino GUK1

El testigo de sedimento de fondo marino GUK1 (Figura 2.2), objeto de este estudio, fue extraído desde la bahía de Guanaqueros en octubre del año 2011, a bordo de la embarcación Stella Maris R/V en conjunto con otros 7 testigos (5 testigos desde la bahía de Tongoy y 2 desde la bahía de Guanaqueros). El largo del testigo GUK1 es de 100 cm. Se utilizaron perfiles acústicos obtenidos el año 2009 con un perfilador acústico de 3,5 KHz (Bathy 2000, Laboratorio de Sedimentología y Geología Marina, Departamento de Geología, Universidad de Chile) para elegir la zona más favorable para la penetración del saca-testigo y descartar la existencia de deslizamientos en el área de extracción.

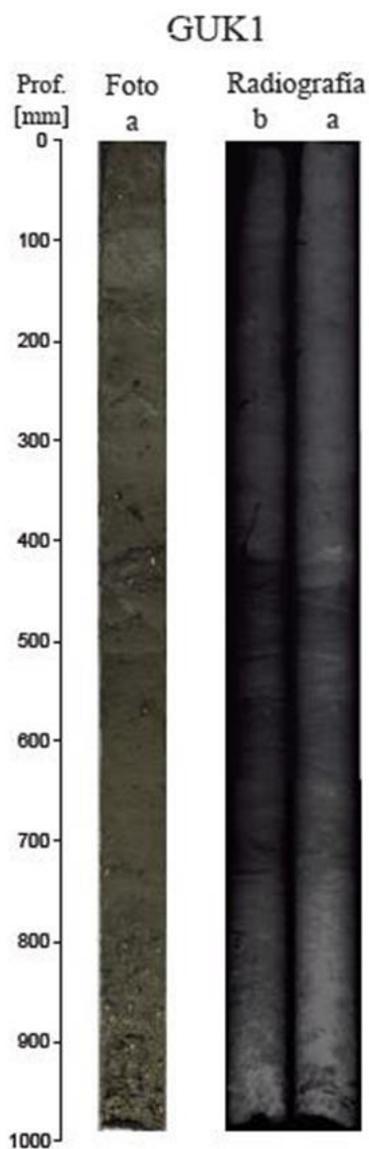


Figura 2.2 Fotografía y radiografía de testigo de sedimento tomado de la bahía de Guanaqueros (GUK1). Tomado de Avilés (2016).

El testigo se extrajo con un saca-testigos de gravedad de 1,5 metros de largo, que se dejó caer libremente a 10 metros del fondo marino con ayuda de la batimetría entregada por el sonar del barco, y agregando un peso de 110 kilos (5 discos de plomo). Para preservar la humedad y estructura interna de los testigos contenidos en tubos de PVC de 75 mm de diámetro, fueron almacenados en una cámara fría a 2°C en dependencias del Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile (Ortega, 2014).

El testigo fue fotografiado y también se obtuvieron imágenes de rayos X (Ortega, 2014). Una vez que se tomaron las fotografías y radiografías del testigo íntegro, se cortó utilizando una minisierra circular Dremel y un hilo de pesca, primero por la mitad de manera longitudinal, y luego una de estas mitades fue sub-muestreada cada 0,5 centímetros, obteniendo un total de 189 muestras, las que fueron etiquetadas, pesadas, secadas en un horno a 30°C aprox. y nuevamente pesadas para calcular la humedad y la densidad. Posteriormente se guardaron en bolsas de muestra hasta su análisis (Ortega, 2014).

El testigo fue datado mediante radiocarbono y ^{210}Pb en el marco del proyecto Postdoctoral Fondecyt 3150706. El análisis de exceso de ^{210}Pb se realizó en 21 muestras que corresponden a los primeros 40 cm de profundidad desde el techo de los testigos TK2 y GUK1. El modelo geocronológico muestra que el exceso de ^{210}Pb se encuentra en los primeros 6 cm desde el techo (Figura 2.3) y las tasas de sedimentación son 0,07 y 0,067 cm/año para TK2 y GUK1, respectivamente. Se realizaron en total 10 dataciones mediante radiocarbono en el testigo GUK1 (Tabla 2.1). Las muestras fueron datadas en los Laboratorios Beta Analytic Inc., sobre materia orgánica total de sedimento previamente decarbonatado, sobre carbonato de calcio de conchillas de una especie de foraminífero bentónico (*Bolivina seminuda*) y sobre carbonato de calcio de conchillas de un mix de especies planctónicas. Se asumió un efecto reservorio de 625 ± 46 años estimado en el testigo TO04, localizado en la bahía de Tongoy. La calibración se realizó utilizando CALIB 7.0.4. Finalmente, el modelo geocronológico basado en el método por ^{210}Pb y edades radiocarbónicas fue determinado por la Dra. Cristina Ortega en el marco del mismo proyecto postdoctoral.

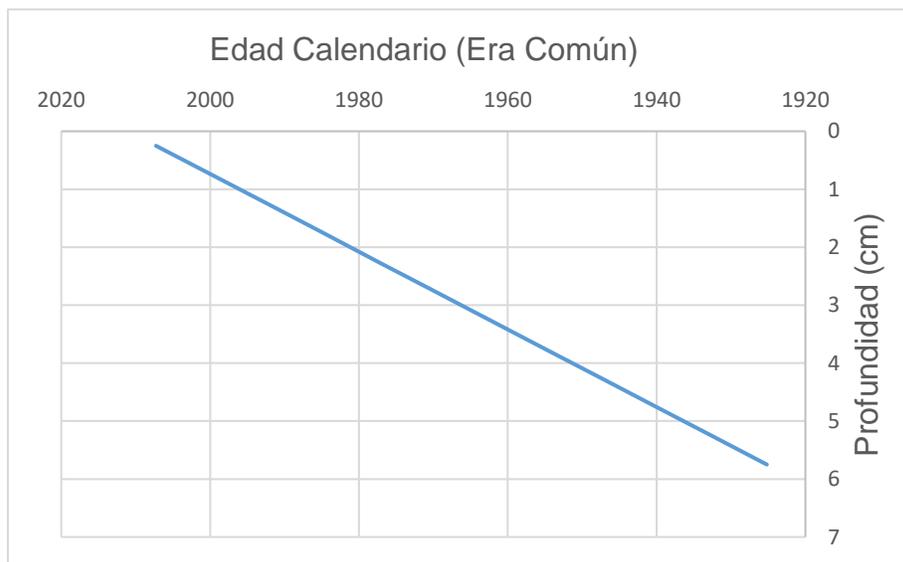


Figura 2.3 Curva de edades calculadas para GUK1 mediante exceso de ^{210}Pb considerando una tasa de sedimentación de 0,067 cm/año.

Tabla 2.1 Dataciones mediante radiocarbono en muestras de sedimento y en muestras de conchillas de especies de foraminíferos bentónicos y planctónicos, para el testigo GUK1. Para la calibración se utilizó CALIB 7.0.4.

Código Lab	Nombre muestra	Profundidad (cm)	Material	C-14 convencional	Edad C-14 Cal BP (2 sigma) $\Delta R_{local}=625 \pm 46$
444868	GUK-21 (Marine sediment)	10,75	Sedimento	2730 ± 30	1681,5 ± 139,5
480873	GUK-50 (<i>B.Seminuda</i>)	25,25	Conchillas f. bentónicos	3570 ± 30	2705 ± 145
477375	GUK 50 (Marine sediment)	25,25	Sedimento	3980 ± 30	3204,5 ± 151,5
444869	GUK-81 (Marine sediment)	40,75	Sedimento	5030 ± 30	4575,5 ± 160,5
367983	GUK-90 (Marine sediment)	45,25	Sedimento	6030 ± 30	5771 ± 128
367984	GUK-144 (Marine sediment)	72,25	Sedimento	7690 ± 40	7544 ± 109
480875	GUK-180 (Planktonic Foram)	90,25	Conchillas f. planctónico	9400 ± 40	9416,5 ± 119,5
480874	GUK-180 (<i>B. Seminuda</i>)	90,25	Conchillas f. bentónicos	9100 ± 30	9114,5 ± 143,5
4777376	GUK-181 (Marine sediment)	90,75	Sedimento	9660 ± 30	9721,5 ± 183,5
367985	GUK-189 (Marine sediment)	98,00	Sedimento	9400 ± 40	9416,5 ± 119,5

2.2.2 Preparación de muestras

En total, se analizaron 90 muestras del testigo GUK1. La preparación de las muestras para el posterior reconocimiento de especies y su cuantificación consistió en los siguientes pasos:

- Al escoger una muestra para analizar (Figura 2.4a), esta se pesó en una balanza digital de alta precisión para obtener el peso completo de la muestra. Para este estudio se consideraron las muestras pares del testigo GUK1, es decir, se trabajó con una resolución de 1 centímetro.
- Se tomó una fracción íntegra de la muestra (Figura 2.4b), de tal manera que no haya sufrido ningún proceso de separación por gravedad y además contenga una cantidad de foraminíferos que permita su estudio (entre 300 y 500 individuos por muestra). Para este propósito, fue necesario ir estimando la cantidad de sedimento necesario a medida que se analizaban muestras, llegando a que la cantidad ideal para trabajar se encontraba entre los 0,3 a 1 gramo de muestra.
- Una vez que se pesó la cantidad de sedimento, se procedió a disgregar cuidadosamente la muestra en un vaso de precipitado pequeño con agua destilada (Figura 2.4c) con la ayuda de un pincel, para liberar los foraminíferos contenidos en el sedimento.
- Se procedió a tamizar la muestra, utilizando 3 tamices: 212 μm , 150 μm y 63 μm (Figura 2.4d). Este proceso se realizó con agua potable directamente de la llave, pero al terminar se lavó con agua destilada con la ayuda de una piseta, esto para evitar que minerales presentes en el agua potable cubran las conchillas de foraminíferos.
- Posteriormente se depositó, con la ayuda de la piseta y agua destilada, cada fracción de la muestra en papel filtro (Figura 2.4e), dejando secar la muestra a 36°C en un horno, hasta que se secase completamente (Figura 2.4f).
- Finalmente, se depositó cada fracción de la muestra en una bandeja de recolección y se procedió a pesar. Las fracciones de 212 y 150 μm fueron analizadas, mientras que la fracción de 63 μm se guardó en microtubos dado que, a este tamaño de grano, la identificación de especies resulta de mayor dificultad.

El porcentaje de pérdida del material varía entre 20 a 60%. Esta variación se debe a la granulometría de la muestra; muestras con mayor tamaño de grano retienen más sedimento en las fracciones de 212 μm , 150 μm y 63 μm . Por esto, se considera que este porcentaje no afecta la fiabilidad del estudio micropaleontológico.

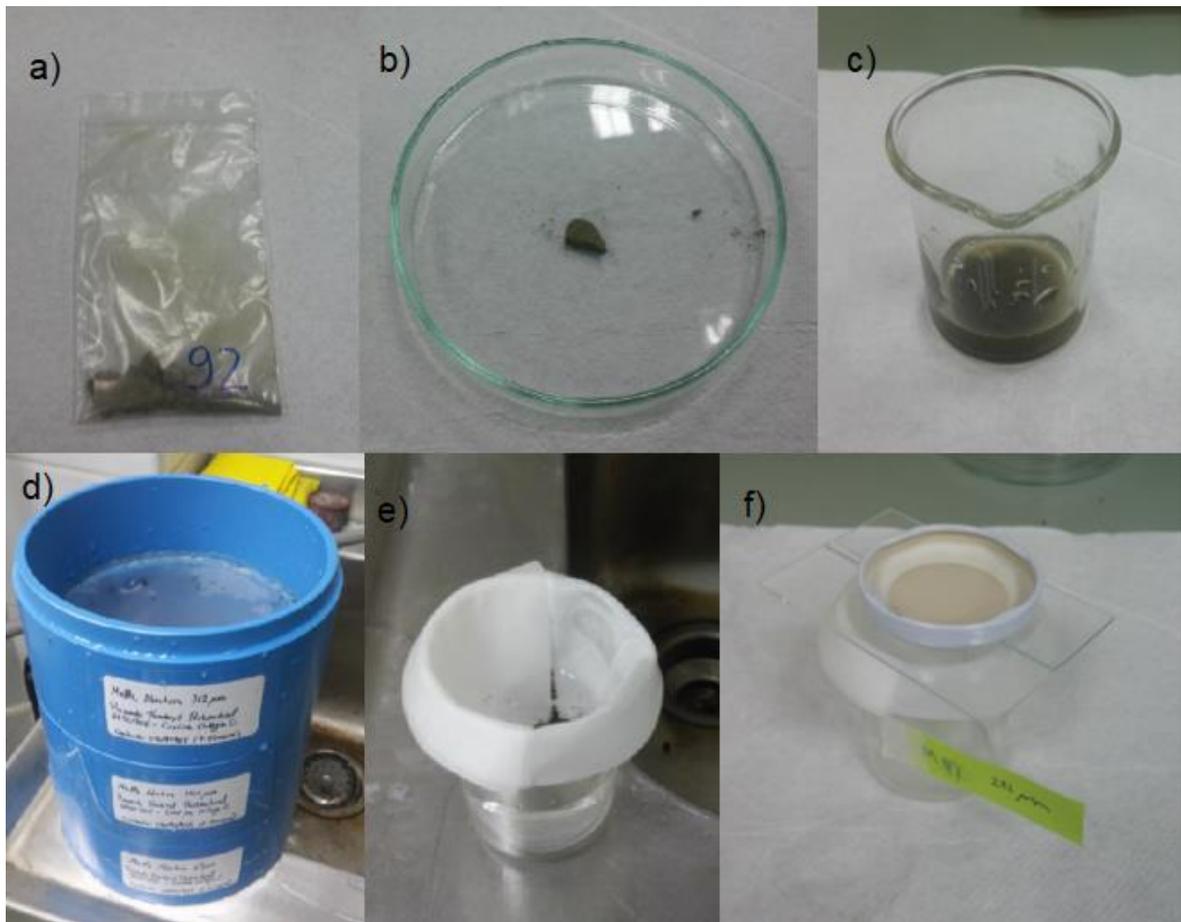


Figura 2.4 a) Bolsa de sedimento (muestra 92). b) Fracción de sedimento íntegro a analizar. c) Vaso de precipitado con sedimento en proceso de disgregación. d) Tamices utilizados (212 μm , 150 μm y 63 μm). e) Vaso de precipitado con papel filtro. f) Fracción de la muestra ya tamizada y etiquetada, camino a ser secada en el horno.

2.2.3 Separación, identificación de especies y cuantificación

La separación de foraminíferos desde el sedimento se realizó con extremo cuidado, para evitar pérdida de material, mezcla de distintos niveles de sedimento y quiebre de las conchillas de foraminíferos. Esta labor se realizó en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, con la ayuda de una lupa binocular electrónica OLYMPUS propiedad de este laboratorio (Figura 2.5).



Figura 2.5 Lupa Binocular electrónica OLYMPUS, bandeja de recolección de foraminíferos y pincel delgado para separación, materiales utilizados en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Muestra en proceso de separación.

El procedimiento de separación y conteo de foraminíferos consistió en lo siguiente:

- Separación bajo la lupa binocular de los foraminíferos del residuo de sedimento que quedó en la fracción de sedimento luego del tamizaje. Se realizó con ayuda de pinceles delgados y se tuvo la precaución de rescatar las conchillas que se encontraban en agregados de sedimento que no se disgregaron en el vaso de precipitado.
- Una vez limpia la muestra del sedimento residual, se comenzó a separar los foraminíferos por especie, utilizando para esto todo el espacio en bandeja de recolección.
- Finalmente, se contabilizaron los individuos de cada especie presentes en la muestra. Tanto el sedimento residual como los foraminíferos fueron guardados en microtubos graduados Eppendorf de 1.5 mL.
- Este proceso se realizó con las fracciones de 212 y 150 μm de todas las muestras analizadas. La fracción de 63 μm se guardó directamente en los microtubos graduados.

La identificación a nivel genérico se realizó según Loeblich & Tappan (1988), mientras que la identificación específica se realizó sobre la base de la cita original y con trabajos basados en el estudio de material chileno, entre los cuales fueron fundamentales los trabajos de Figueroa *et al.* (2005) y Figueroa *et al.* (2006), que disponen de un buen registro fotográfico de foraminíferos bentónicos acompañado de descripciones concisas de las especies. Además, fue de gran ayuda el *Atlas of Benthic Shelf Foraminifera of the Southwest Atlantic* de Boltovskoy *et al.* (1980) que, si bien describe la fauna de foraminíferos en el borde atlántico del continente, sirvió de guía para la identificación de varias especies en común con la costa de Chile.

Por otro lado, el material recolectado se encuentra conservado en el Laboratorio de Sedimentología de la Universidad de Chile, hasta su ubicación definitiva.

2.2.4 Registro fotográfico de alta resolución SEM

Las fotografías de alta resolución de las distintas especies encontradas en los sedimentos de la bahía de Guanaqueros fueron tomadas en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, *Scanning Electron Microscope*) QUANTA 250, que se encuentra en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile (Figura 2.6).

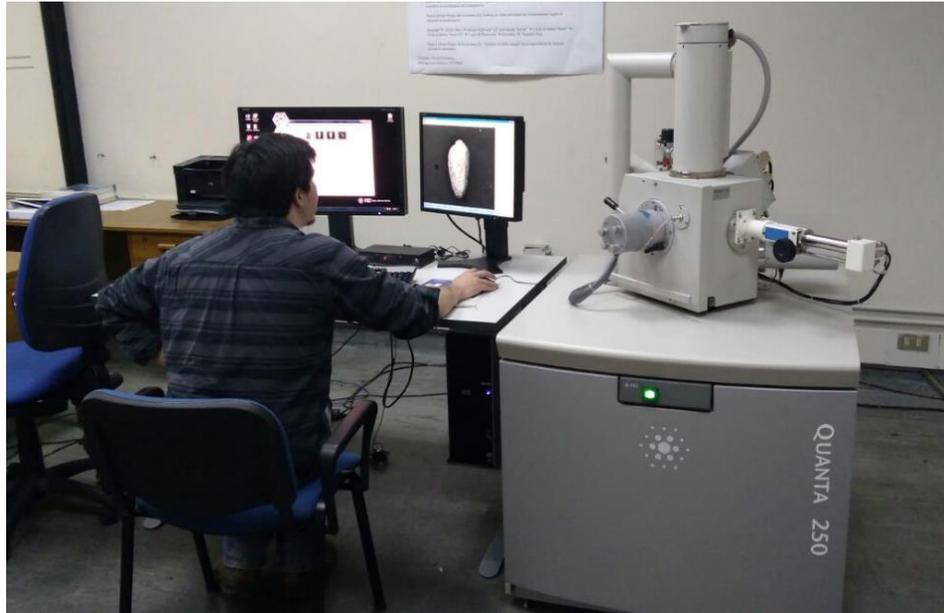


Figura 2.6 Microscopio electrónico de Barrido, en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. En la imagen, obtención de imágenes en alta resolución mediante electrones secundarios.

El método utilizado para obtener estas imágenes consiste en “barrer” toda la superficie de la conchilla con un haz de electrones (de entre 5 a 30 KeV) emitido por un cátodo de tungsteno, que luego pasa a través de una columna que se ha llevado al vacío (10^{-7} Torr aprox.) que concentra el haz mediante una serie de lentes electromagnéticas disminuyendo su diámetro hasta hacerlo casi puntual (10 nm aprox.). Simultáneamente se disminuye la intensidad de la corriente desde unos 10^{-14} A hasta unos 10^{-10} A, que implica una menor cantidad de electrones primarios (incidentes).

La interacción del haz de electrones con la superficie de la conchilla produce la emisión de electrones secundarios (electrones arrancados desde la superficie de la muestra) y retrodispersados (electrones del haz que son reflejados “hacia atrás” al colisionar con los átomos de la muestra) desde la conchilla (Figura 2.7). Las imágenes de alta resolución se obtienen al captar la emisión de los electrones secundarios: el haz de electrones realiza un barrido en direcciones X e Y de tal modo que su posición coincide con la aparición de brillo en un determinado punto de la pantalla, que es proporcional a la señal emitida. La señal de electrones secundarios se forma en una delgada capa superficial (de entre 50 a 100 Å). Como estos electrones son de baja energía (menos de 50 eV), pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial, lo que permite obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Todo lo anterior otorga a esta señal la posibilidad de entregar imágenes “en relieve”.

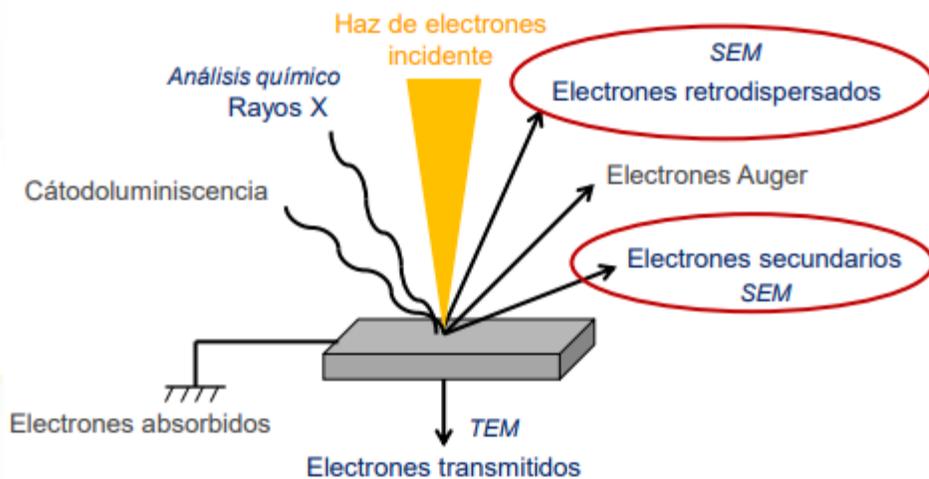


Figura 2.7 Esquema del funcionamiento del Microscopio Electrónico de Barrido. Tomado de <https://ssyf.ua.es/>

Es importante mencionar que para obtener imágenes sin interferencia fue necesario metalizar con oro las muestras, con la ayuda del equipo Cressington Sputter Coater 108/108auto (Figura 2.8), en las mismas dependencias donde se encuentra el SEM. Esto consiste en impregnar una delgada lámina de oro en la superficie de las conchillas, que permite que los electrones se puedan mover libremente por la superficie y evitando así que la muestra “se cargue” y la imagen salga con exceso de brillo.



Figura 2.8 Equipo Cressington Sputter Coater 108/108auto, a la derecha para el metalizado con Carbono y a la Izquierda para metalizado con oro, en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

3 Resultados

3.1 Fauna de foraminíferos

En total, a lo largo de todo el registro sedimentario se recolectaron 77.358 individuos, los que se agrupan en 48 especies, 28 géneros, 21 familias y 4 órdenes: Lagenida (0,0233%), Miliolida (0,0207%), Rotaliina (99,8294%) y Textulariida (0,1267%) (> 150 mm), considerando tanto los individuos identificados a nivel específico como los identificados sólo hasta nivel genérico.

Las especies más abundantes son *Bolivina seminuda* (50,45%), *Nonionella auris* (13,79%), *Cancris inflatus* (10,67%), *Bolivina plicata* (5,84%), *Bulimina marginata* (5,7%), *Cassidulina auka* (4,31%), *Epistominella exigua* (4,22%), *Epistominella pacifica* (1,22%), *Bolivina* sp. 1 (0,67%), *Buccella peruviana* s.l. (0,4%), *Buliminella elegantissima* (0,37%) y *Uvigerina striata* (0,36%); todas especies del orden Rotaliina. Dentro de las especies que no son del orden Rotaliina, sólo se destaca *Textularia gramen* (0,13%), del orden Textulariida.

De las 22 familias, 18 corresponden al orden Rotaliina, siendo 6 de estas las más representadas (Tabla 3.1). 2 familias corresponden al orden Lagenida, mientras que los órdenes Miliolida y Textulariida solo están representados por una familia cada uno (Lista 3.1).

Tabla 3.1 Abundancia de las principales familias de foraminíferos encontradas en el registro sedimentario de Guanaqueros, con sus géneros y especies.

Familia	N° de géneros	N° de especies	N° de individuos	%
Bolivinidae	1	7	44146	57,06
Nonionidae	3	6	10994	14,21
Cancrissidae	1	1	8259	10,67
Buliminidae	2	2	4620	5,97
Pseudoparrellidae	1	3	4213	5,44
Cassidulinidae	1	2	3444	4,45
Otras	19	27	1682	2,17
Total	28	48	77358	100

Lista 3.1. Lista taxonómica (Loeblich & Tappan, 1988) de foraminíferos presentes en sedimentos holocenos de la bahía de Guanaqueros. Categorías en orden alfabético.

Phylum FORAMINIFERIDA (Eichwald, 1830) Cavalier-Smith 1998

Clase Globothalamea Pawlowski, Holzmann & Tyszka, 2013

Orden LAGENIDA Delage & Hérouard, 1896

Familia LAGENIDAE Reuss, 1862

Género *Lagena* Walker & Boys, 1798

Lagena striata (d'Orbigny, 1839)

Lagena laevis (Montagu, 1803)

Lagena sp.1

Familia VAGINULINIDAE Reuss, 1860

Género *Lenticulina* Lamarck, 1804

Lenticulina convergens (Bornemann, 1855)

Orden MILIOLIDA Delage & Hérouard, 1896

Familia HAUERINIDAE Schwager, 1876

Género *Quinqueloculina* d'Orbigny, 1826

Quinqueloculina seminula (Linnaeus, 1758)

Género *Triloculina* d'Orbigny, 1826

Triloculina trigonula (Lamarck, 1804)

Orden ROTALIINA Delage y Hérouard, 1896

Familia AMMONIIDAE Saidova, 1981

Género *Ammonia* Brünnich, 1771

Ammonia beccarii (Linnaeus, 1758)

Ammonia sp.1

Familia ANOMALINIDAE Cushman, 1927

Género *Hanzawaia* Asano, 1944

Hanzawaia boueana (d'Orbigny, 1846)

Hanzawaia sp.1

Familia BOLIVINIDAE Glaessner, 1937

Genero *Bolivina* d'Orbigny, 1839

Bolivina interjuncta Cushman, 1935

Bolivina plicata d'Orbigny, 1839

Bolivina seminuda Cushman, 1911

Bolivina spissa Cushman, 1926

Bolivina striatula Cushman, 1922

Bolivina sp.1

Bolivina sp.2

Familia BOLIVINITIDAE Cushman, 1927

Género *Virgulinella* Cushman, 1927

Virgulinella rotundata (Parr, 1950)

Familia BULIMINELLIDAE Hofker, 1951

Género *Buliminella* Cushman, 1911

Buliminella elegantissima (d'Orbigny, 1839)

Familia BULIMINIDAE Jones, 1875 (*In* Griffith y Henfrey, 1875)

Genero *Bulimina* d'Orbigny, 1826

Bulimina marginata d'Orbigny, 1826

Género *Globobulimina* Cushman, 1927

Globobulimina pacífica Cushman, 1927

Familia CANCRISIDAE Chapman, Parr & Collins, 1934

Género *Cancris* Montfort, 1808

Cancris inflatus (d'Orbigny, 1839)

Familia CASSIDULINIDAE d'Orbigny, 1839

Género *Cassidulina* d'Orbigny, 1826

Cassidulina auka Boltovskoy & Theyer, 1970

Cassidulina sp.1

Familia CIBICIDIDAE Cushman, 1927

Género *Cibicides* Montfort, 1808

Cibicides aknerianus (d'Orbigny, 1846)

Género *Cibicidoides* Thalmann, 1939

Cibicidoides wuellerstorfi (Schwager, 1866)

Cibicidoides lobatulus (Walker & Jacob, 1798)

Cibicidoides variabilis (d'Orbigny, 1826)

Familia DISCORBIDAE Ehrenberg, 1838

Género *Discorbis* Lamarck, 1804

Discorbis peruvianus (d'Orbigny, 1839)

Discorbis williamsoni Chapman & Parr, 1932

Familia GAVELINELLIDAE Hofker, 1956

Género *Gyroidina* d'Orbigny, 1826

Gyroidina sp.1

Familia MELONIDAE Holzmann & Pawlowski, 2017

Género *Melonis* Montfort, 1808

Melonis sp.1

Familia NONIONIDAE Schultze, 1854

Género *Nonionella* Cushman, 1926

Nonionella auris (d'Orbigny, 1839)

Nonionella chiliensis Cushman & Kellett, 1929

Nonionella turgida (Williamson, 1858)

Nonionella sp.1

Género *Nonionoides* Saidova, 1975

Nonionoides grateloupii (d'Orbigny, 1826)

Género *Pullenia* Parker & Jones, 1862

Pullenia sp.1

Familia PSEUDOPARRELLIDAE Voloshinova, 1952

Género *Epistominella* Husezima & Maruhasi, 1944

Epistominella exigua (Brady, 1884)

Epistominella pacifica (Cushman, 1927)

Epistominella sp.1

Familia STAINFORTHIIDAE Reiss, 1963

Género *Stainforthia* Hofker, 1956

Stainforthia fusiformis (Williamson, 1848)

Familia TRICHOHYALIDAE Saidova, 1981

Género *Buccella* Andersen, 1952

Buccella peruviana (d'Orbigny, 1839), f. *campi*

Buccella peruviana (d'Orbigny, 1839), f. *frigida*

Buccella peruviana (d'Orbigny, 1839), f. *typica*

Familia UVIGERINIDAE Haeckel, 1894

Género *Angulogerina* Cushman, 1927

Angulogerina angulosa (Williamson, 1858)

Género *Trifarina* Cushman, 1923

Trifarina earlandi (Parr, 1950)

Género *Uvigerina* d'Orbigny, 1826

Uvigerina striata d'Orbigny, 1839

Uvigerina peregrina Cushman, 1923

Orden TEXTULARIIDA Delage & Hérouard, 1896

Familia TEXTULARIIDAE Ehrenberg, 1838

Género *Textularia* DeFrance, 1824

Textularia gramen d'Orbigny, 1846

A continuación, se describen las especies encontradas en orden alfabético de género y especie correspondiente. Las caracterizaciones específicas fueron tomadas de Figueroa *et al.* (2005), Figueroa *et al.* (2006) y Boltovskoy *et al.* (1980). Las imágenes en alta resolución de las principales especies (Figuras 3.1 a 3.18) fueron tomadas en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, *Scanning Electron Microscope*) QUANTA 250, que se encuentra en dependencias del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Ammonia beccarii (Linnaeus, 1758)

Especie Tipo: *Nautilus beccarii* Linne, 1758. *Systema Naturae*, ed. 10, Holmiae, v. L p. 710. figured by Plancus, *Conchiolog.* pI. 1, figs. 1 a-c.

Caracterización: Conchilla circular de contorno redondeado; lado dorsal convexo y cámaras dispuestas en espiral, ligeramente infladas, nueve a doce en la última vuelta; pared amarillenta, muy ornamentada, finamente perforada, las suturas se nivelan y se limitan en la porción temprana en el lado dorsal, se presionan y se abren en la última cámara; abertura estrecha (Boltovskoy *et al.*, 1980).

Ammonia sp.

Caracterización: Similar a *A. beccarii*, pero suturas menos nítidas, y cámaras no se inflan en la parte final.

Angulogerina angulosa (Williamson, 1858)

Figura 3.1-1

Especie Tipo: *Uvigerina angulosa* Williamson, 1858: 67, lám. 5, fig. 140. *Angulogerina angulosa* (Williamson) Boltovskoy y Theyer, 1965: 145, fig.17; 1970: 30, lám. 1, fig. 3. Zapata y Varela, 1975: 15, lám. 1, fig. 1.

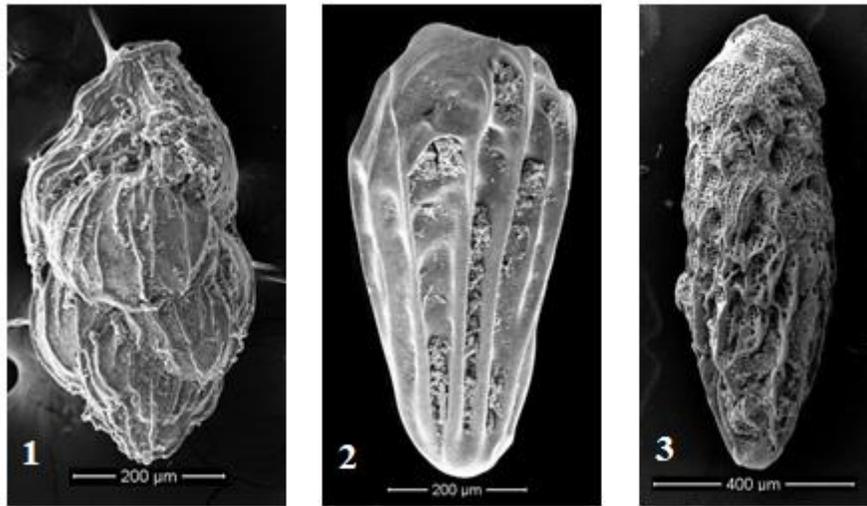
Caracterización: Conchilla alargada, fusiforme, de sección inicial redondeada, la final triangular. Cámaras infladas e irregulares. Paredes opacas, finamente perforadas y cubiertas de finas costillas longitudinales continuas o discontinuas, quedando libre de ellas a veces la última cámara. Sutures deprimidas, no muy nítidas. Abertura circular sobre un corto cuello provisto de un diente (Figueroa *et al.*, 2005).

Bolivina interjuncta Cushman, 1926

Figura 3.1-2

Especie Tipo: *Bolivina interjuncta* Cushman, 1935; Boltovskoy y Theyer, 1970: 304, lám. 1, figs. 8, 9; Zapata y Gutiérrez, 1995: 51, figs. 2, 3.

Caracterización: Conchilla alargada, bilateralmente comprimida, con su extremo oral triangular y el aboral redondeado; margen periférico de subagudo a recto. Con 10 a 12 pares de cámaras. Paredes opacas, con una ornamentación característica y con 4 a 5 costillas rectas a cada lado. Suturas algo curvadas, algo limbadas y engrosadas a modo de costillas. Abertura en forma rectangular, ubicada en la cara frontal de la última cara y rodeada de un fino labio (Figuroa *et al.*, 2005).



Figuras 3.1: 1. *Angulogerina angulosa*, Vista lateral. 2. *Bolivina interjuncta*, Vista dorsal. 3. *Bolivina plicata*, Vista lateral.

Bolivina plicata d'Orbigny, 1839

Figura 3.1-3

Especie Tipo: *Bolivina plicata* d'Orbigny, 1839b: 62, lám. 8, figs. 4 - 7; Boltovskoy y Theyer, 1965: 145, fig. 12; 1970: 305, lám. 1, fig. 12; Zapata y Gutiérrez, 1995: 51, figs. 4, 5.

Caracterización: Conchilla alargada, aguzándose hacia el extremo aboral, el cual suele ser agudo a redondeado. Cámaras poco nítidas. Paredes opacas, rugosas, perforadas y cubiertas con costillas longitudinales altas e irregulares que a veces no alcanzan las últimas cámaras. Suturas poco visibles, gruesas y limbadas cuando son distinguibles. Abertura oval, provista de un labio, situada en la cara terminal de la última cámara (Figuroa *et al.*, 2005).

Bolivina seminuda Cushman, 1911

Figura 3.2-1a, 1b

Especie Tipo: *Bolivina seminuda* Cushman, 1911: 34, fig. 55. (fide Coulbourn, 1980). Zapata, 1999: 30, fig. 7.

Caracterización: Conchilla comprimida, con su diámetro mayor en la zona oral; margen periférico aguzado. Paredes calcáreas perforadas en las suturas. Suturas visibles. Abertura oval, situada en la cara terminal de la última cámara (Figuroa *et al.*, 2005).

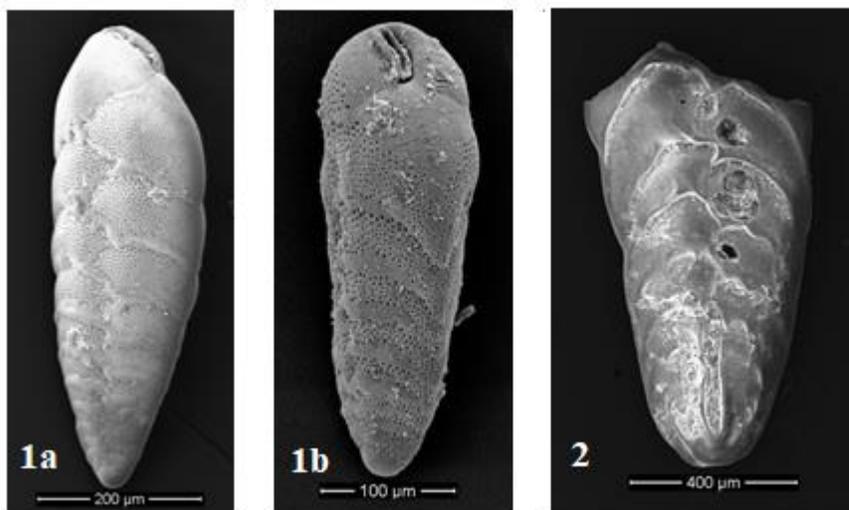


Figura 3.2: 1a. *Bolivina seminuda*, Vista dorsal. 1b. *Bolivina seminuda*, Vista lateral. 2. *Bolivina spissa*, Vista dorsal.

Bolivina spissa Cushman, 1926

Figura 3.2-2

Caracterización: Conchilla comprimida, gruesa, opaca, con su diámetro mayor en la zona oral; margen periférico muy aguzado. Superficie lisa y plana, paredes calcáreas perforadas en las suturas. Suturas visibles, levantadas, que tienden a curvarse hacia la zona apical al llegar al contorno.

Bolivina striatula Cushman, 1922

Figura 3.3-1

Especie Tipo: *Bolivina striatula* Cushman, 1922. *Carnegie Inst., Pub I. 311, p. 27 (pars), pl. 3, fig. 10.*

Caracterización: Conchilla subangulosa de margen periférico comprimido, bastante largo; extremo apical agudo y puede poseer una espina, extremo oral ancho y redondeado; 7-10 pares de cámaras; pared brillante, translúcida, finamente perforada en el extremo apical cubierta con

costillas finas que se reducen a estrías a medida que recorren la conchilla; suturas deprimidas, formando un ángulo de 60° con el eje de crecimiento, ligeramente curvado a lo largo del margen periférico; abertura ovada, de tamaño mediano para el género (Boltovskoy *et al.*, 1980).



Figura 3.3: 1. *Bolivina striatula*, Vista dorsal. 2. *Bolivina* sp.1, Vista dorsal. 3. *Bolivina* sp.2, Vista dorsal.

Bolivina sp.1

Figura 3.3-2

Caracterización: Conchilla muy comprimida, con su diámetro mayor en la zona oral; margen periférico muy aguzado. En las primeras cámaras, la conchilla tiende a girar, dando la impresión de un margen periférico aún más aguzado. Paredes calcáreas perforadas en las suturas. Suturas visibles. Abertura oval, situada en la cara terminal de la última cámara.

Bolivina sp.2

Figura 3.3-3

Caracterización: Conchilla muy alargada, aguzándose hacia el extremo aboral, el cual suele ser agudo a redondeado. Cámaras muy poco nítidas. Paredes opacas, rugosas, perforadas y cubiertas con costillas longitudinales altas e irregulares que a veces no alcanzan las últimas cámaras. Suturas poco visibles, gruesas y limbadas cuando son distinguibles. La conchilla tiende a curvarse y torcerse. Abertura oval, provista de un labio, situada en la cara terminal de la última cámara.

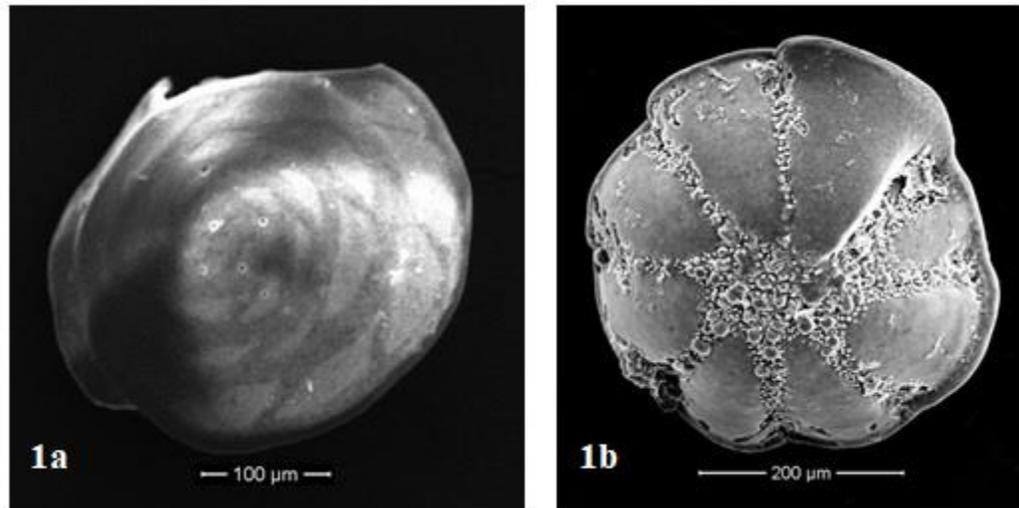


Figura 3.4: 1a. *Buccella peruviana* s.l., Vista dorsal. 1b. *Buccella peruviana* s.l., Vista ventral.

Buccella peruviana (d' Orbigny, 1839)

Figura 3.4-1a, 1b

Especie Tipo: *Rotalina peruviana* d' Orbigny, 1839b: 41, lám. 1, figs. 12 – 14. *Buccella peruviana* (d' Orbigny) Theyer, 1966: 207, lám. 1, figs. 1 – 15; Boltovskoy y Theyer, 1965: 144, fig. 3; 1970: 309, lám. 1, fig. 32; Zapata y Varela, 1975: 15, lám. 1, fig. 3. Zapata *et al.*, 1995: 25, lám. 2, figs. 1 – 3; Zapata y Olivares, 2000: 56; Hromic', 1996: 75, lám. 1, fig. 3; 1999: 94, fig. 4.10; Páez y Zuñiga, 2001: 9, fig. 15. *Buccella peruviana*, fma. *campsi* Boltovskoy, 1954. Boltovskoy y Theyer, 1970: 310, lám. 1, fig. 19; Zapata y Moyano, 1997: 30. *Buccella frigida* (Cushman). Boltovskoy y Theyer, 1970: 308, lám. 1, fig. 18; Zapata y Varela, 1975: 15, lám. 1, fig. 2.

Caracterización: Conchilla trocoidal, biconvexa, aunque el lado ventral a veces suele ser plano; margen periférico liso o lobulado, con o sin un ribete limbado. Con seis a once cámaras en la última vuelta. Paredes gruesas, opacas a veces con el lado ventral hialino. Suturas radiales, marcadamente deprimidas en el lado ventral; las del lado dorsal un poco limbadas y levemente curvas. Abertura pequeña, poco visible en la sutura basal de la última cámara; aberturas suplementarias pequeñas, sólo observables en lado ventral, en la sutura de las cámaras cerca de la periferia (Figueroa *et al.*, 2005).

Observación: Esta especie presenta una gran variabilidad, lo que la ha llevado a ser descrita con nombres diferentes. A continuación, se describen las 3 formas encontradas en este registro:

Buccella peruviana (d'Orbigny, 1839), forma *campsi*: Conchilla de menor tamaño (pero mayor que la forma frígida, menos cantidad de cámaras en la última vuelta (7-9) y un borde marginal menos desarrollado (Boltovskoy *et al.*, 1980).

Buccella peruviana (d'Orbigny, 1839), forma *typica*: Conchilla biconvexa de gran tamaño; 11 cámaras en la vuelta final; suturas umbilicales radiales, profundas y cubiertas con finos gránulos

densos; ancho ombligo circular lleno de gránulos; margen periférico con borde fuertemente desarrollado (Boltovskoy *et al.*, 1980).

Buccella peruviana (d'Orbigny, 1839), forma frígida: Esta forma se caracteriza por tener una conchilla muy pequeña, 6-9 cámaras en la última vuelta, la ausencia de un borde periférico y suturas umbilicales estrechas. Los gránulos son más grandes, pero menos densos que en la otra forma (Boltovskoy *et al.*, 1980).

Bulimina marginata d'Orbigny, 1826

Figura 3.5-1

Especie Tipo: *Bulimina marginata* d'Orbigny, 1826: 269, lám. 19, figs. 10-12; Brady, 1884: 405, lám. 51, figs. 3- 5; Hromic', 1999: 94, fig. 5, 6.

Caracterización: Conchilla ovada o terminada en punta y cada cámara se extiende algo al revés externamente, para formar un borde libre, que es conspicuamente serrado o crenulado. Esta especie muestra gran variabilidad (Figuroa *et al.*, 2005).

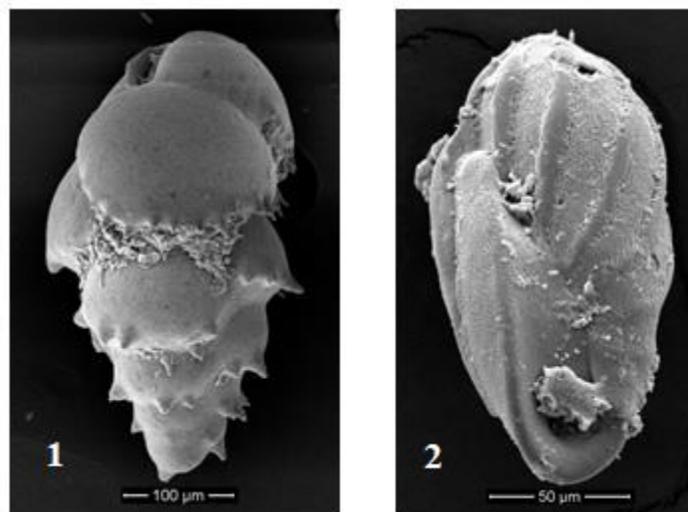


Figura 3.5: 1. *Bulimina marginata*, Vista lateral. 2. *Buliminella elegantissima*, Vista lateral.

Buliminella elegantissima (d'Orbigny, 1839)

Figura 3.5-2

Especie Tipo: *Bulimina elegantissima* d'Orbigny, 1839. Voy. Amer. Merid., v. 5, pt. 5, p. 51, pl. 7, figs. 13, 14.

Caracterización: Conchilla calcárea fusiforme, redondeada en las extremidades; espital con 2-3 vueltas; cámaras alargadas, curvas, estrechas e inclinadas oblicuamente al eje de enrollamiento, 7-9 en espiral final; pared lisa, brillante, finamente perforada; suturas deprimidas; abertura pequeña, redonda y ubicada en una ligera depresión en la cara de apertura, rodeada por una amplia pestaña (Boltovskoy *et al.*, 1980).

Cancris inflatus (d'Orbigny, 1839)

Figura 3.6-1a, 1b

Especie Tipo: *Valvulina inflata* d'Orbigny, 1839a: 148, lám. 7, figs. 7-9. *Cancris inflatus* (d'Orbigny). Boltovskoy y Theyer, 1965: 144, fig. 1; 1970: 313, lám. 2, fig. 1; Zapata et al., 1995: 2, figs. 11-13.

Caracterización: Conchilla subcircular; lado dorsal algo plano, el ventral convexo; margen periférico ampliamente redondeado y levemente lobulado. Con 8-10 cámaras en la última vuelta, infladas, aumentando rápidamente de tamaño, siendo la última muy prominente, la cual proyecta un delgado lóbulo irregular que cubre parte del umbilico. Paredes gruesas, opacas, densamente perforadas. Suturas del lado dorsal en su inicio limbadas y curvas, las del lado ventral deprimidas y radiales. Abertura desde la mitad de la sutura basal de la última cámara y extendiéndose hacia el umbilico por debajo del lóbulo (Figueroa *et al.*, 2005).

Observación: Últimas cámaras muy infladas, por lo que son frágiles. En muchos individuos estas cámaras no se preservaron, mostrando solamente las cámaras más internas.

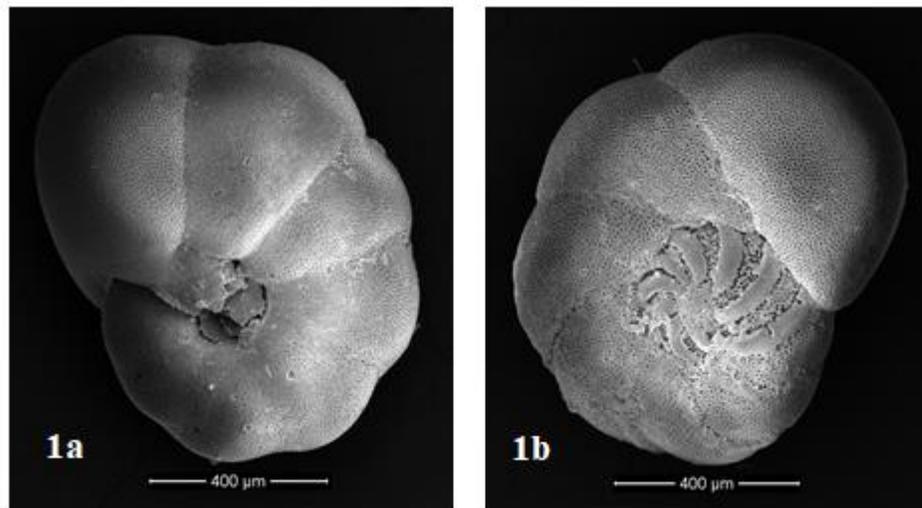


Figura 3.6: 1a. *Cancris inflatus*, Vista ventral. 1b. *Cancris inflatus*, Vista dorsal.

Cassidulina auka Boltovskoy & Theyer, 1970

Figura 3.7-1

Especie Tipo: *Cassidulina auka* Boltovskoy & Theyer 1970 Argentino Rev.Inst. Nac.Invest.Cienc.Nat.Mus. 2 (n.9): 314, unfig.

Caracterización: Conchilla circular, lados suavemente convexos con una aguda elevación en la zona del umbilico, margen periférico muy aguzado, algunos individuos muestran una quilla en el contorno, cámaras deprimidas, suturas levantadas y curvadas, que dan la impresión de bifurcarse. Paredes lisas, suavemente perforadas.

Cassidulina sp.1

Caracterización: Conchilla circular, lados más convexos en comparación a *C. auka*, sin presentar la elevación en la zona del umbilico, margen periférico aguzado, algunos individuos muestran una quilla en el contorno, cámaras deprimidas, suturas curvadas, no levantadas y menos nítidas, que dan la impresión de bifurcarse. Paredes lisas, suavemente perforadas.

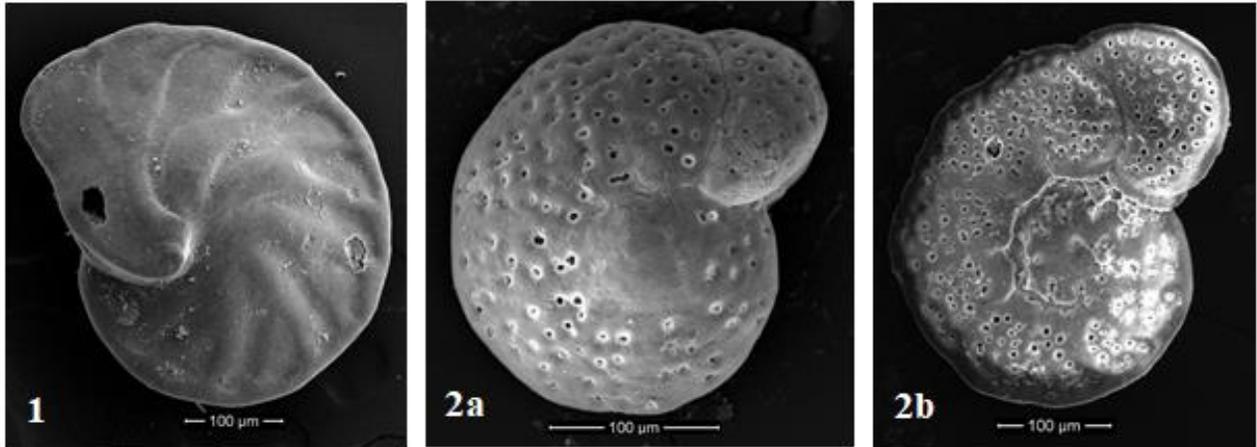


Figura 3.7: 1. *Cassidulina auka*, Vista dorsal. 2a. *Cibicides aknerianus*, Vista dorsal. 2b. *Cibicides aknerianus*, Vista ventral.

Cibicides aknerianus (d'Orbigny, 1846)

Figura 3.7-2a, 2b

Especie Tipo: *Rotalina akneriana* d'Orbigny, 1846: 156, lám. 8, figs. 13-15. *Cibicides aknerianus* (d'Orbigny) Boltovskoy y Theyer, 1970: 318, lám. 2, figs. 5, 6; Zapata y Varela, 1975: 16, lám. 1, fig. 6; Boltovskoy y Totah, 1987: 44, figs. 3 - 8; Marchant, 1993: 64, lám. 1, fig. 4; Hromic', 1999: 94, fig. 8.5; Zapata y Olivares, 2000: 56; Páez y Zúñiga, 2001: 7, figs. 4, 5.

Caracterización: Conchilla subcircular u oval, trocoidal, levemente lobulada en las últimas cámaras; margen periférico subangular, raramente algo redondeado. El lado dorsal es plano, formado por la última vuelta y un disco central que engloba las vueltas iniciales poco notorias; el lado ventral es convexo y un poco deprimido en su centro, consta de una vuelta con ocho a once cámaras triangulares, levemente infladas. Paredes lisas, opacas, groseramente perforadas en el lado dorsal y finamente perforadas en el lado ventral. La abertura es una hendidura estrecha, provista de un labio, extendiéndose por dos a cuatro cámaras en el lado dorsal (Figuroa *et al.*, 2005).

Cibicoides lobatulus (Walker y Jacob, 1798)

Figura 3.8-1

Especie Tipo: *Nautilus lobatulus* Walker y Jacob, 1798: 642, lám. 14, fig. 36 (*vide* Ellis y Messina, 1940).

Caracterización: Conchilla lamelar, trocoespiral, plana convexa a cóncava convexa, espiral en el lado umbilical, unido probablemente por el lado evolutivo de la espiral que puede ser irregular, observado también unido en lado ventral, contorno periférico liso y lobulado en las últimas cámaras. Margen periférico agudo con carina. Suturas radiales en el lado ventral, curvadas, cerca de la periferia deprimidas, en el lado dorsal, curvadas, levemente deprimidas y limbadas. Perforado grueso y uniformemente en ambos lados. Abertura intermarginal, extraumbilical-ecuatorial, con el borde grueso, extendido en una abertura dorsal suplementaria restante, se abre en las últimas 2 o 3 cámaras (Figueroa *et al.*, 2005; como *Cibicides lobatulus*).

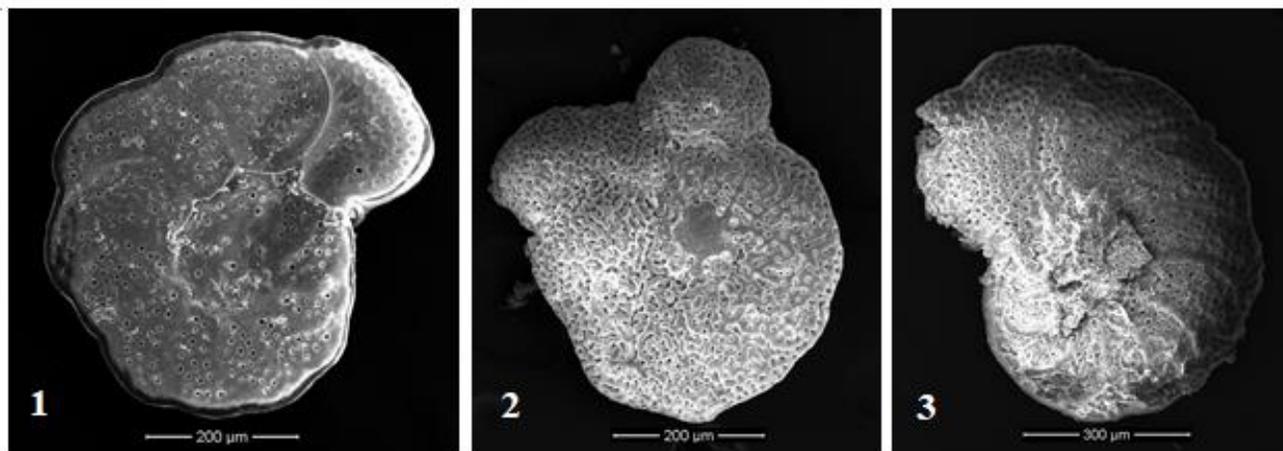


Figura 3.8: 1. *Cibicoides lobatulus*, Vista dorsal. 2. *Cibicoides variabilis*, Vista ventral. Fig. 18. *Cibicoides wuellerstorfi*, Vista dorsal.

Cibicoides variabilis (d'Orbigny, 1826)

Figura 3.8-2

Especie Tipo: *Truncatulina variabilis* d'Orbigny, 1839a: 135, lám. 2, fig. 29; Heron-Allen y Earland, 1932: 420, lám. 14, figs. 36 – 39. *Cibicides variabilis* (d'Orbigny). Boltovskoy y Theyer, 1970: 319, lám. 2, fig. 3; Marchant, 1993: 64, lám. 1, fig. 6; Zapata y Gutiérrez, 1995: 53, figs. 8-9; Zapata y Olivares, 2000: 56; Páez y Zúñiga, 2001: 9.

Caracterización: Conchilla de contorno variable, trocoidal y muy aplanada en ciertos casos, pero sus cámaras finales son irregulares, lo que depende del sustrato al cual se adhiere; en este caso, la disposición irregular de las cámaras puede ser uniserial, biserial o en forma ciclada. Cuando la conchilla conserva la construcción trocoidal regular, el lado dorsal es plano o levemente cóncavo; en cambio, el lado ventral es algo convexo con cámaras triangulares. Con siete a diez cámaras en la última vuelta. Paredes lisas, opacas, groseramente perforadas. Suturas limbadas en el lado dorsal, deprimidas en el lado ventral. La abertura es una ranura en la sutura dorsal por espacio de tres a ocho cámaras (Figueroa *et al.*, 2005).

Cibicidoides wuellerstorfi (Schwager, 1866)

Figura 3.8-3

Especie Tipo: *Anomalina wuellerstorfi* Schwager, 1866: 258, pl. 7, figs. 105, 107. *Truncatulina wuellerstorfi* (Schwager) Brady, 1884: 662, pl. 96, fig. 9 *Cibicides wuellerstorfi* (Schwager). Parker, 1954: 554, pl. 13, fig. 3, 6; Boltovskoy, 1981: 403, lám. 6, fig. 10; Poag, 1981: 52, pl. 3, figs. 1, 2.

Caracterización: Conchilla subcircular, suavemente aplanada; margen periférico provisto de una gruesa y ancha carena. Lado dorsal evolutivo y aplanado; lado ventral parcialmente evolutivo y con ocho a diez cámaras arqueadas, el umbilico levemente hundido. Paredes opacas notoriamente perforadas. Suturas curvadas, gruesas, no muy elevadas. Abertura en forma de arco que se prolonga hasta cerrar las cámaras en el lado (Figueroa *et al.*, 2005; como *Cibicides wuellerstorfi*).

Discorbis peruvianus (d'Orbigny, 1839)

Figura 3.9-1

Especie Tipo: *Rosalina peruviana* d'Orbigny, 1839b: 41, lám. 1, figs. 12 – 14. *Discorbis peruvianus* (d'Orbigny). Boltovskoy y Theyer, 1970: 325, lám. 2, fig. 22; Zapata y Varela, 1975: 16, lám. 1, fig. 10; Marchant, 1993: 65, lám. 2, fig. 2; Hromic, 2001c: 154, fig. 10.7.

Caracterización: Conchilla de contorno subcircular; lado dorsal algo convexo, el ventral cóncavo o plano; margen periférico subanguloso. Dorsalmente se observan todas las vueltas, pero en el lado ventral sólo se observa la última formada por siete a nueve cámaras. Paredes nítidamente perforadas. Suturas del lado dorsal limbadas, arqueadas; las del ventral son más angostas, menos arqueadas. La abertura se ubica en la base de la última cámara, es curvada, estrecha y prolongada en las cámaras anteriores (Figueroa *et al.*, 2005).

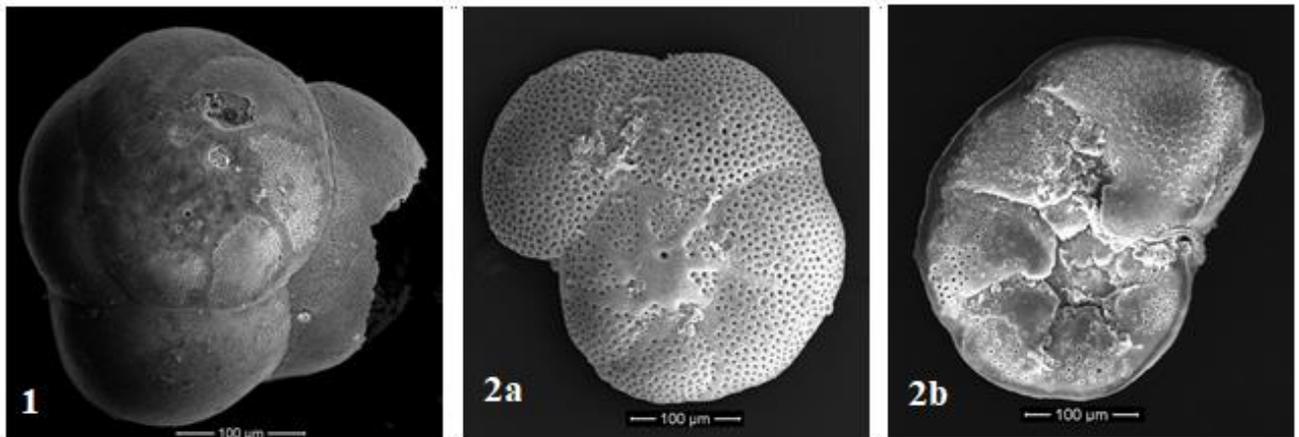


Figura 3.9: 1. *Discorbis peruvianus*, Vista dorsal. 2a. *Discorbis williamsoni*, Vista dorsal. 2b. *Discorbis williamsoni*, Vista ventral.

Discorbis williamsoni (Chapman y Parr, 1932)

Figura 3.9-2a, 2b

Especie Tipo: *Rotalina nitida* Williamson, 1858: 54, lám. 4, figs. 106-108 (emend. *Discorbis williamsoni* Chapman y Parr, 1932). *Discorbis williamsoni* Chapman y Parr, 1932: 226.

Caracterización: Conchilla circular, plano convexa o cóncava; margen periférico subagudo, carenado. Lado dorsal convexo, de forma cónica que desciende hasta el margen; el lado ventral plano o cóncavo, con el área ventral llevando umbo o botón de tamaño variable. Con seis a ocho y media cámaras en la última vuelta, las que aumentan regularmente de tamaño. Paredes lisas, densamente perforadas en el lado dorsal, y con poros distribuidos irregularmente en el lado ventral. Suturas limbadas, muy pronunciadas en el lado dorsal, deprimidas en el lado ventral. Abertura íntero-marginal, provista de un labio (Figuroa *et al.*, 2005).

Epistominella exigua (Brady, 1884)

Figura 3.10-1

Especie Tipo: *Pulvinulina exigua* Brady, 1884. *Challenger Exped., Repts., Zool., v. 9, p. 696, pl. 103, figs. 13, 14.*

Caracterización: Conchilla trocoidal de contorno subcircular, ligeramente lobulado, margen periférico subagudo, biconvexo; cámaras muy infladas muy ligeramente, 5-6 en en la última vuelta; pared transparente a translúcida; suturas ligeramente arqueadas, tangenciales y limbadas en el lado espiral, deprimidas en el lado umbilical; abertura grande, paralela al margen periférico, más ancha en la base donde se apoya contra el margen de la cámara (Boltovskoy *et al.*, 1980).

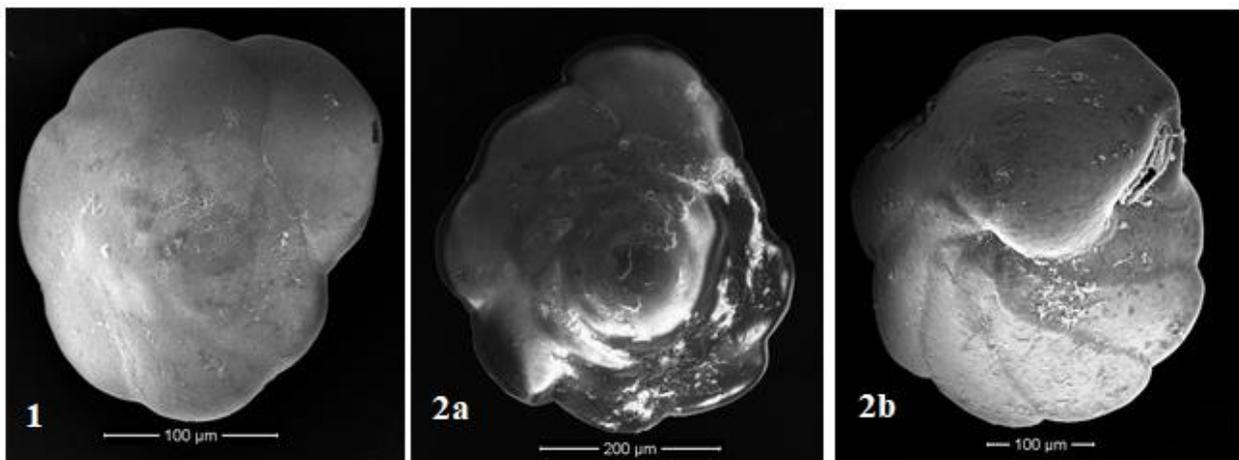


Figura 3.10: 1. *Epistominella exigua*, Vista dorsal. 2a. *Epistominella pacifica*, Vista dorsal. 2b. *E. pacifica*, Vista ventral.

Epistominella pacifica (Cushman, 1927)

Figura 3.10-2a, 2b

Especie Tipo: *Pulvinulinella pacifica* Cushman, 1927: 165, lám. 5, Figs. 14, 15. *Epistominella* cf. *pacifica* (Cushman) Boltovskoy & Theyer, 1970: 328, lám. 2, fig. 23.

Caracterización: Conchilla trocoidal; el lado dorsal plano o levemente convexo, el ventral muy convexo; margen periférico anguloso, formando una débil quilla, algo lobulado. Con cinco a siete cámaras en la última vuelta, no infladas, aumentando gradualmente de tamaño en el lado ventral, en el que se aprecia un umbilico nítido y profundo; en algunos ejemplares este último no se aprecia. Paredes algo transparentes, finamente perforadas. Suturas dorsales oblicuas, un poco curvadas; las ventrales un tanto deprimidas, levemente curvas. Abertura alargada, en la parte superior de la cara oral, paralela al margen periférico (Figueroa *et al.*, 2005).

Epistominella sp.

Figura 3.11-1

Caracterización: Conchilla trocoidal; el lado dorsal levemente convexo y el ventral muy convexo; margen periférico anguloso, formando una quilla fuerte, algo lobulado. Con cinco a siete cámaras en la última vuelta, levemente infladas, aumentando gradualmente de tamaño en el lado ventral, en el que se aprecia un umbilico nítido y profundo. Paredes opacas, finamente perforadas. Suturas dorsales oblicuas; las ventrales un tanto deprimidas, levemente curvas.

Observación: Sólo se encontró un representante.

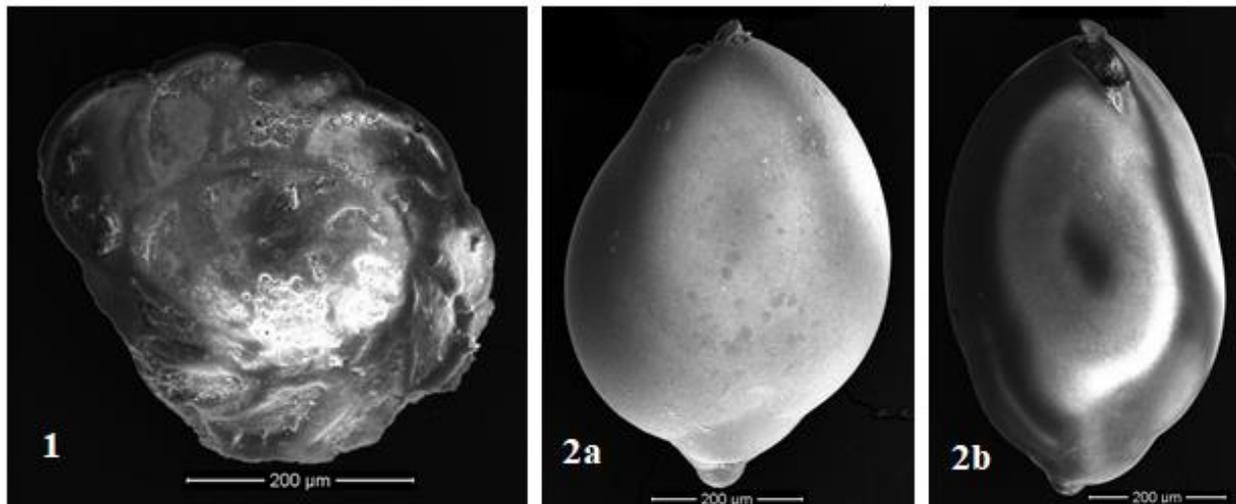


Figura 3.11: 1. *Epistominella* sp., Vista dorsal. 2a. *Globobulimina pacifica*, Vista lateral. 2b. *Globobulimina pacifica*, Vista apertural.

Globobulimina pacifica Cushman, 1927

Figura 3.11-2a, 2b

Especie Tipo: *Globobulimina pacifica* Cushman, 1927, p. 67, pl. 14, fig. 12; Cushman y Parker, 1947 p. 134, pl. 20, fig. 7; Galloway and Wissler, 1927, p. 74, pl. 11, fig. 18.

Caracterización: Conchilla subglobular translúcida con tres cámaras que crecen en espiral hacia el exterior encerrando a las cámaras anteriores, pared muy finamente perforada; abertura en forma de lazo con un borde leve como diente y tubo espiral interno.

Gyroidina sp.

Caracterización: Conchilla trocoespiral, lado dorsal plano o levemente convexo; sutura dorsal poco deprimida, las camerales recurvadas y deprimidas en las últimas cámaras. Lado ventral un poco convexo, completamente involuto, suturas poco deprimidas.

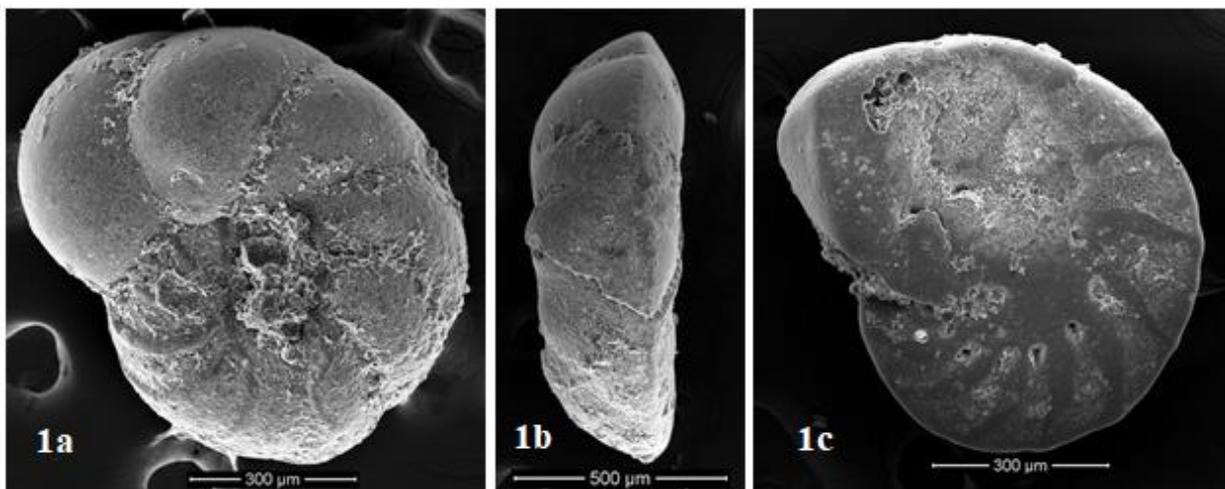


Figura 3.12: 1a. *Hanzawaia boueana*, Vista ventral. 1b. *H. boueana*, Vista lateral. 1c. *H. boueana*, Vista dorsal.

Hanzawaia boueana (d'Orbigny, 1846)

Figura 3.12-1a, 1b, 1c

Especie Tipo: *Truncatulina boucalla* d'Orbigny, 1846. Foram. Foss. Bass. Tert. Vienne, p. 169, pl. 9, figs. 24-26.

Caracterización: Conchilla trocoespiral de contorno ovada a subcircular, lobulado, lado dorsal plano que muestra suturas fuertemente curvadas, lado ventral convexo con umbilico ligeramente deprimido, superficie casi lisa; cámaras curvadas, 7-9 en última espiral; pared opaca, finamente perforada, excepto en la cara de apertura; suturas limbadas, fuertemente curvadas, levantadas o enrasadas en las primeras cámaras, deprimidas en cámaras posteriores; abertura en un arco periférico bordeado por un labio delgado, aberturas suplementarias en el lado espiral debajo de aletas camerales.

Hanzawaia sp.

Caracterización: Muy parecido a *H. boueana*, pero suturas en el lado son casi inexistentes, además de no mostrar crecimiento en las últimas cámaras.

Lagena laevis (Montagu, 1803)

Figura 3.13-1

Especie Tipo: *Vermiculum laeve* Montagu, 1803. Testac. Brit., p. 524. *Lagena laevis* (Montagu), Williamson, 1848. Ann. Mag. Nat. Hist.. ser. Lv. I, p. 12, pI. L figs. I, 2.

Caracterización: Conchilla lageniforme u oval, de sección transversal circular, asimétrica, con su mayor diámetro al centro de la cámara. Extremo aboral recto con leves costillas. Paredes finas, transparentes. Extremo de abertura se estrecha gradualmente y termina en un largo cuello de pared gruesa, donde aparece una abertura redondeada acompañada de un débil labio.

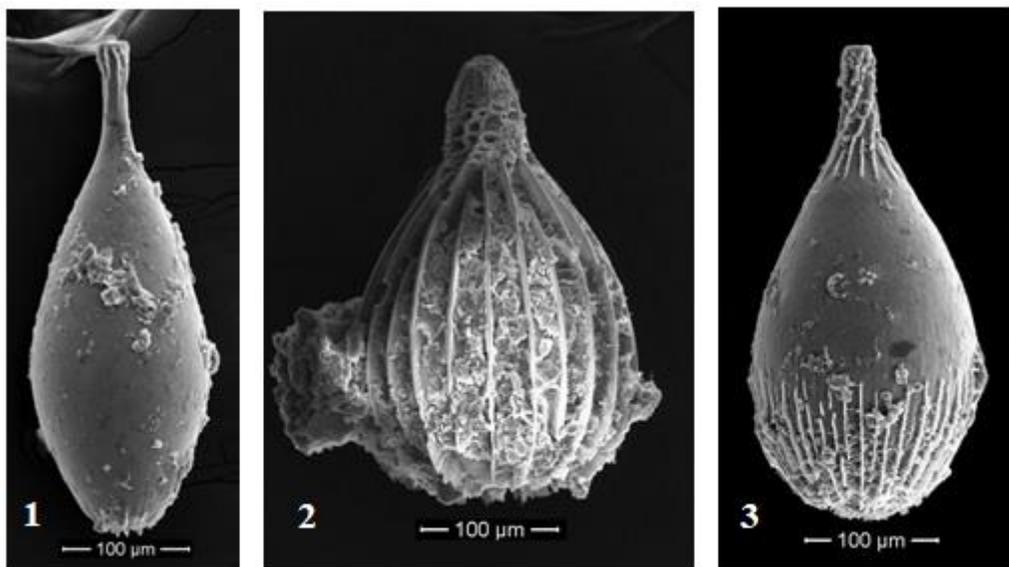


Figura 3.13: 1. *Lagena laevis*, Vista lateral. 2. *Lagena striata*, Vista lateral. 3. *Lagena* sp., Vista lateral.

Lagena striata (d'Orbigny, 1839)

Figura 3.13-2

Especie Tipo: *Oolina striata* d'Orbigny, 1839b: 21, lám.5, fig. 12. *Lagena substriata*, nob. Williamson, 1848: 15, tab. 2, fig. 1; *Lagena striata* (d'Orbigny) Brady, 1884: 460, tab. 57, figs. 22, 24; Heron-Allen y Earland, 1932: 366, tab. 10, fig. 11, 12; Boltovskoy y Theyer, 1970: 342, lám. 3, figs. 17 - 23; Boltovskoy *et al.*, 1980: 37, lám. 20, fig. 11 - 14, Zapata y Cea, 2004: 29, lám. 10, figs. 5 y 6.

Caracterización: Conchilla subcircular u oval, de sección transversal circular. Extremo aboral redondeado. Paredes finas, transparentes, cubiertas con finas costillas longitudinales que abarcan toda la conchilla, las que no se disponen con estricta regularidad, ya que algunas son más cortas. Abertura pequeña, redondeada, situada en el extremo de un largo cuello, cuyos lados están ornamentados por un diseño poligonal (Figuroa *et al.*, 2006).

Lagena sp.

Figura 3.13-3

Caracterización: Conchilla subcircular a oval, de sección transversal circular. Extremo aboral redondeado. Paredes finas, transparentes, cubiertas con gruesas costillas longitudinales que cubren sólo desde el extremo aboral hasta la mitad de la cámara. Abertura pequeña, redondeada, situada en el extremo de un largo cuello que presenta costillas en la envuelven en forma de espiral.

Lenticulina convergens (Bornemann, 1855)

Figura 3.14-1

Especie Tipo: *Cristellaria convergens* Bornemann, 1855 p. 307-371

Caracterización: Conchilla planoespiral, involuta, con una papila central, de la cual se salen suturas curvas, gruesas; con una marcada quilla en la periferia. Pared calcarea, lisa, opaca, de color amarillento y sin poros. Abertura terminal prominente, radiada. Los individuos encontrados son de gran tamaño.

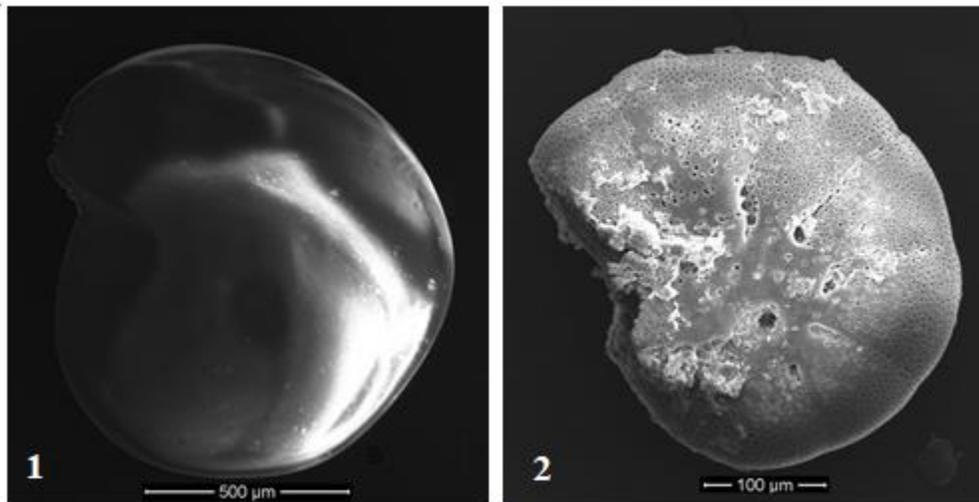


Figura 3.14: 1. *Lenticulina convergens*, Vista lateral. 2. *Melonis* sp., Vista lateral.

Melonis sp.
Figura 3.14-2

Caracterización: Conchilla simétrica, involuta, margen periférico redondeado, biumbilicado. Umbilico deprimido. Pared calcárea perforada. Suturas levemente deprimidas, curvadas. No se observó abertura.

Nonionella auris (d'Orbigny, 1839)
Figura 3.15-1

Especie Tipo: *Valvulina auris* d'Orbigny, 1839b: 47, lám. 2, fig. 15-17. *Nonionella auris* (d'Orbigny). Cushman y Kellett, 1929: 5, lám. 1, fig. 9; lám. 2, figs. 2 - 3; Boltovskoy y Theyer, 1965: 145, fig. 6; 1970: 347, lám. 4, fig. 8; Zapata y Varela, 1975: 18, lám. 2, fig. 9; Zapata *et al.*, 1995: 27, lám. 5, figs. 13-15.

Caracterización: Conchilla oval, un tanto aplanada lateralmente; margen periférico levemente redondeado, algo lobulado. Con nueve a once cámaras en la última vuelta, un poco infladas, y levemente curvadas; la última cámara se extiende por el lado ventral, en forma de un lóbulo digitiforme que invade el área umbilical. Paredes laterales lisas, opacas o semitransparentes, finamente perforadas. Suturas no muy arqueadas, deprimidas. Abertura angosta, situada en la cara oral convexa de la última cámara, extendiéndose hacia el umbilico (Figuroa *et al.*, 2005).

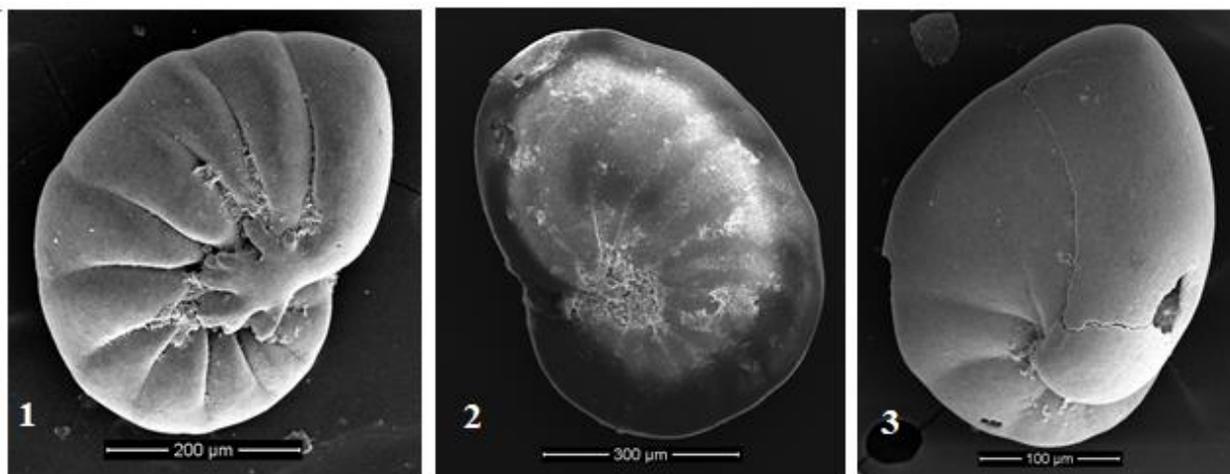


Figura 3.15: 1. *Nonionella auris*, Vista ventral. 2. *Nonionella chiliensis*, Vista ventral. 3. *Nonionella turgida*, Vista umbilical.

Nonionella chiliensis Cushman & Kellett, 1929

Figura 3.15-2

Especie Tipo: *Nonionella chiliensis* Cushman y Kellett, 1929, U.S. Nat. Mus., Proc., v. 75, art. 25. p. 6, pl. 2, fig. 4.

Caracterización: Conchilla oval a circular, margen periférico subagudo. Lado dorsal ligeramente convexo, lado ventral con umbilico deprimido. Con diez a once cámaras en la última vuelta, bajas, no infladas, y levemente curvadas. Paredes laterales lisas, opacas o semitransparentes, finamente perforadas. Suturas arqueadas, deprimidas. Abertura angosta, situada en la cara oral triangular convexa de la última cámara.

Nonionella turgida (Williamson, 1858)

Figura 3.15-3

Especie Tipo: *Rotalina turgida* Williamson, 1858: 50, lám. 4, figs. 95 - 97. *Nonionella turgida* (Williamson). Boltovskoy y Theyer, 1970: 348, lám. 4, fig. 10; Hromic', 1999: 94, fig. 61.

Caracterización: Conchilla oval, asimétrica; margen periférico subagudo, redondeado en las últimas cámaras. Con nueve a diez cámaras en la última vuelta, triangulares, levemente arqueadas; la última cámara es triangular, convexa, y se prolonga en un amplio lóbulo redondeado, cubriendo gran parte del umbilico. Paredes lisas, transparentes. Suturas levemente arqueadas, algo deprimidas. La abertura es una hendidura en la sutura basal de la última cámara, prolongándose hacia el umbilico (Figueroa *et al.*, 2005).

Nonionella sp.1

Caracterización: Conchilla oval; margen periférico subagudo. Con diez a once cámaras en la última vuelta, bajas, ligeramente infladas, y levemente curvadas. Paredes laterales lisas, más bien opacas, finamente perforadas. Suturas arqueadas, levemente deprimidas. No se observa la abertura.

Nonionoides grateloupi (d'Orbigny, 1839)

Figura 3.16-1

Especie Tipo: *Nonionina grateloupi* d'Orbigny, 1839b: 46, lám. 6, figs. 6, 7. *Nonion grateloupi* Boltovskoy y Theyer, 1970: 347, lám. 5, fig. 2. *Florilus grateloupi* (d'Orbigny). Zapata y Alarcón, 1988: 84, lám. 9, figs. 1-3. *Nonionoides grateloupi* (d'Orbigny). Loeblich y Tappan, 1988: 620.

Caracterización: Conchilla planispiral, bilateral, comprimida, borde periférico subagudo a redondeado. Nueve a trece cámaras en la última vuelta, arqueadas, que aumentan más

rápida en anchura que en altura; umbilico pequeño, deprimido, suturas arqueadas y deprimidas. Pared calcárea translúcida, perforada. Abertura terminal, como hendidura, redondeada de gránulos (Figuroa *et al.*, 2005).

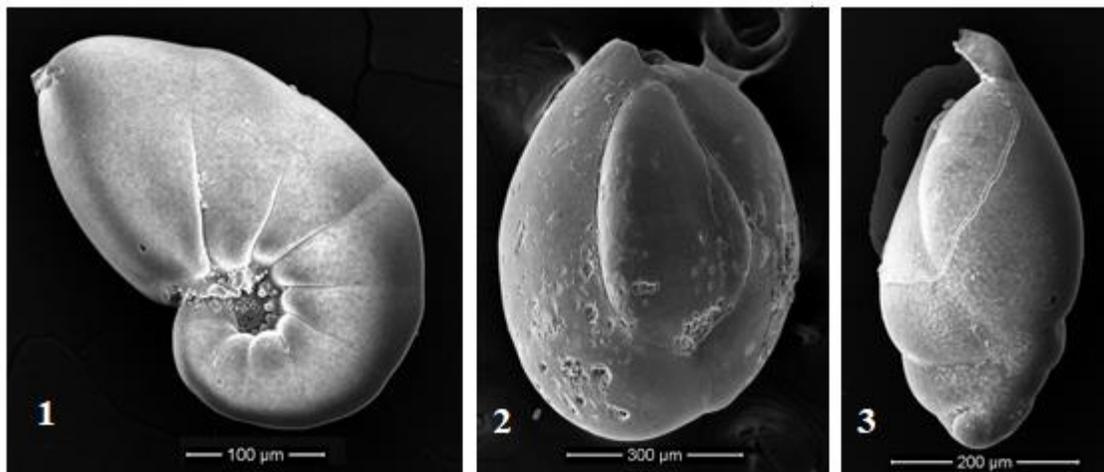


Figura 3.16: 1. *Nonionoides grateloupi*, Vista ventral. 2. *Quinqueloculina seminula*, Vista ventral. 3. *Stainforthia fusiformis*, Vista lateral.

Pullenia sp.

Caracterización: Conchilla subesférica, trocoespiral, ligeramente comprimida, periferia redondeada. Con cuatro a cinco cámaras en la última vuelta; suturas deprimidas. Pared calcárea, lisa, blanca, finamente perforada. No se pudo observar la sutura.

Quinqueloculina seminula (Linnaeus, 1758)

Figura 3.16-2

Especie Tipo: *Serpula seminulum* Linné, 1767: 1264. *Quinqueloculina araucana* d' Orbigny, 1839b: 76, lám. 9, figs. 13 – 15. *Quinqueloculina magellanica* d' Orbigny, 1839b: 77, lám. 9, figs. 19 - 21. *Miliolina seminulum* (Linné). Heron Allen y Earland, 1932: 313, lám. 6, figs. 25 - 40. *Quinqueloculina seminulum* (Linné) Boltovskoy y Theyer, 1970: 353, lám. 4, fig. 18; Zapata y Varela, 1975: 18, lám. 3, fig. 2.

Caracterización: Conchilla oval, con su ancho máximo aproximadamente en su parte central. El lado que muestra las 3 cámaras es poco convexo, casi plano; el lado opuesto, de 4 cámaras, con una marcada convexidad; margen periférico redondeado; la sección transversal algo triangular. Paredes lisas, brillantes, porcelanoides. Suturas nítidas, deprimidas. Abertura circular, con un diente simple (Figuroa *et al.*, 2006)

Stainforthia fusiformis (Williamson, 1848)

Figura 3.16-3

Especie Tipo: *Bulimina fusiformis* d'Orbigny var. *Fusiformis* Williamson, 1858: 63, lám. 5, figs. 129-130. *Fursenkoina fusiformis* Murray, 1971 *vide* Murray, 2003: 26, lám. 10.1-10.4.

Caracterización: Conchilla estrecha, elongada, periferia redondeada. Cámaras altas y estrechas, suavemente infladas, biseriales. Pared calcárea, lisa sin perforaciones. Suturas deprimidas y oblicuas. Abertura estrecha, elongada en la última cámara (Figueroa *et al.*, 2005).

Textularia gramen d'Orbigny, 1846

Figura 3.17-1

Especie Tipo: *Textularia gramen* d'Orbigny, 1846. *Foram. Foss. Bass. Tert. Vienne*, p. 248, pl. 15. figs. 4, 6.

Caracterización: Conchilla biserial variable en forma, subromboidal en la sección transversal, margen periférico agudo a subaguda, lobulado; cámaras bajas, curvas, alargadas, 6-9 pares; pared aglutinada lisa, porosa, compuesta de granos blancos grises relativamente pequeños mezclados con algunos minerales pesados; suturas ligeramente deprimidas; abertura una rendija ancha, a veces con borde (Boltovskoy *et al.*, 1980).

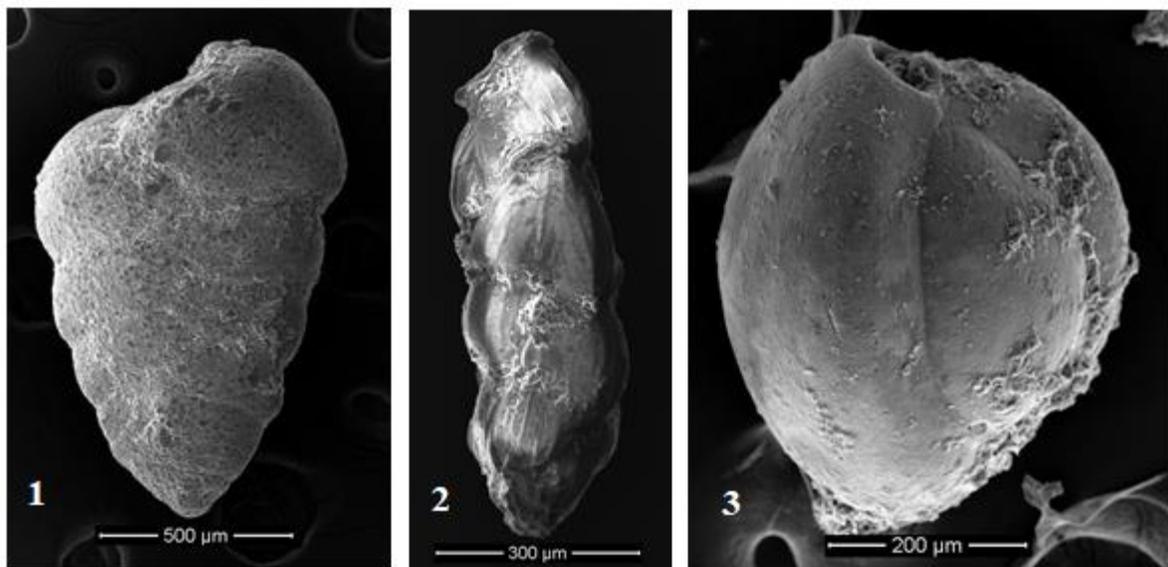


Figura 3.17: 1. *Textularia gramen*, Vista dorsal. 2. *Trifarina earlandi*, Vista lateral. 3. *Triloculina trigonula*, Vista apertural.

Trifarina earlandi (Parr, 1950)

Figura 3.17-2

Especie Tipo: *Trifarina earlandi* Parr, W., J., 1950, Repts., Adelaide, ser. B, pt. 6, 5, 340

Caracterización: Conchilla subfusiforme, alargada, periferia lobulada, cámaras infladas y superpuestas. Pared con costillasa estrellas y fuertes, con abertura con un labio en el extremo de un corto cuello.

Triloculina trigonula (Lamarck, 1804)

Figura 3.17-3

Especie Tipo: *Miliolites (trigonula)* Lamarck, 1804: 351, fig. 4 *Triloculina trigonula* d'Orbigny, 1826: 299, figs. 5-9. *Triloculina trigonula* (Lamarck) Cushman, 1929: 56, figs. 10a, b; figs. 1a-c, 2a-c.

Caracterización: Conchilla oblonga, cuyo largo excede poco del ancho relativamente. La sección transversal presenta contornos aproximados de un triángulo, con ángulos redondeados y lados convexos. Suturas nítidas, paredes lisas, brillantes de un color blanco. Abertura circular, provista de un diente, ligeramente ensanchado en el extremo.

Uvigerina peregrina Cushman, 1823

Figura 3.18-1

Especie Tipo: *Uvigerina peregrina* Cushman, 1918: 166, lám. 42, figs. 7-10; Boltovskoy y Theyer, 1970: 363, lám. 4, fig. 23.

Caracterización: Conchilla de contorno ovalado, lobulada. Cámaras dispuestas en tres a cuatro vueltas; las cámaras iniciales bajas y poco infladas, en cambio las últimas altas e infladas. Paredes opacas o semitransparentes, finamente perforadas cubiertas con costillas longitudinales altas, delgadas, variables e irregulares. Suturas nítidas, deprimidas. Abertura subcircular, situada sobre un corto cuello provisto de un fino labio y de un diente bien desarrollado (Figuroa *et al.*, 2005).

Uvigerina striata d'Orbigny, 1839

Figura 3.18-2

Especie Tipo: *Uvigerina striata* d'Orbigny, 1839. Voy. Amer. Merid., v. 5, pt. 5, p. 53, pl. 7, fig. 16.

Caracterización: Conchilla de contorno lobulado, afilada hacia la base; 3 a 4 vueltas; cámaras altas; pared translúcida a opaca, delgada, densamente perforada, costillas longitudinales altas,

delgadas; suturas deprimidas; abertura pequeña con labio grueso, cuello corto y diente bien desarrollado.

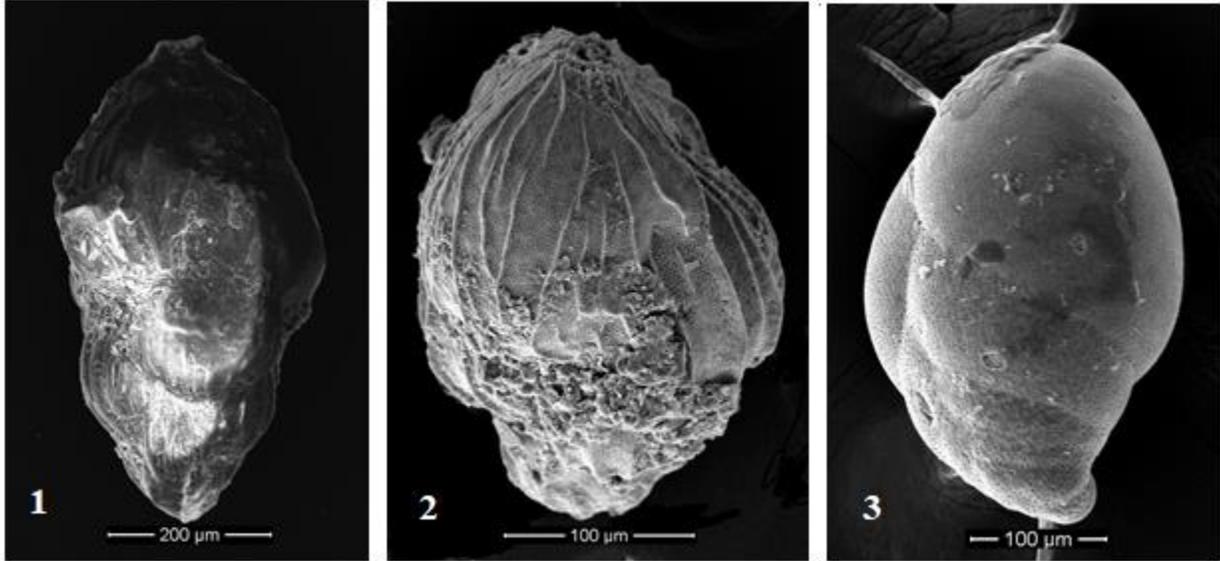


Figura 3.18: 1. *Uvigerina peregrina*, Vista lateral. 2. *Uvigerina striata*, Vista lateral. 3. *Virgulinella rotundata*, Vista lateral.

Virgulinella rotundata (Parr, 1950)

Figura 3.18-3

Especie Tipo: *Virgulina rotundata* Parr, 1950: 250.

Caracterización: Conchilla elongada, oval en sección, primeros estados triseriales, luego biseriales. Cámaras suavemente infladas aumentando de grosor con la longitud. Pared calcárea suavemente perforada. Suturas deprimidas y oblicuas. Abertura oval sobre la última cámara (Figuroa *et al.*, 2005).

3.2 Curvas de abundancia e interpretación paleoecológica

El orden dominante a lo largo de todo el registro sedimentario es indudablemente el orden Rotaliina, que compone el 99,8% del total de foraminíferos. Este orden se caracteriza por conchillas multiloculares, enrolladas, biseriales o uniseriales, de paredes calcáreas. Las especies correspondientes a los otros órdenes (Miliolida, Textulariida y Lagenida), solo aparecen esporádicamente y se consideran especies secundarias. A continuación, se presentan las curvas de abundancia de cada familia, desde las más abundantes a las más escasas.

3.2.1 Familia Bolivinidae

La familia Bolivinidae es la que tiene la mayor cantidad de representantes en todo el registro sedimentario, constituyendo el 57% del total de foraminíferos encontrados. Su único género registrado, *Bolivina*, es el que posee la mayor cantidad de especies, en total siete: *B. interjuncta*, *B. plicata*, *B. seminuda*, *B. spissa*, *B. striatula*, *Bolivina* sp.1, *Bolivina* sp.2. De todas estas especies, solo *B. seminuda* y *B. plicata* son importantes en términos de abundancia, constituyendo el 86,66% y 10,23%, respectivamente. *Bolivina* se describe como un género de hábito infaunal o epifaunal, de vida libre, que habita sedimentos fangosos, siendo algunas especies tolerantes a la disoxia, de aguas cálidas y se pueden encontrar en la plataforma interna hasta la zona batial (Murray, 2006). Es reconocido como uno de los géneros más resistentes a la carencia de oxigenación de las aguas, seguido de los géneros *Suggrunda* y *Brizalina* (Boltovskoy, 1965; Boltovstoy, 1976). Se han encontrado ejemplares vivos de *Bolivina plicata* en aguas con una cantidad mínima de oxígeno (Boltovskoy, 1965). Respecto a *Bolivina seminuda*, Smith (1963) describen su presencia en aguas con muy bajo contenido de oxígeno (0,38 ml/l), mientras que en estudios anteriores se ha descrito que esta especie, junto con *Suggrunda eckisi*, pueden tolerar un contenido de oxígeno muy escaso, incluso menor a 0,1 ml/l (Emery y Hülsemann, 1961). Los datos indicarían que el género *Bolivina*, en conjunto con los géneros *Bulimina*, *Uvigerina*, *Buliminella* y *Globobulimina*, aumentarían su abundancia a menor cantidad de oxígeno disuelto en el agua (Boltovskoy, 1991; Sen Gupta y Machain-Castillo, 1993).

Bolivina seminuda se encuentra presente en todo el testigo, desde la base hasta el techo. Es la especie más abundante, pero aun así presenta grandes variaciones en su abundancia. Presenta su mayor peak a los 5 cm, donde se estimaron una cantidad de 3809 individuos por gramo, mientras que la menor cantidad de individuos de esta especie fue a los 44 cm, donde se estimó una cantidad de 60 ind./gramo (Figura 3.19a). Dado que su abundancia varía considerablemente a lo largo del testigo, se pueden diferenciar 4 tramos bien definidos:

- **94 a 79 cm:** Progresivo aumento en la presencia de esta especie, partiendo de una baja cantidad (156 ind./gramo) en la base del testigo, hasta alcanzar una cantidad de 1214 ind./gramo a los 79 cm. Sobre los 79 cm, se observa un marcado aumento en la cantidad de individuos.
- **79 a 65 cm:** Gran abundancia de *Bolivina seminuda*, alcanzando un peak de 3464 ind./gramo a los 73 cm, y presentando una menor cantidad de individuos a los 67 cm.
- **65 a 25 cm:** La cantidad de individuos de *B. seminuda* vuelve a disminuir, pero este tramo se presenta más variable, teniendo en promedio 750 ind./g, y presentando peaks que alcanzan los 2100 ind./gramo. Es importante mencionar la existencia de valles donde se encontraron 60 ind./gramo, a los 44 cm.
- **25 cm hasta el techo:** La cantidad de individuos de *B. seminuda* aumenta sostenidamente, pero se presenta de forma más irregular. Alcanza un peak de 3800 ind./g.

Bolivina plicata también está presente en todo el testigo de sedimento, aunque sea menos abundante que *B. seminuda*. Presenta un peak a los 21 cm, donde se estimaron una cantidad de 524 individuos por gramo, mientras que la menor cantidad de individuos de esta especie fue a los 62 metros, donde se observó una ausencia total (Figura 3.19b). Dado que su abundancia varía considerablemente y de forma abrupta a lo largo del testigo, se pueden diferenciar 4 unidades bien definidas, siendo estas de base a techo:

- **94 a 73 cm:** Gran abundancia de esta especie. Partiendo desde valores medios (57 ind./gramo) en la base del testigo, aumenta rápidamente a los 220 ind./gramo en solo 2 centímetros. Alcanza valores de 412 ind./gramo a los 79 metros. A los 73 cm, presenta una abrupta caída en la cantidad de individuos.
- **73 a 44 cm:** Muy escasa presencia de *B. plicata*, siendo su mayor presencia 130 ind./gramo a los 65 cm. A los 62 cm no se encontró ningún individuo de esta especie. Sobre los 44 cm, se observa un marcado aumento en la cantidad de individuos.
- **44 a 6 cm:** La cantidad de individuos de *B. plicata* vuelve a aumentar considerablemente, pero este tramo se presenta más variable, presentando peaks que alcanzan los 524 ind./gramo y valles donde se encontraron 75 ind./gramo. Hacia los 6 cm, la cantidad de individuos comienza a disminuir sostenidamente.
- **6 cm hasta el techo:** La cantidad de individuos de *B. plicata* disminuye sostenidamente, presentando sólo entre 18 a 19 ind./gramo en los último 2 cm de testigo.

Los límites indicados por la variación en la abundancia de *B. plicata* permiten definir las 4 unidades que representan los cambios en la asociación faunística a lo largo del testigo (Figura 3.19).

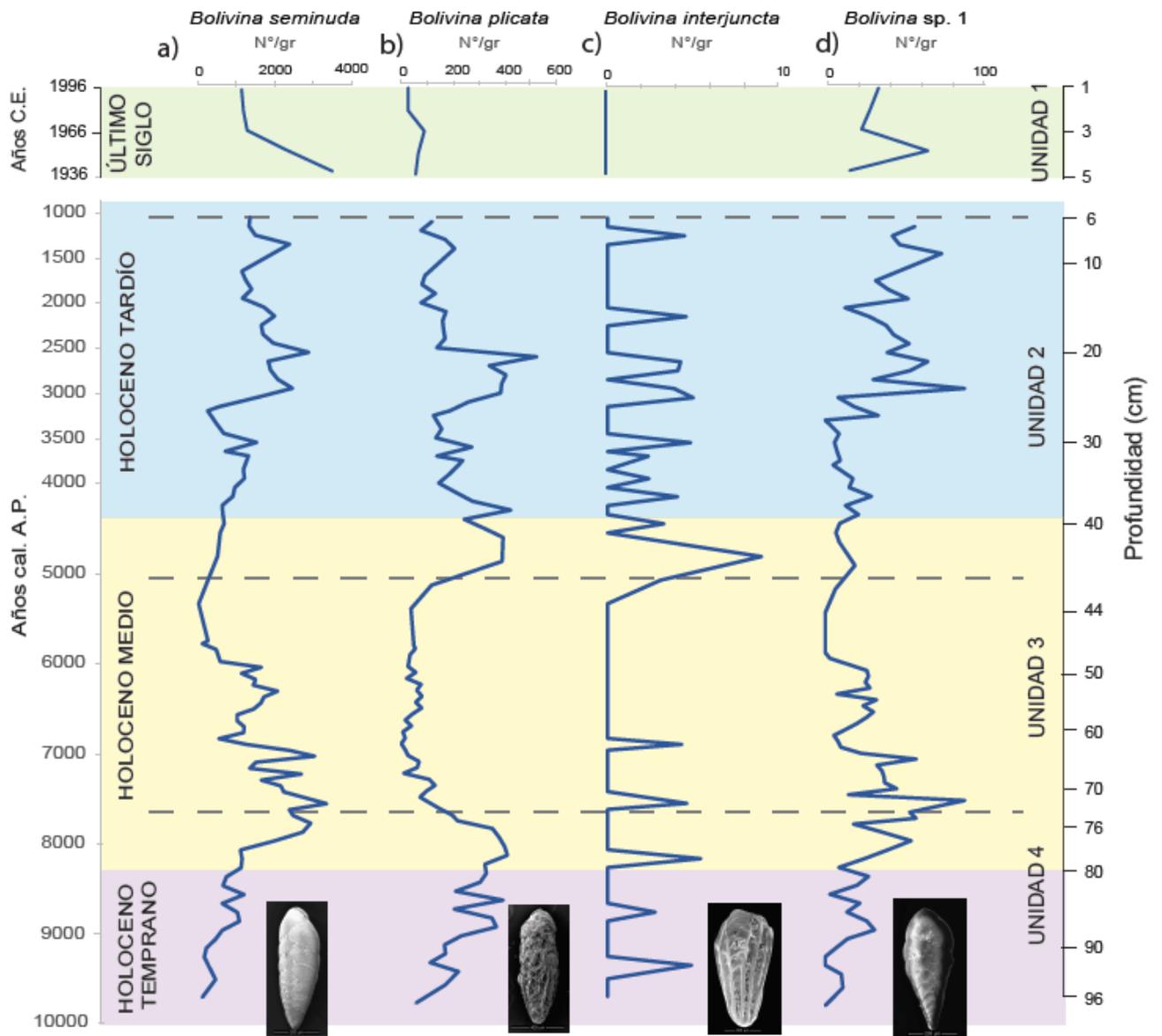


Figura 3.19 Curvas de abundancia de la familia Bolivinidae. a) Curva de *Bolivina seminuda* b) Curva de *B. plicata* c) Curva de *B. interjuncta* d) Curva de *Bolivina sp.1*. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

La presencia de *Bolivina interjuncta* es más bien baja, y su curva no presenta ningún patrón destacable (Figura 3.19c). Por otro lado, la curva de *Bolivina* sp.1 sigue un patrón idéntico a *Bolivina seminuda* (Figura 3.19d). Al ser individuos reconocidos solo hasta nivel genérico y tener un gran parecido morfológico son *B. seminuda*, se interpretan los mismos requerimientos ecológicos. Finalmente, las especies *Bolivina spissa*, *Bolivina striatula* y *Bolivina* sp.2 son muy escasas, por lo que no permiten un análisis de abundancia.

3.2.2 Familia Nonionidae

La familia Nonionidae es la familia con la mayor cantidad de géneros: *Nonionella*, *Nonionoides* y *Pullenia*, además de ser la segunda más abundante al conformar el 14,21% del total de foraminíferos. El género *Nonionella* es sin duda el más numeroso, ya que abarca el 98,2% de la familia, mientras que los géneros *Nonionoides* y *Pullenia* sólo abarcan el 1,6% y 0,1%, respectivamente. *Nonionella* es descrita como un género de hábito infaunal, de vida libre, sedimentos preferentemente fangosos, con algunas especies tolerantes a la disoxia, detritívoros, de aguas cálidas y que pueden encontrarse entre los 10 a 1000 m de profundidad, desde la plataforma a la zona batial (Murray, 2006). A su vez, dentro de este género, es la especie *N. auris* la más abundante (98,7% del género), y se encuentra distribuida a lo largo de todo el registro sedimentario con fuertes variaciones en su abundancia. Es abundante entre los 92 a 65 cm (Figura 3.20a), alcanzando 944 ind./g, mientras que entre los 65 a 38 cm su abundancia baja drásticamente, llegando incluso a los 4 ind./g. Sobre los 38 cm, su abundancia vuelve a aumentar alcanzando 860 ind./g, para sólo disminuir fuertemente en los últimos 4 cm hasta el techo. *N. turgida*, la segunda especie más abundante de este género (1,07%), presenta una concentración entre los 40 a los 8 cm (Figura 3.20b). *Nonionella* sp.1 es escaso y solo se encuentra entre los 94 y 73 cm (Figura 3.20c). El género *Nonionoides*, con su único representante *N. grateloupi*, si bien escaso (1,65% de la familia), se encuentra presente en casi todo el testigo, pero se puede observar una mayor abundancia entre los 94 a 78 cm (Figura 3.20d), donde alcanza los 40 ind./g., entregando la misma información que *N. auris*. El género *Pullenia* no presenta ninguna tendencia, dada su escasa presencia (Figura 3.20e).

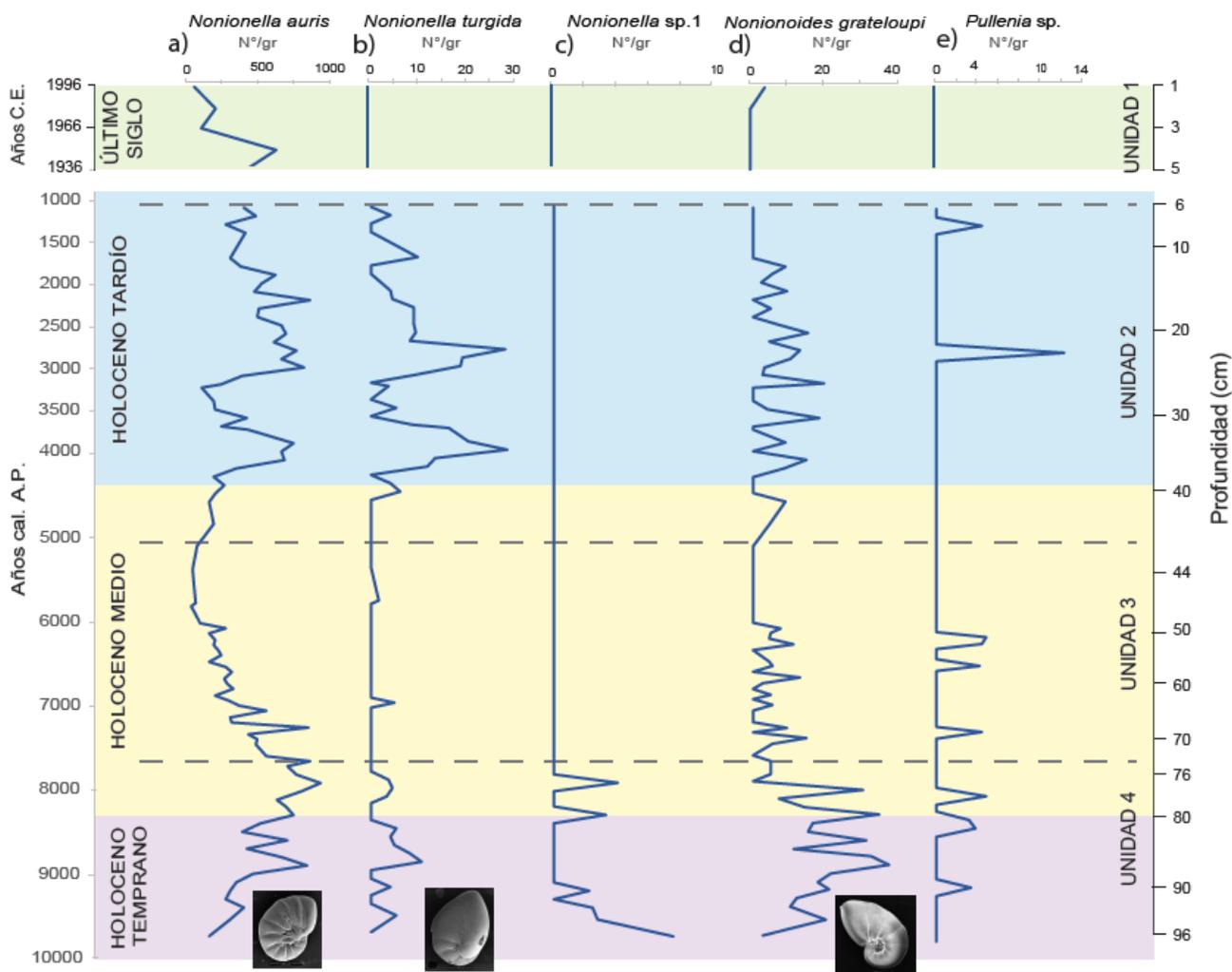


Figura 3.20 Curvas de abundancia de la familia Nonionidae. a) Curva de *Nonionella auris* b) Curva de *N. turgida* c) Curva de *Nonionella* sp.1 d) Curva de *Nonionoides grateloupi* e) Curva de *Pullenia* sp. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.3 Familia Cancrisidae

La familia Cancrissidae se encuentra representada solo por un género: *Cancris*. Pese a esto, es la tercera familia más abundante ya que la especie *Cancris inflatus*, única especie encontrada, aporta el 10,67% del total de foraminíferos. El género *Cancris* se ha descrito como un género de hábito epifaunal, de vida libre, posiblemente detritívoro, de temperatura subtropical (aguas templadas cálidas), que habita a lo largo de la plataforma entre los 50 y 150 m (Murray, 2006). La especie *Cancris inflatus* se encontró a lo largo de todo el registro sedimentario, presentando notorias variaciones en su abundancia (Figura 3.21a). En la base del testigo tiene una baja presencia (114 ind./g.) aumentando levemente hasta los 76 cm. Entre los 76 cm y 43 cm, tiene una muy baja presencia (170 ind./g promedio). Sobre los 43 cm presenta una gran abundancia alcanzando peaks de 1120 ind./g, alternando con tramos donde la abundancia

disminuye. Sobre los 7 cm hasta el techo, la presencia de *C. inflatus* disminuye drásticamente, llegando a los 43 ind./g.

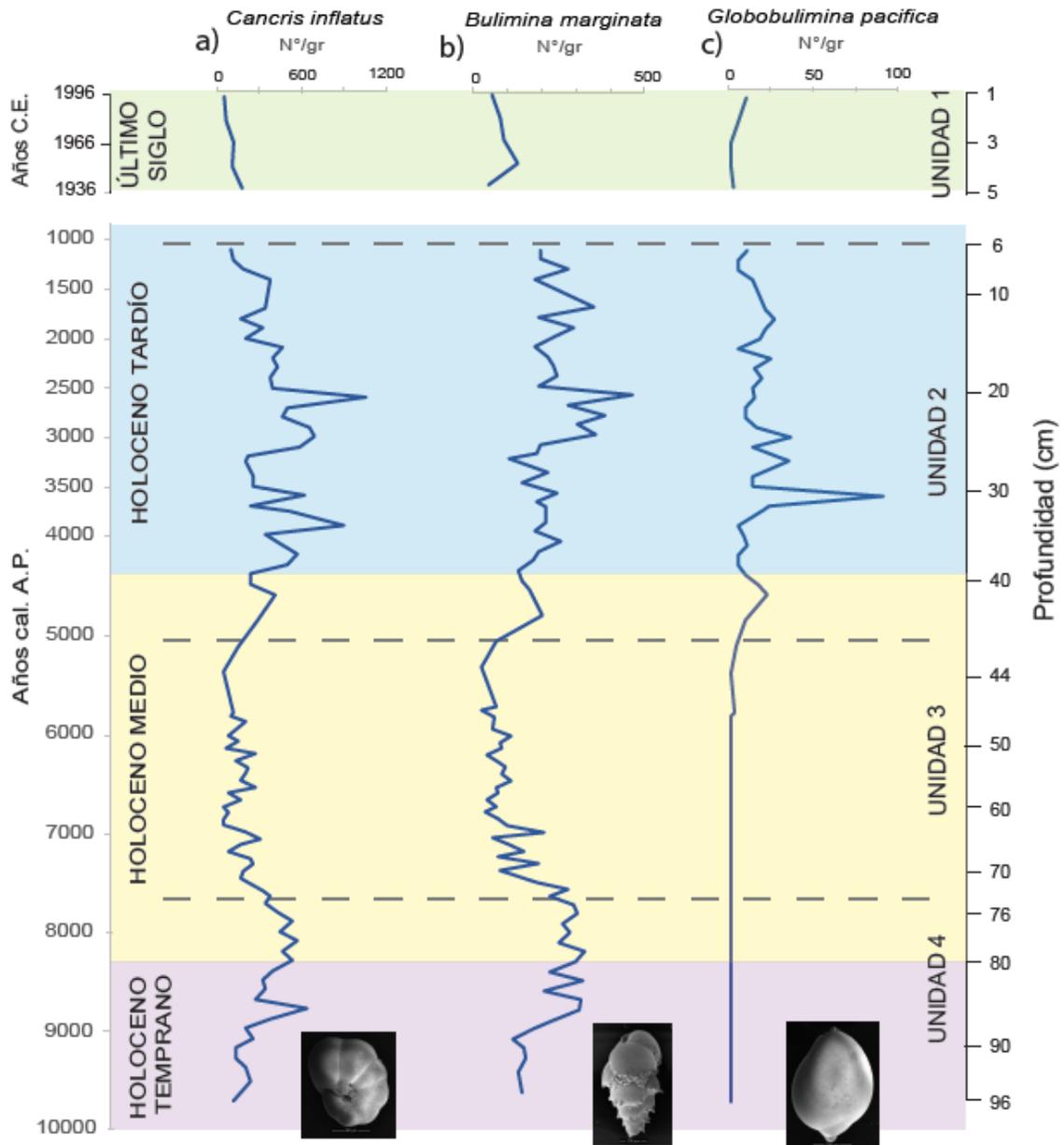


Figura 3.21 Curvas de abundancia de las familias Cancrisidae y Buliminidae. a) Curva de *Cancris inflatus* b) Curva de *Bulimina marginata* c) Curva de *Globobulimina pacifica*. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.4 Familia Buliminidae

La familia Buliminidae aporta el 5,9% del total de foraminíferos, siendo así la cuarta familia más abundante. Está representada por los géneros *Bulimina* (95,4%), con la especie *Bulimina marginata*, y *Globobulimina* (4,6%), con la especie *Globobulimina pacifica*. El género *Bulimina* se reconoce como de hábito infaunal, de vida libre, que habita en limos a arenas finas en la plataforma interna a la zona batial, con algunas especies tolerantes a la disoxia, posiblemente detritívoro, de aguas frías (Murray, 2006). *B. marginata* se encontró a lo largo de todo el testigo, con diferencia en su abundancia. En los primeros 4 cm (Figura 3.21b) desde la base del testigo se observó una baja presencia (120 ind./g). Desde los 90 a los 73 cm la abundancia aumenta hasta los 316 ind./g. Sobre los 73 cm y hasta los 43 cm, la presencia se reduce considerablemente, llegando incluso hasta hasta los 14 ind./g. Entre los 43 y hasta los 6 cm, la abundancia vuelve a aumentar drásticamente, llegando incluso a los 460 ind./g. Sobre los 6 cm, esta especie disminuye su abundancia, llegando a los 50 ind./g promedio. *Globobulimina pacifica* se encuentra desde los 45 cm al techo con una abundancia de 20 ind./g aproximadamente, teniendo una ausencia total entre los 94 a 45 cm (Figura 3.21c). Alcanza un peak de 90 ind./g a los 31 cm. El género *Globobulimina* se ha descrito como un género infaunal profundo, de vida libre, con facultades anaeróbicas, tolerante a la disoxia, detritívoro, de aguas templadas frías, que habita en limos desde la plataforma a la zona batial (Murray, 2006). Dado que su conchilla es extremadamente frágil, su abundancia puede variar por factores post-depositación.

3.2.5 Familia Pseudoparrellidae

La familia Pseudoparrellidae es la quinta familia más abundante al aportar un 5,45% del total de foraminíferos. Está representada solo por el género *Epistominella* y 3 especies: *E. exigua*, *E. pacífica* y *Epistominella* sp., siendo la primera la más abundante representando un 77,5% del género, mientras que *E. pacífica* representa el 22,5%. Sólo se encontró 1 individuo de *Epistominella* sp., lo que no permite su análisis de abundancia. Este género corresponde a un género de hábito epifaunal a infaunal somero, de vida libre, detritívoro y propio de aguas frías y habita desde la plataforma hasta la zona batial (Murray, 2006). *E. exigua* se ha encontrado en aguas salobres y ha sido reconocida en profundidades entre 68 a 120 m (Boltovskoy y Totah, 1985), mientras que Ferrero (2006) indica que *E. exigua* prefiere aguas frías y bien oxigenadas. Si bien la cantidad de *E. pacífica* es menor respecto a *E. exigua*, *E. pacífica* se encuentra casi en su totalidad concentrada entre los 90 a 71 cm (Figura 3.22a y 3.22b) donde alcanza los 310 ind./g, teniendo una escasa presencia esporádica hacia el techo. *E. exigua* se encuentra distribuida más uniformemente a lo largo de todo el testigo, pero aun así se identificó una mayor abundancia entre los 90 a 70 cm (Figura 3.4b).

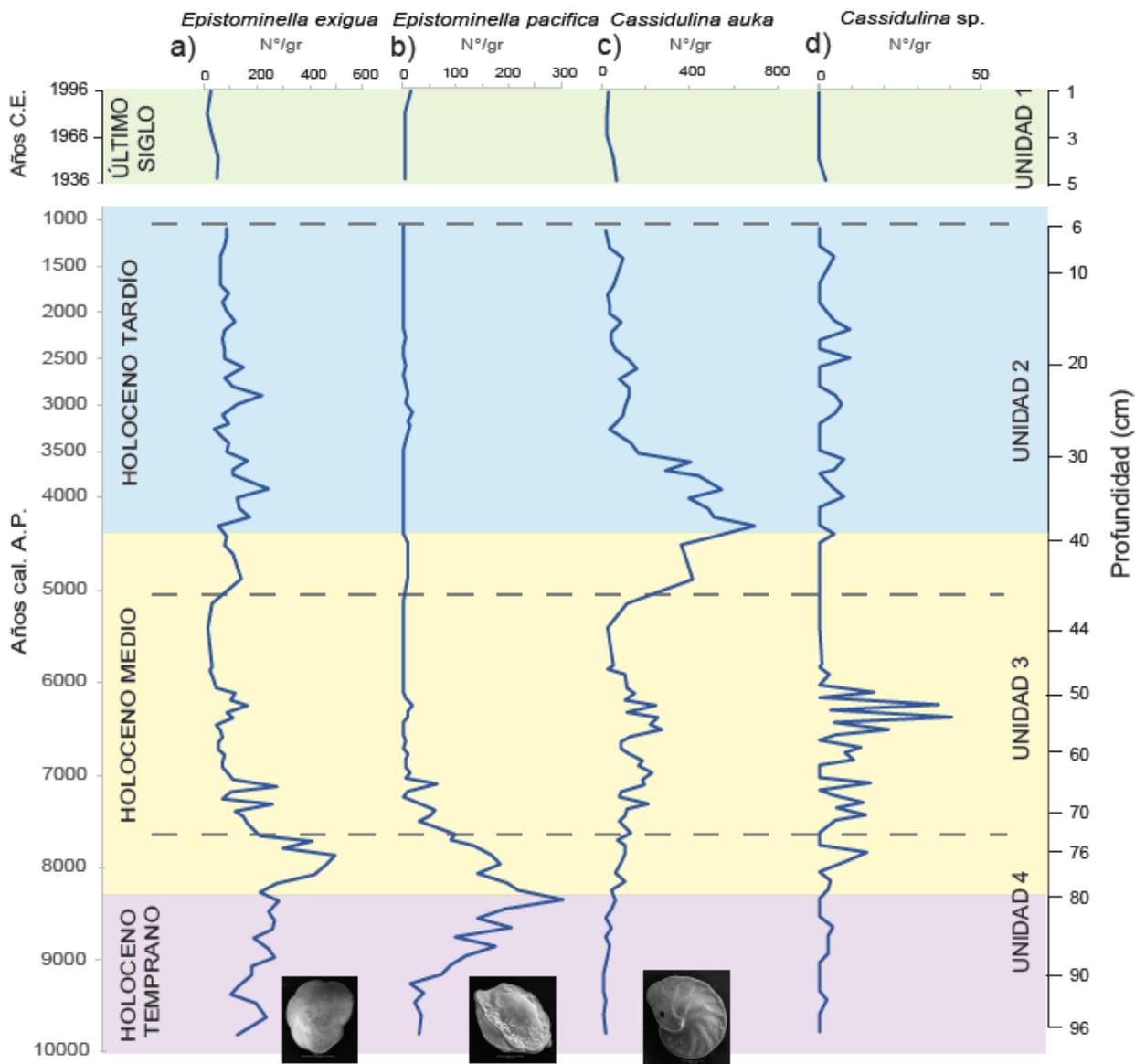


Figura 3.22 Curvas de abundancia de las familias Pseudoparrellidae y Cassidulinidae. a) Curva de *Epistominella exigua* b) Curva de *Epistominella pacifica* c) Curva de *Cassidulina auka* d) Curva de *Cassidulina* sp. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.6 Familia Cassidulinidae

La familia Cassidulinidae es la sexta familia más abundante, al componer el 4,45% del total de foraminíferos. Su único género es *Cassidulina*, que presentó 2 especies: *Cassidulina auka* y *Cassidulina* sp. Los especímenes identificados como *C. auka* son los más abundantes (96,98%), se distribuyen a lo largo de todo el testigo de sedimento. El género *Cassidulina* se ha descrito

como de hábito infaunal o epifaunal, de vida libre, que se puede encontrar en limos y arenas de la plataforma y zona batial, de aguas frías (Murray, 2006). El patrón de distribución de *C. auka* difiere notablemente del resto de las especies de otras familias (Figura 3.22c). Aparece en la base del testigo siendo casi inexistente, pero aumenta lentamente hasta alcanzar los 110 ind./g, hasta los 45 cm. Entre los 45 a 30 cm, la abundancia de *C. auka* crece abruptamente, alcanzando incluso los 717 ind./g. En los 30 cm la abundancia disminuye drásticamente hasta los 170 ind./g. Sobre los 30 cm, la presencia disminuye paulatinamente hacia el techo, donde alcanza los 13 ind./g. *Cassidulina* sp. se encuentra presente en todo el testigo, pero registra una concentración entre los 76 a 50 cm, alcanzando un peak de 41 ind./g a los 54 cm (Figura 3.22d).

3.2.7 Familia Uvigerinidae

La familia Uvigerinidae (0,52% del total de foraminíferos) está representada por 3 géneros: *Angulogerina*, *Trifarina* y *Uvigerina*. El género *Uvigerina* (99% de la familia), que está representado por las especies *Uvigerina striata* (10,15%) y *Uvigerina peregrina* (29,85%), es más bien escasa en relación al resto de las familias (0,52% del total de foraminíferos) y se encuentra distribuida en todo el testigo, mostrando una ligera tendencia entre los 93 a 73 cm (Figura 3.23a y 3.23b). Este género sería de hábito principalmente infaunal, de vida libre, detritívoros, que se encuentra en sedimentos limosos desde la plataforma a zona batial, de aguas frías (Murray, 2006). Las especies *Angulogerina angulosa* y *Trifarina earlandi*, únicos representantes de sus respectivos géneros son demasiado escasas, no superando el 1% del total de la familia, lo que impide su análisis de abundancia.

3.2.8 Familia Trichohyalidae

El género *Buccella*, único género que representa a la familia Trichohyalidae (0,4% del total de foraminíferos), está representando por la especie *Buccella peruviana*, con 3 subespecies: *B. peruviana* f. *campsi* (84,6%), *B. peruviana* f. *frígida* (1,9%) y *B. peruviana* f. *typica* (13,5%). Si bien *B. peruviana* f. *campsi* es la más abundante con un 84,6% del género, se consideró la especie *Buccella peruviana* en sentido amplio. Así, *Buccella peruviana* s.l. se encuentra presente en todo el testigo de sedimento, pero tiene una fuerte tendencia en los primeros 20 cm desde la base del testigo (Figura 3.23c). Entre los 94 a 73 cm, la abundancia es muy alta en comparación con el resto del testigo, alcanzando los 71 ind./g. Sobre los 73 cm hacia el techo, *B. peruviana* s.l. solo tiene una presencia esporádica. El género *Buccella* se reconoce como de hábito posiblemente infaunal, de vida libre, y característico de aguas frías, que puede habitar sedimentos fangosos entre los 0 y 100 m, hasta la plataforma interna (Murray, 2006).

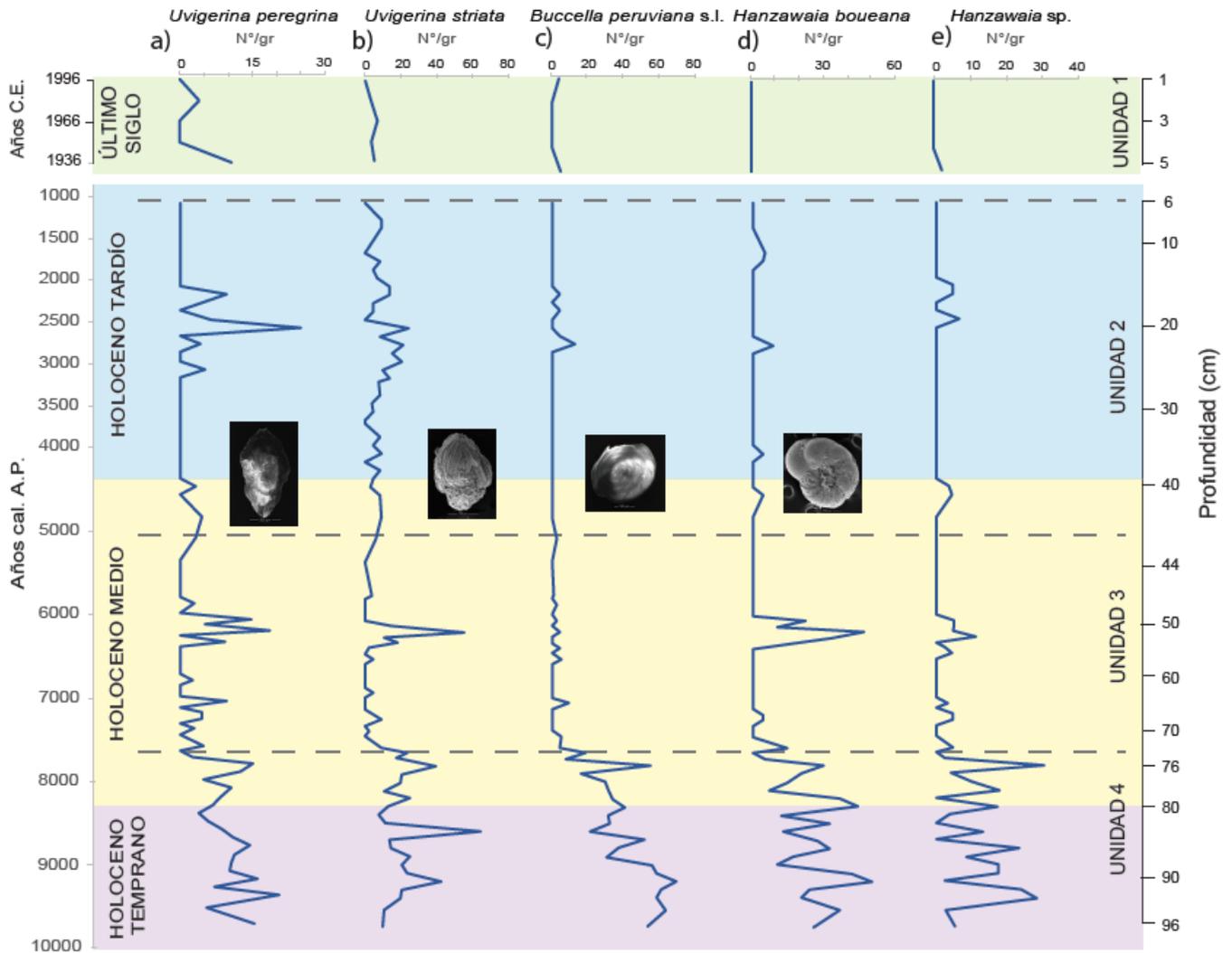


Figura 3.23 Curvas de abundancia de las familias Uvigerinidae, Trichohyalidae y Anomalinidae. a) Curva de *Uvigerina peregrina* b) Curva de *U. striata* c) Curva de *Buccella peruviana* s.l. d) Curva de *Hanzawaia boueana* e) Curva de *Hanzawaia* sp. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.9 Familia Anomalinidae

El género *Hanzawaia* (0,39% del total de foraminíferos) está representando por las especies *Hanzawaia boueana* (69,8%) y *Hanzawaia* sp. (30,2%). *H. boueana*, aunque escasa, se encuentra en todo el testigo de sedimento, pero tiene mayor presencia entre los 94 y 73 cm (Figura 3.23d). Sobre los 73 cm hacia el techo su presencia es esporádica. *Hanzawaia* sp. presentó la misma tendencia que *H. boueana* (Figura 3.23e). Este género se describe como de hábito epifaunal, adherida a sustrato duro, de aguas más bien cálidas y que se encuentra en la plataforma interna. El género *Hanzawaia* no tendría mucha tolerancia a la deficiencia de oxígeno (Van der Zwaan, 1982).

3.2.10 Familia Bulliminellidae

La familia Bulliminellidae (0,37% del total de foraminíferos) está representada solo por la especie *Bulliminella elegantissima*. El género *Bulliminella* se ha descrito como infaunal, de vida libre, detritívoro, que habita en sedimentos limosos, encontrándose tanto en la plataforma a la zona batial superior (Murray, 2006). *B. elegantissima* ha sido indicada como una especie capaz de habitar zonas con bajo contenido en oxígeno (Sen Gupta y Machain-Castillo, 1993) y que es capaz de adaptarse a ambientes en condiciones disóxicas a anóxicas (Videla, 2003; Videla *et al.*, 2002, 2003, 2004). Esta especie se encontró a lo largo de todo el testigo de sedimento, pero presentó una mayor abundancia entre los 94 a 63 cm (Figura 3.24a). Es importante destacar que los individuos de esta especie son de muy bajo tamaño, no superando los 150 μm .

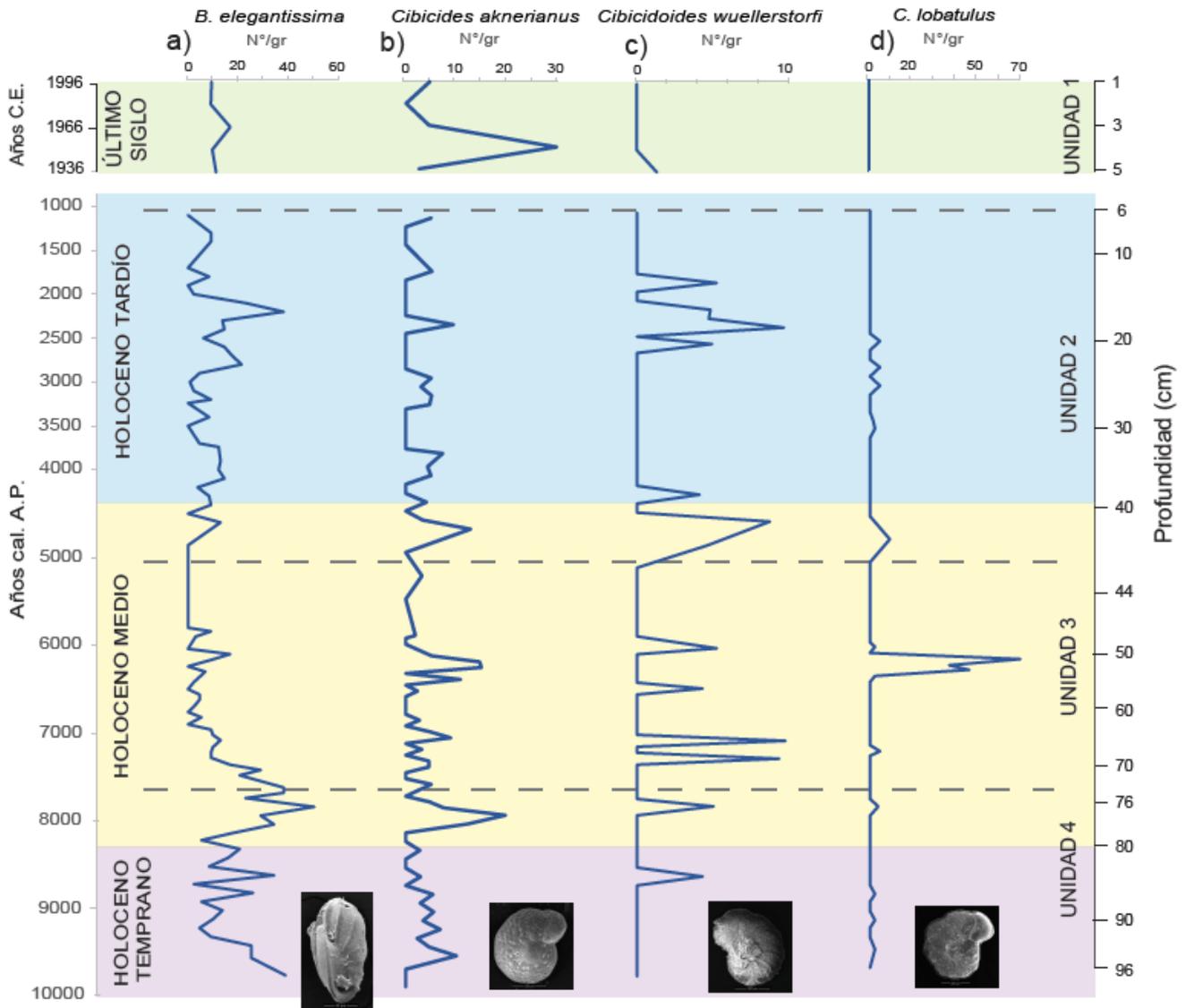


Figura 3.24 Curvas de abundancia de las familias Bulliminellidae y Cibicididae. a) Curva de *Bulliminella elegantissima* b) Curva de *Cibicides aknerianus* c) Curva de *Cibicoides wuellerstorfi* d) Curva de *C. lobatulus*. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.11 Familia Cibicididae

La familia Cibicididae (0,2% del total de foraminíferos) está representada por los géneros *Cibicides* (55,3%) y *Cibicidoides* (44,7%). El género *Cibicides* es escaso, y su única especie, *Cibicides aknerianus*, no muestra una tendencia clara, debido a que aparece esporádicamente a lo largo de todo el testigo (Figura 3.24b). Se le reconoce como un género de hábito epifaunal, que vive fijado a sustratos duros en ambientes de alta energía, de aguas cálidas y frías, y que puede habitar en un amplio rango batimétrico (0-2000 m) (Murray, 2006). Por su parte, el género *Cibicidoides* es aún más escaso que *Cibicides* y tampoco muestra una tendencia clara en ninguna de sus tres especies, *Cibicidoides wuellerstorfi* (29,6%), *Cibicidoides lobatulus* (60,3%) y *Cibicidoides variabilis* (10,1%), aunque se encontró una cantidad notablemente alta de *C. lobatulus* a los 52 cm (Figura 3.24c y 3.24d). Este género se ha descrito como de hábito infaunal a epifaunal, que vive fijo en sustratos duros, alimentación posiblemente por suspensión pasiva y de aguas frías, habitando entre la plataforma y la zona batial (Murray, 2006). Particularmente, *C. lobatulus* se ha encontrado especialmente en ambientes de alta energía (Murray, 2006).

3.2.12 Familia Textulariidae

La familia Textulariidae, única familia encontrada representante del orden Textulariida, tiene una muy baja presencia, constituyendo solo el 0,1267% del total de foraminíferos. Del único género presente, *Textularia*, se indentificó a la especie *Textularia gramen*. Este género es de hábito epifaunal, de vida libre o adherido al sustrato, prefiere el sustrato duro, es posiblemente detritívoro y habita tanto aguas frías como cálidas entre los 0 a 500 m, desde lagoons hasta la plataforma o zonal batial (Murray, 2006). Si bien es escaso, se pudo identificar una concentración entre los 93 a 77 cm, teniendo presencia muy escasa y esporádica desde los 77 cm hasta el techo (Figura 3.25a).

3.2.13 Familia Stainforthiidae

La familia Stainforthiidae es muy escasa, solo aportando un 0,045% del total de foraminíferos. La única especie representante de esta familia en el registro sedimentario es *Stainforthia fusiformis*, que ha sido descrita como una especie de hábito infaunal, con facultades anaeróbicas, capaz de soportar períodos cortos de anoxia, colonizadora de sedimentos anteriormente anóxicos, oportunista en la plataforma continental que prospera bajo condiciones de estrés donde la salinidad es alta (Alve, 1994; 2003). Se encuentra esporádicamente a lo largo del testigo, sin presentar un patrón característico (Figura 3.25b).

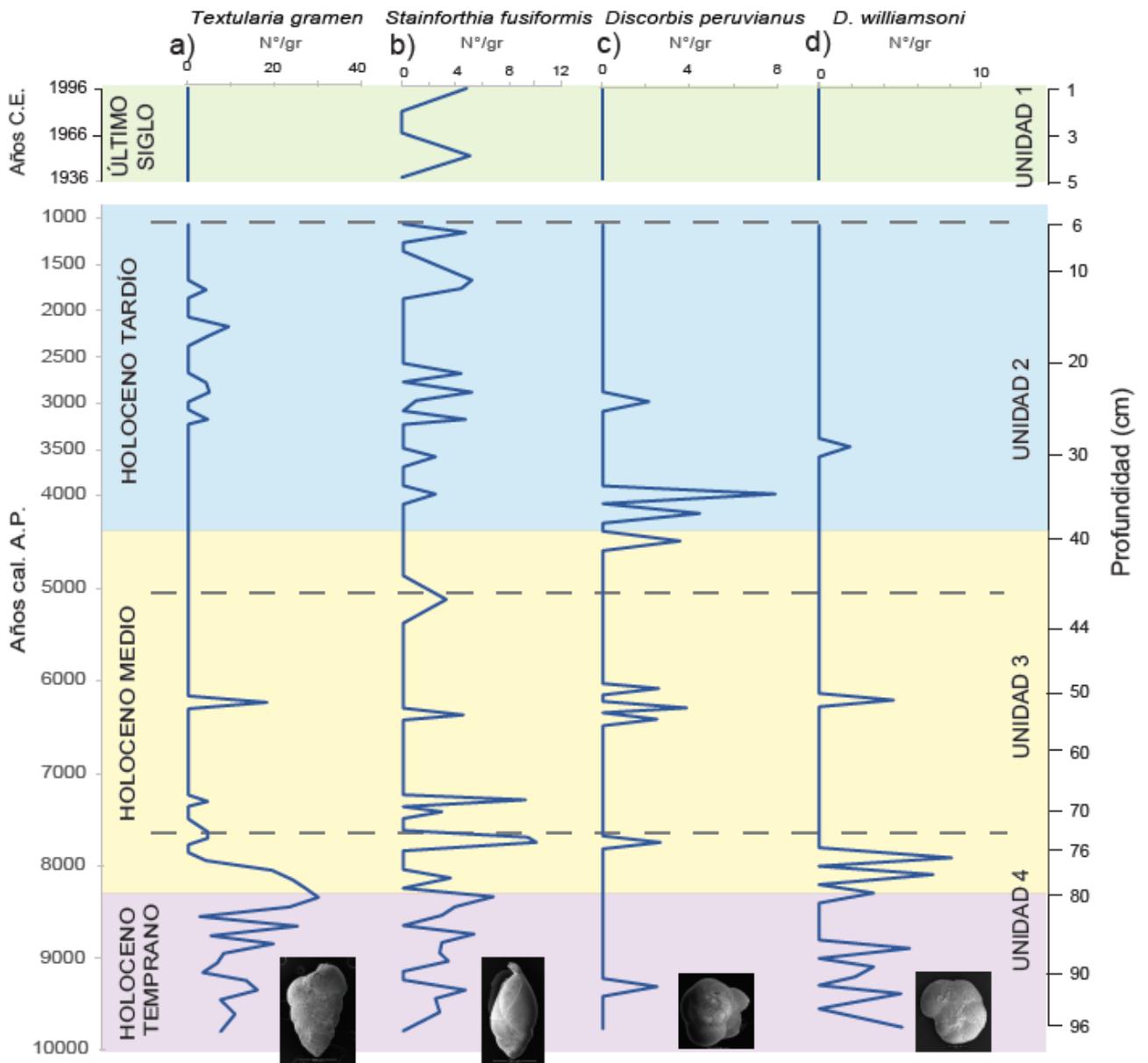


Figura 3.25 Curvas de abundancia de las familias Textulariidae (del orden Textulariida), Stainforthiidae y Discorbidae (del orden Rotaliina). a) Curva de *Textularia gramen* b) Curva de *Stainforthia fusiformis* c) Curva de *Discorbis peruvianus* d) Curva de *Discorbis williamsoni*. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.14 Familia Discorbidae

La familia Discorbidae es aún más escasa que la familia Stainforthia, aportando solo el 0,015% del total de foraminíferos. Está representado por las especies *Discorbis peruvianus* (44,4%) y *Discorbis williamsoni* (55,6%). Este género se describe como de hábito epifaunal, que vive pegado o fijo en un sustrato duro, habitualmente en arena gruesa, herbívoro, de aguas cálidas, encontrándose en la Plataforma interna, entre los 0 a 50 m (Murray, 2006). Si bien *D. peruvianus* no mostró ningún patrón, apareciendo esporádicamente a lo largo del testigo (Figura 3.25c), *D. williamsoni* si presentó una tendencia entre los 94 a 73 cm (Figura 3.25d).

3.2.15 Otras familias del orden Rotaliina

El resto de familias del orden Rotaliina son demasiado escasas, no superando el 0,01% del total de foraminíferos, y por ello no permiten el análisis de abundancia. La familia Ammoniidae solo representa el 0,007% del total de foraminíferos, mientras que la familia Bolivinitidae solo el 0,006%. Por su parte, la familia Gavelinellidae solo alcanza el 0,002%, la familia Globorotaliidae solo un 0,008% y la familia Melonidae solo el 0,004%.

3.2.16 Orden Lagenida (Familias Lagenidae y Vaginulinidae)

El orden Lagenida es también muy escaso, aportando solo el 0,0233% del total de foraminíferos. Está representado por las familias Lagenidae (50%) y Vaginulinidae (50%). De la familia Lagenidae, solo se encontró el género *Lagena*, con sus representantes *L. striata*, *L. laevis* y *Lagena* sp., siendo la más abundante la primera (66,6% del género). Las especies *L. laevis* y *Lagena* sp. solo presentaron 2 y 1 individuo, respectivamente, lo que no permite su análisis de abundancia. Este género se desarrolla más favorablemente en zonas con fondos fangosos y a cierta profundidad, aunque se halla acumulada desde las zonas litorales hasta los fondos batiales (Murray, 1973). Al ser tan escasos, los individuos de la especie *L. striata* no presentan un patrón, encontrándose aislados entre los 35 y 24 cm (Figura 3.26a). Por su parte, la familia Vaginulinidae solo tiene como representante al género *Lenticulina*, cuya única especie *L. convergens* es muy escasa y no presenta un patrón, al encontrarse tanto en la base y techo del testigo (Figura 3.26b). Según Murray (2006), este género es de hábito epifaunal, de vida libre y sedimentos fangosos, detritívoro, de aguas frías y se encuentra entre la plataforma externa a la zona batial.

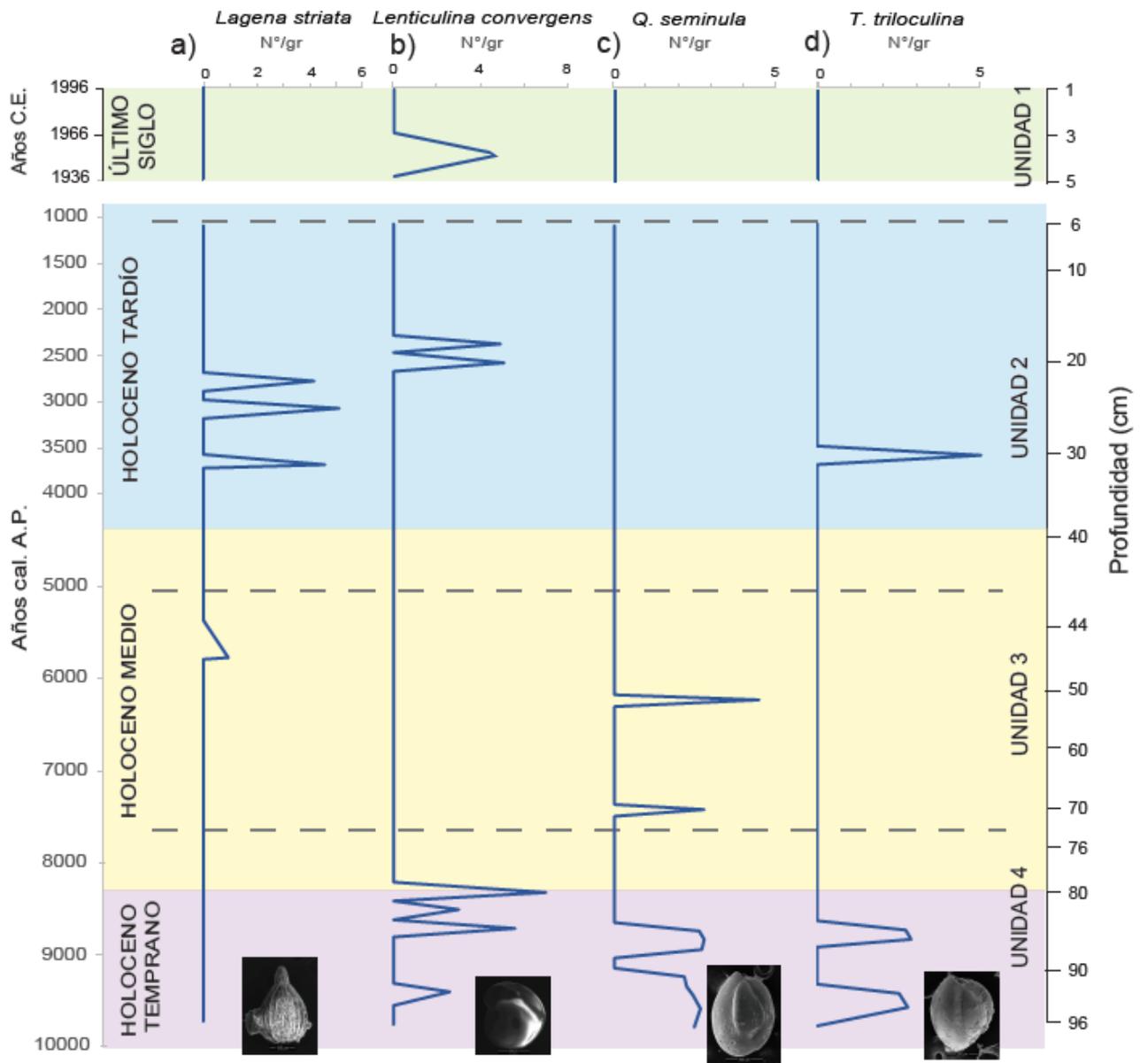


Figura 3.26 Curvas de abundancia de las familias Lagenidae y Vaginulinidae (del orden Lagenida) y Hauerinidae del orden Miliolida. a) Curva de *Lagena striata* b) Curva de *Stainforthia Lenticulina convergens* c) Curva de *Quinqueloculina seminula* d) Curva de *Triloculina trigonula*. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

3.2.17 Orden Miliolida (Familia Hauerinidae)

El orden Miliolida, también con una muy baja presencia (solo el 0,0207% del total de foraminíferos), se encuentra representado por sólo por la familia Hauerinidae con los géneros *Quinqueloculina* (62,5%) y *Triloculina* (37,5%). El género *Quinqueloculina* se ha descrito como un género de hábito epifaunal, de vida libre o adherida, herbívoro y puede habitar aguas hipersalinas y con salinidad normal, aguas frías y cálidas, desde ambientes someros como lagoons y marismas hasta la plataforma, y raramente batial (Murray, 2006). Boltovskoy (1965) y Brock (1999) han citado a este género como representativo de la plataforma interna. La única especie encontrada de este género, *Quinqueloculina seminula*, se ha descrito como una especie que habita ambientes de poca profundidad, capaz de soportar cambios muy bruscos de las condiciones ecológicas en la zona litoral, donde tienen lugar los movimientos de agua con diferente carácter y fuerza (Boltovskoy, 1965; Gómez *et al.*, 2005; Cusminsky *et al.*, 2006). Aunque su presencia en general es baja, *Q. seminula* tiene mayor presencia entre los 94 y 84 cm., sobre esto sólo tiene apariciones puntuales (Figura 3.26c). Por su parte, el género *Triloculina* es de hábito epifaunal, de vida libre o adherida, herbívoro o detritívoro, de aguas más bien cálidas, habitando ambientes marinos hipersalinos, lagoons o plataforma interna, con algunas especies batiales (de aguas frías) (Murray, 2006). *Triloculina trigonula* es aún más escasa que *Q. seminula*, por lo que no presenta un patrón destacado (Figura 3.26d).

3.2.18 Síntesis

Al analizar la fauna de foraminíferos a lo largo del testigo, fue posible identificar unidades con distinta fauna, cuyos límites están marcados por bruscos cambios en la abundancia de las especies. El primer límite está marcado por la fuerte disminución de las especies *Bolivina plicata*, *Nonionella auris*, *Cancris inflatus*, *Bulimina marginata*, *Hanzawaia boueana*, *Buccella peruviana*, *Epistominella exigua*, *E. pacífica*, *Uvigerina striata* y *Nonionoides grateloupi*, en torno a los 73 cm. El segundo límite se observó en los 44 cm, con el aumento drástico de las especies *B. plicata*, *C. inflatus*, *B. marginata*, *C. auka*, *N. auris* y *Nonionella turgida*. Finalmente, el último límite fue observado a los 6 cm, donde especies como *B. plicata*, *B. interjuncta*, *C. auka*, *C. inflatus*, *E. exigua* y *N. auris* disminuyen notablemente. Basado en estas variaciones, el registro paleoecológico se puede dividir en 4 unidades con distinta asociación de especies:

Unidad 4 (Holoceno temprano, ca. 9500 – 7600 años cal. AP): Caracterizado por *Bolivina seminuda* (37%), *Nonionella auris* (17%), *Cancris inflatus* (11%), *Bolivina plicata* (8%), *Epistominella exigua* (7,7%), *Bulimina marginata* (7%), *Epistominella pacífica* (3,9%), *Buccella peruviana* s.l. (1,4%), *Hanzawaia boueana* (0,8%), *Uvigerina striata* (0,7%), *Bolivina* sp.1 (0,6%), *Buliminella elegantissima* (0,6%), *Nonionoides grateloupi* (0,5%), *Textularia gramen* (0,4%) y *Uvigerina peregrina* (0,3%). La mayoría de estas especies tienen un rápido aumento desde la base de esta unidad hacia el techo. Las especies *E. exigua*, *E. pacífica*, *H. boueana*, *B. peruviana* s.l., *U. striata*, *U. peregrina*, *N. grateloupi* y *T. gramen* tienen su mayor abundancia en esta unidad, a tal punto que *B. peruviana* y *T. gramen* son casi exclusivas. El aumento de especies del género *Bolivina*, *Uvigerina* y *Bulimina* indicaría un **descenso en la cantidad de oxígeno**

disuelto en las aguas, hasta condiciones más bien disóxicas. La gran abundancia de especies del género *Epistominella*, *Buccella* y *Uvigerina* indicarían **temperaturas más frías** en comparación al resto del testigo, que se ve reforzada por el mayor tamaño de los ejemplares, que autores como Boltovskoy y Wright (1976) lo asocian a ambientes más fríos, llegando algunos ejemplares a medir 0,5 mm de diámetro. La mayor presencia de *Textularia gramen* y *Quinqueloculina seminula* indicarían un **ambiente cercano a la zona litoral**, donde la energía y el tamaño de los granos es mayor.

Unidad 3 (Holoceno medio, ca. 7600 – 5100 años cal. AP): Caracterizado por *Bolivina seminuda* (62,1%), *Nonionella auris* (10,7%), *Cancris inflatus* (7,6%), *Cassidulina auka* (5,7%), *Bulimina marginata* (3,6%), *Epistominella exigua* (3,6%), *Bolivina plicata* (2,4%), *Bolivina* sp.1 (0,8%), *Buliminella elegantissima* (0,3%). Todas las especies sufren un abrupto descenso en su abundancia, a tal punto que *B. plicata* desaparece en algunos sectores. La única especie que no disminuye demasiado es *B. seminuda*, la cual tiene una abundancia media hasta los 44 cm, donde presentó un abrupto descenso. La asociación de foraminíferos de aguas templadas frías con otras más cálidas, y el descenso de especies propias de aguas frías, indicaría un **aumento en la temperatura**, y el establecimiento de la fauna propia de aguas templadas frías con presencia de especies de aguas cálidas que caracteriza a la costa del norte de Chile (Boltoskoy y Wright, 1976). El dominio de especies propias de ambientes más profundos (*Bulimina*, *Bolivina*, *Buliminella*) y la desaparición de especies de ambientes de alta energía, indican un ambiente de **plataforma interna**. Finalmente, el fuerte descenso de *B. plicata* podría indicar por sí solo un aumento en la oxigenación de las aguas, sin embargo, la abundancia de *B. seminuda*, especie también indicadora de ambientes anóxicos, si bien disminuye su abundancia respecto al tramo anterior, sigue siendo dominante, sugiriendo aguas con bajo contenido en oxígeno. Además, géneros como *Hanzawaia* y *Cibicides*, que se consideran de aguas más oxigenadas (Van der Zwaan, 1982; Murray, 2006), no tienen un incremento en esta zona, manteniéndose con una baja frecuencia. Es por esto que se sugiere una **disminución aun mayor de la oxigenación de las aguas**, lo que explicaría la fuerte disminución de todas las especies, menos de *B. seminuda*, que sería la que más resistente a la disminución de la oxigenación.

Unidad 2 (Holoceno tardío, ca. 5100 – 500 años cal. AP): Caracterizado por *Bolivina seminuda* (45,6%), *Nonionella auris* (14%), *Cancris inflatus* (13,7%), *Bolivina plicata* (7,3%), *Bulimina marginata* (6,9%), *Cassidulina auka* (6,4%), *Epistominella exigua* (3%), *Bolivina* sp.1 (0,7%), *Globobulimina pacifica* (0,6%), *Nonionella turgida* (0,3%) y *Uvigerina striata* (0,3%). Es importante destacar que las primeras 6 especies antes señaladas alcanzan su mayor abundancia en esta unidad. *B. seminuda* sigue siendo la especie dominante. Los géneros *Bolivina* y *Bulimina*, dada su gran abundancia, estarían indicando un **ambiente de plataforma interna con bajos contenidos de oxígeno, pero más altos respecto a la unidad 3**. La asociación de organismos indicaría una temperatura templada fría con especies de aguas cálidas. La escasa presencia de organismos de ambientes de mayor energía como *Cibicides*, *Quinqueloculina* y *Textularia*, podrían indicar aportes de sedimento más litoral en eventos puntuales. También se destaca que las curvas de las principales especies son muy irregulares, lo que podría indicar variaciones en la cantidad de oxígeno en las aguas. Entorno a los 25 cm, casi todas las especies manifestaron una breve pero drástica disminución en su abundancia.

Unidad 1 (Último siglo): Caracterizado por *Bolivina seminuda* (79,3%), *Nonionella auris* (10,8%), *Cancris inflatus* (2,8%), *Bulimina marginata* (1,9%), *Bolivina plicata* (1,3%), *Epistominella exigua* (1,1%), *Cassidulina auka* (1%), *Bolivina sp.1* (0,7%) y *Buliminella elegantissima* (0,3%). Todas las especies, salvo *B. seminuda*, disminuyen considerablemente su abundancia, por lo que el dominio de *B. seminuda* se ve incrementado. La drástica disminución de las especies de aguas cálidas, como *N. auris* y *C. inflatus*, indica una **disminución progresiva de la temperatura**.

El patrón general puede ser representado por el reconocido en la especie *Bolivina plicata* (Figura 3.27).

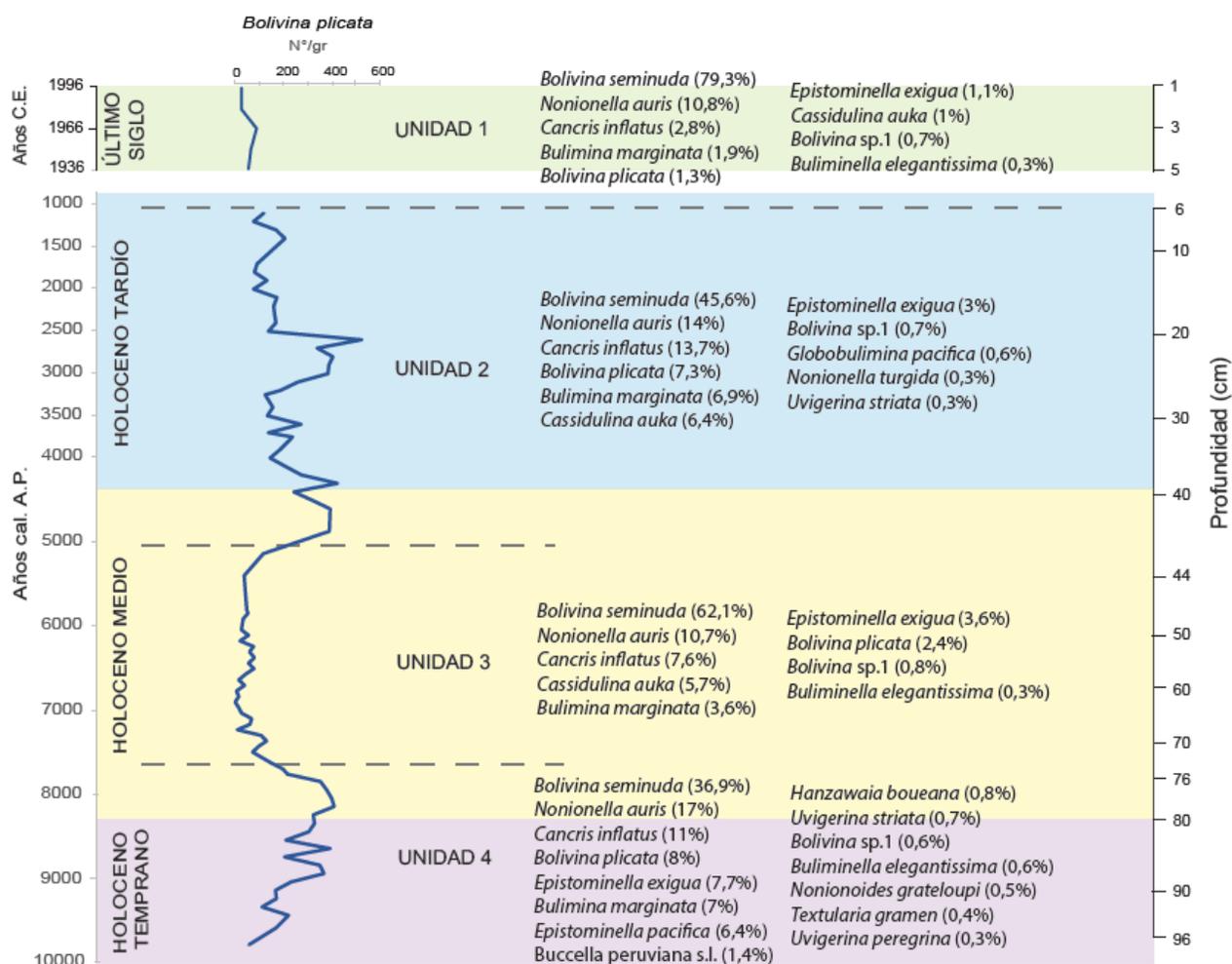


Figura 3.27. Asociación de foraminíferos para cada unidad, con especies que alcancen un porcentaje mayor a 0,3% del total de individuos para cada unidad. Se utiliza curva de *Bolivina plicata* como referencia. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

La variación de las 7 especies más abundantes se presenta en la Figura 3.28, donde se observa el fuerte predominio de *Bolivina seminuda* durante todo el Holoceno, con un fuerte aumento durante el Holoceno medio y el último siglo, lo que indica el bajo contenido de oxígeno disuelto en las aguas en general durante este período.

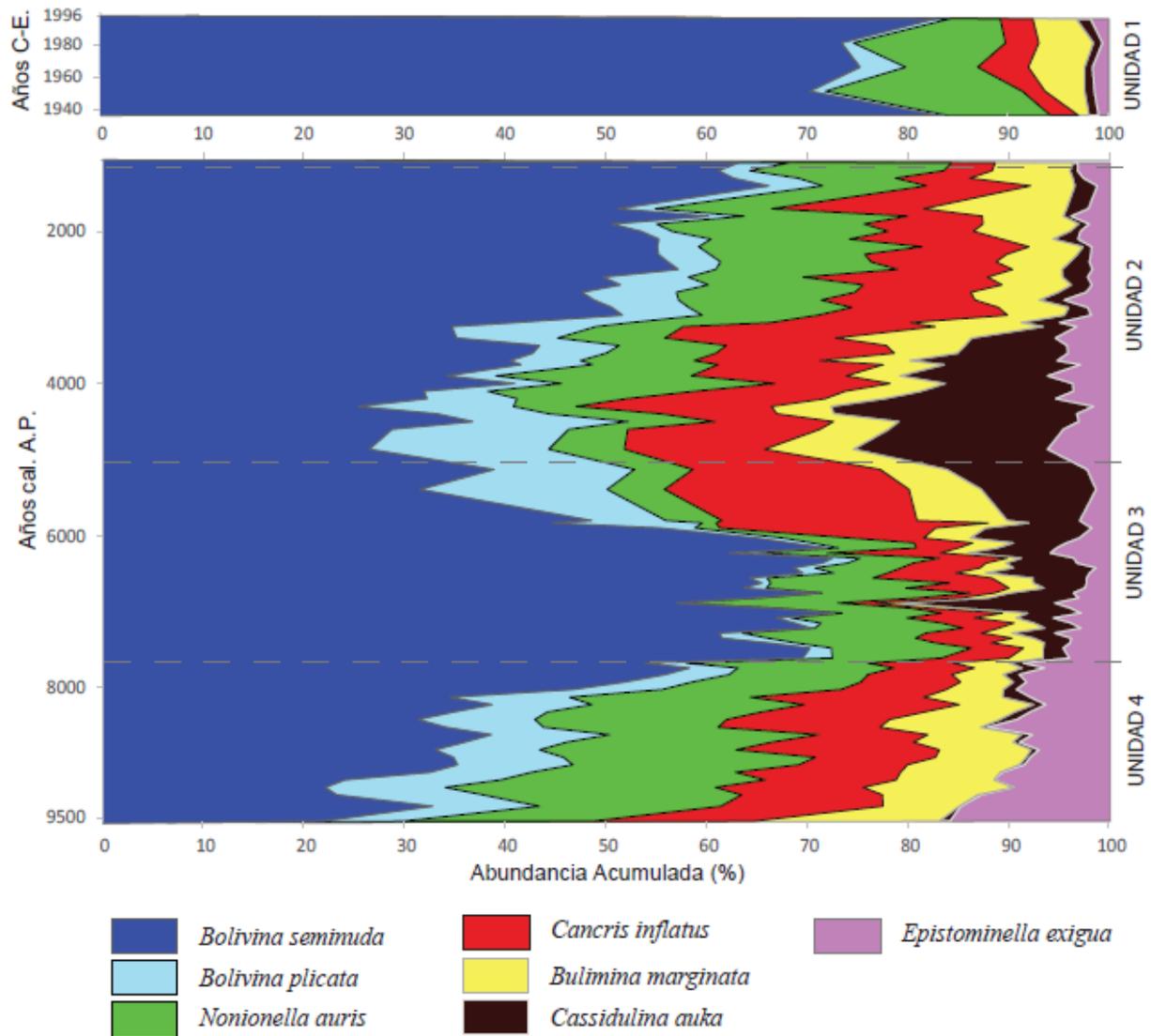


Figura 3.28 Gráfico de abundancia acumulada de las especies con abundancia total superior a 3% del total de foraminíferos. Separación de Unidades mediante líneas punteadas.

4 Discusiones

4.1 Correlación con indicadores sedimentarios de las bahías de Guanaqueros y de Tongoy

Las unidades paleoecológicas reconocidas a través de las asociaciones de foraminíferos en la sección anterior (Figura 3.27) se correlacionan con las unidades sedimentológicas holocenas definidas por Avilés (2016) en Guanaqueros y Tongoy.

La sedimentología consiste mayoritariamente en limo grueso-medio color café verdoso y en menor medida presenta arena media. La distribución granulométrica del sedimento consta de 4 modas: moda 1 (0,8-0,9 μm), moda 2 (17,6-44,2 μm), moda 3 (252-498 μm) y moda 4 (28,4-133 μm), siendo las modas 3 y 4 las más importantes (Figura 4.1).

4.1.1 Unidad 4 (Holoceno temprano, ca. 9500 – 7600 años cal. AP)

Esta unidad presenta la mayor abundancia de *T. gramen* y *Q. seminula*, especies que pueden vivir adheridas a sustratos duros y que pueden encontrarse en ambientes litorales (Murray, 2006), indicando un ambiente de mayor energía con hidrodinámica litoral o submareal. *Buccella peruviana* s.l., que se ha identificado como una especie de poca profundidad (Murray, 2006), también tiene su mayor abundancia en esta unidad. La mayor parte de las especies encontradas en esta unidad tienen un rápido aumento desde la base hasta el techo, principalmente *Bolivina seminuda*, *Bolivina plicata* y *Nonionella auris*, lo que indicaría un ambiente en general hipóxico que disminuye aún más su contenido de oxígeno hacia el techo, por lo que especies que se adaptan muy bien a los bajos contenidos en oxígeno aumentan su abundancia. Por último, la asociación de foraminíferos es una mezcla entre especies de aguas templadas cálidas con templadas frías, pero la máxima abundancia de representantes del género *Epistominella* indicaría condiciones más frías (Ferrero, 2006; Murray, 2006). Esto se vería reforzado por el gran tamaño que registran varias especies, lo que se relacionaría con temperaturas más frías en las aguas (Boltovskoy y Wright, 1976).

Desde el punto de vista sedimentológico (Avilés, 2016), la Unidad 4 presenta el mayor porcentaje de conchillas de gran tamaño (milimétricas a centimétricas), entre un 50 a 90%, tanto fragmentadas como intactas, que disminuyen su concentración y tamaño hacia el techo. Los foraminíferos tienen una presencia de entre 10 a 15%, que disminuye levemente hacia el techo. El olor fétido característico del ácido sulfhídrico presente en el sedimento (Ortega, 2014; Avilés, 2016) y la presencia de *B. plicata* indicaría condiciones de muy baja oxigenación, que se relacionarían con la alta densidad de fauna bentónica y la correspondiente alta demanda de oxígeno. El bivalvo *Carditella tegulata*, que vive adherido por su biso bajo piedras en sustratos de tipo grava en el intermareal e infralitoral (Guzman, 1998), y el gastrópodo *Turritella cingulata*, que vive en sustratos arenosos y generalmente se encuentra a poca profundidad (Guzman, 1998),

apuntan a un ambiente litoral somero, y la disminución en tamaño y concentración hacia el techo de la unidad evidencian el paso a un ambiente más profundo con una sedimentación hemipelágica. Los bivalvos *Nuculana cuneata* con sus valvas ligadas indican una depositación *in situ*, confirmando un ambiente infralitoral (submareal).

Respecto a la granulometría, la Unidad 4 es la unidad con mayor tamaño de grano. Presenta mayoritariamente arena muy fina con un tamaño de 100 μm relativamente constante disminuyendo en % de volumen al techo (moda 3, 50-80%; Figura 4.1). En menor medida, se presenta limo medio con tamaños entre 17-20 μm en la base para aumentar su tamaño de grano al techo a 43 μm (moda 4; Figura 4.1). Esta moda presenta un aumento del % de volumen al techo de 20 a 50%. En esta unidad la población arcilla está en su menor proporción con respecto a las otras unidades del testigo y es prácticamente constante (2-2,5%). La arena media fluctúa entre 300-500 μm con variaciones en su volumen aleatoriamente entre 5-10% con un *peak* de 15% a los 75 μm (Figura 4.1) que también se reconoce para la moda primaria 4. Con respecto a la mediana $d(0,5)$ tiene 88,4 μm y $\sigma=5,5$ (Avilés, 2016).

Dado lo anterior, para Avilés (2016) sugirió un ambiente depositacional infralitoral (submareal) que se profundiza, con respecto a la línea de costa, hacia el techo reflejando el transporte de partículas y el retrabajo litoral que domina cerca de la línea de la costa. Esta interpretación concuerda con el ambiente sublitoral o submareal evidenciado por la asociación de foraminíferos. Además, las condiciones de bajo contenido de oxígeno evidenciado por *Bolivina plicata* también son sustentadas por la presencia de ácido sulfhídrico y el mineral pirita.

4.1.2 Unidad 3 (Holoceno medio, ca. 7600 – 5100 años cal. AP)

Esta unidad tiene como principales representantes a las especies *Bolivina seminuda*, *Nonionella auris*, *Cancris inflatus*, *Cassidulina auka* y *Bulimina marginata*, que indican un ambiente de menor energía y mayor profundidad (Murray, 2006), como podría serlo la plataforma interna, donde los flujos de detritos desde el continente tienen que ser de gran energía para aportar sedimento en este ambiente. La escasa y esporádica presencia de especies de ambientes de mayor energía apoyan la idea de un ambiente de baja energía, en donde los flujos de alta energía que podrían arrastrar individuos desde zonas más litorales son poco frecuentes. La drástica disminución de casi todas las especies indica un fuerte cambio en los factores ecológicos, siendo solamente *B. seminuda*, especie que resiste condiciones de muy bajo contenido en oxígeno (Boltovskoy y Wright, 1976), quien mantiene el dominio. Esto indicaría un cambio en la oxigenación de las aguas, posiblemente un nuevo descenso en el contenido de oxígeno habría ocasionado la disminución en la abundancia de toda la fauna de foraminíferos, incluso las especies que resisten en los ambientes hipóxicos, como *B. plicata* y *Bulimina marginata* (Boltovskoy, 1966; Boltovskoy y Wright, 1976), solo preservándose la especie *B. seminuda* dada su adaptación a los ambientes con contenido de oxígeno extremadamente bajos (Emery y Hülsemann, 1961). La asociación encontrada en este tramo, considerando su disminución, correspondería a la fauna de aguas templadas frías con representantes de aguas cálidas característica de la subprovincia Norte de Chile (Boltovskoy y Wright, 1976).

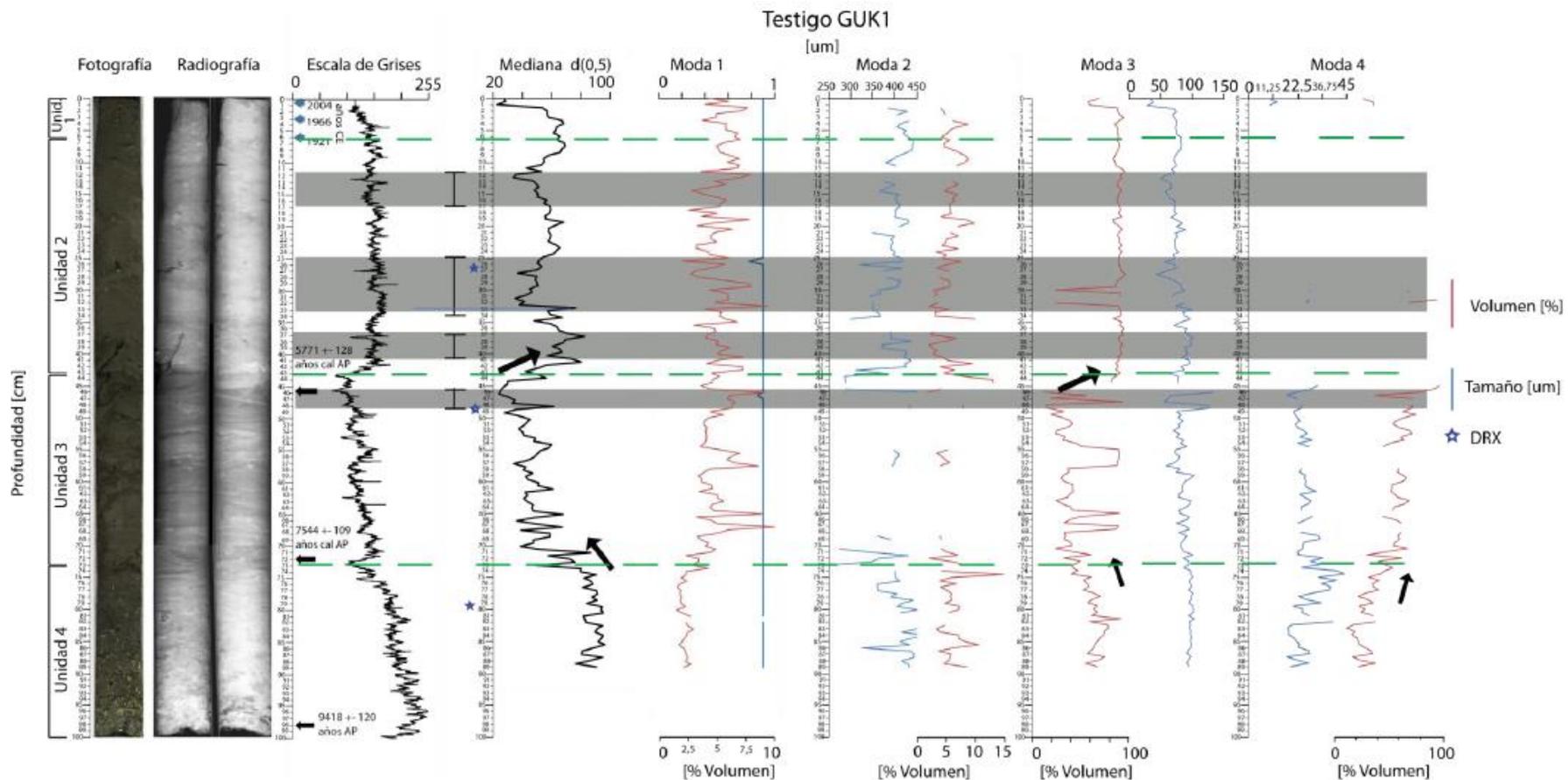


Figura 4.1 Variabilidad cada 0,5 cm del tamaño de grano (en μm) de 4 modas distintas calculadas en el testigo GUK1, donde en rojo muestra la variación del volumen de base a techo, y en azul las variaciones del tamaño de grano. Tomado de Avilés, 201

El estudio sedimentológico realizado por Avilés (2016) indica que la unidad 3 presenta el menor porcentaje de conchillas respecto a las otras unidades, con solo un 15%. Presenta bastantes laminaciones cruzadas y subparalelas a paralelas, algunas más finas (milimétricas) y otras más gruesas (centimétricas). Estas laminaciones son oscuras y otras claras, donde las primeras muestran particularmente fracciones de mayor tamaño con respecto a las laminaciones claras. En base al estudio radiográfico y el escaneo de elementos asociados a minerales refractarios a lo largo del testigo, Ortega (2014) dedujo una baja influencia de bioturbación donde las laminaciones oscuras y claras son nítidas, y no parece verse afectada por la bioturbación la cual tiende a homogenizar el sedimento. El sedimento está compuesto por fragmentos líticos subangulosos a subredondeados y materia orgánica. Posee minerales félsicos y máficos, donde los félsicos que se estiman en un 55-65%, se reparten entre 35-40% cuarzo, 20-25% feldespatos (indiferenciable feldespatos potásico/ortoclasa de albita, anortita y microclina) y en porcentaje menor. Los fragmentos oscuros, los cuales se estiman en un 5-10% se asocian a ferroactinolita, actinolita y/o riebeckita. Se identifican restos biogénicos: foraminíferos de variados tamaños (0,2-0,3 mm y 0,065 mm) con un volumen de <5%; espículas (0,1 mm y 0,06 mm) y conchillas del bivalvo *Nuculuna cuneata* milimétricas a centimétricas (Avilés, 2016).

El estudio granulométrico de Avilés (2016) muestra que la unidad 3 es la unidad con menor tamaño de grano ($d(05)$). Presenta mayoritariamente limo medio (moda 4; Figura 4.1), disminución del tamaño de grano de 30 a 15 μm y aumento del % de volumen al techo de 40 a 70% (Figura 4.1). Minoritariamente, se presenta arena muy fina como moda secundaria con tendencia a la disminución del tamaño de grano (95 a 70 μm) y el porcentaje de volumen (45 a 20%) (Moda 3; Figura 4.1). Esta fracción se hace mayoritaria a algunas profundidades (54,5-58; 65, 67-68 cm) donde la moda primaria 4 desaparece (Figura 4.1). Solo en la base de esta unidad (70,5-73, 68,5-69) y en la mitad (55,5-57 cm) aparece la fracción arena media. La fracción arcilla presenta *peaks* de volumen (10%) a las mismas profundidades que la moda 3 se hace mayoritaria (54,5-58; 65, 67-68 cm) y presenta una tendencia al aumento del % de volumen hacia el techo (3 a 5% volumen) no considerando los *peaks*. Con respecto a la mediana $d(0,5)$ tiene 48,2 μm y $\sigma=14,4$.

Dado el menor tamaño de grano y las nítidas estructuras sedimentarias, Avilés (2016) interpreta que la unidad 3 se habría depositado en un ambiente de baja energía con un patrón de sedimentación relativamente rítmico. Los sedimentos marinos laminados son encontrados más comúnmente en márgenes continentales o marinos donde existen condiciones hipóxicas a anóxicas asociadas a la alta productividad primaria donde las condiciones oceanográficas variables persisten en el fondo marino (Kemp, 1996; 2003). Así, las laminaciones oscuras y de mayor tamaño de grano son interpretadas que fueron formadas durante períodos con intensificación de vientos SW, realzando la surgencia y los procesos de productividad primaria, conduciendo flujos con más restos biogénicos y materia orgánica hacia el fondo marino, con respecto a las facies claras adyacentes, como un análogo a lo que ocurriría en la bahía de Mejillones (Vargas, 2002; Vargas *et al.*, 2004; Vargas *et al.*, 2005). Se encuentran a distintas profundidades el bivalvo *Nuculana cuneata* con sus valvas ligadas. Esta especie vive en el infralitoral, y se pueden encontrar hasta profundidades de 90 m b.n.m en la bahía de Mejillones (Zuñiga *et al.*, 1983), lo que concuerda con un ambiente más profundo respecto a la unidad 4. A tales profundidades estas conchillas no fragmentadas sugieren su formación in situ y una sedimentación de baja energía que las habría preservado, por lo que habría existido escaso arribo

de flujos de alta energía que pudiesen fragmentar la conchilla. La fracción arcilla alcanza volúmenes de hasta 10% (67, 65, 57,5, 46 cm) en profundidades a las cuales la moda primaria limo medio (67 cm) no se presenta y sugiere que predomina la suspensión a estas profundidades. La arena muy fina (moda 3) se maximiza a los 68-67, 65 y 58-55 cm lo que podría indicar eventos de escorrentía de alta energía esporádicos. La mediana d(0,5) presenta el menor tamaño de grano a lo largo del testigo, con fracciones arena media (moda 2; Figura 4.1) que se distinguen solo a algunas profundidades. Esto sugiere un ambiente distal con respecto a la línea de costa y que prácticamente no se vería afectada por el arribo de flujos de detrito recurrentemente, a excepción de aquellos de gran energía capaces de arrastrar granos de arena media a una profundidad mayor a 60 m b.n.m. Este ambiente de depositación se correlaciona con el ambiente descrito en base a la asociación de foraminíferos, que indicarían una profundización del ambiente desde uno sublitoral a uno de plataforma interna, con escaso contenido de oxígeno (anóxico) y con muy escasos aportes de flujos desde ambientes más superficiales.

4.1.3 Unidad 2 (Holoceno tardío, ca. 5100 – 500 años cal. AP)

Esta unidad presenta una asociación de foraminíferos compuesta principalmente por *B. seminuda*, *N. auris*, *C. inflatus*, *B. plicata*, *B. marginata* y *C. auka*, especies que alcanzan su mayor abundancia relativa en esta unidad y que son indicativas de un ambiente más profundo, por lo que sugieren un ambiente de plataforma interna (Boltovskoy, 1966; Boltovskoy y Wright, 1976). Aunque estas especies alcanzan su mayor abundancia, esta es más bien irregular, con fuertes subidas y bajadas en la abundancia. Por ejemplo, *B. plicata* y *B. seminuda* presentan fuertes peaks a los 20, 25 y 42 cm, mientras que a los 30 y 35 cm *B. plicata* presenta marcados valles. Esto indicaría variaciones periódicas en las condiciones ecológicas, relacionadas posiblemente a cambios de energía en el ambiente y en la oxigenación de las aguas. La presencia esporádica y escasa de organismos de ambientes de mayor energía como *Cibicides*, *Quinqueloculina* y *Textularia*, podrían indicar aportes de sedimento más superficial que se relacionaría con estos períodos de cambios ecológicos. *B. seminuda* sigue siendo la especie dominante, y juntos con *B. plicata* y *B. marginata*, indicarían un ambiente pobre en oxígeno, que en comparación con el Unidad 3, tendría un poco más de contenido en oxígeno, lo que permitiría que no solo *B. seminuda* alcance una alta abundancia. La asociación faunística indica un ambiente de aguas templadas frías con presencia de especies de aguas cálidas (Boltovskoy y Wright, 1976).

La unidad 2 descrita por Avilés (2016) presenta un 20% de conchillas y se observan espículas silíceas de 1 mm a 40-150 μm . Se observan minerales félsicos y máficos, donde los félsicos que se conforman en 60-65% del total, se reparten entre 35-40% cuarzo, 20-25% feldespato y en menor porcentaje muscovita. Los fragmentos oscuros, los cuales se estiman en un 5-10% se asocian a ferroactinolita, actinolita y/o riebeckita. Los foraminíferos son de tamaño variado (0,2-0,3 mm y 0,065 mm) y se estiman en <3%. Los fragmentos son mayormente subangulares a subredondeados, y en menor medida fragmentos angulares. Su granulometría corresponde mayoritariamente arena muy fina en su base (moda 3, 90 μm ; Figura 4.1), y tiene una tendencia de disminución del tamaño de grano al techo (limo grueso: 50 μm). El 95% de volumen está conformado por la moda 3 (Figura 4.1) y su porcentaje es prácticamente constante,

excepto a los 30 y 31,5-32 cm, donde el porcentaje tiene drásticas disminuciones hasta 28% de volumen. Solo a estas profundidades, aparece la moda 4 y se hace primaria (Avilés, 2016). La arena media es observable en toda la unidad (moda 2), con una tendencia al aumento en el % de volumen de 2,5 a 6 %, y en la base (42-38 cm) y techo (20-15 cm) presenta los mayores tamaños (400-450 μm). La fracción arcilla varía sin una tendencia clara entre los 7,5-2,5% de volumen. La mediana $d(0,5)$ entre las profundidades 41,5-33 cm presenta un aumento del tamaño de grano con respecto al menor tamaño de esta unidad (56,4 μm y $\sigma=10,3$) (Avilés, 2016).

El drástico aumento del tamaño de grano de la mediana $d(0,5)$ y el aumento en el porcentaje de volumen de la moda 3 primaria (Figura 4.1) además de la presencia de la población arena media (moda 2; Figura 4.1) que en la unidad 3 es casi nula, es interpretado por Avilés (2016) como flujos de detrito de gran energía que arrastran minerales detríticos provenientes desde el continente, principalmente desde la quebrada Lagunillas de la hoya hidrográfica hacia la bahía de Guanaqueros, asentándose en el fondo submarino. Esto se correlacionaría con lo interpretado por Ortega (2014), que mediante elementos asociados a minerales refractarios indica períodos de mayor escorrentía, concordando para los 46-48 cm y 41-37 cm (mediana $d(0,5)$; Figura 4.1). Esta profundidad también se caracteriza por la ausencia de bivalvos de la especie *Nuculana cuneata* con sus valvas ligadas (Avilés, 2016). Por tanto, se interpreta que esta unidad marca el inicio de flujos de detritos de gran energía de manera más recurrente, en un ambiente profundo de sedimentación y de mayor energía con respecto a la unidad 3. Avilés (2016) interpreta estos períodos como eventos de escorrentía, lo que sería una entrada de oxigenación al ambiente profundo dominado por las bajas concentraciones de oxígeno, y acarrearía fauna más litoral de mayor energía hacia las profundidades. La asociación faunística indicaría un ambiente de aguas templadas frías con presencia de especies de aguas cálidas (Boltovskoy y Wright, 1976). Por lo tanto, se sugiere **un ambiente de plataforma interna con baja oxigenación, pero marcado por flujos de detritos de aportarían mayor oxigenación y energía al ambiente.**

4.1.4 Unidad 1 (Último siglo)

Esta unidad muestra una fuerte disminución en la fauna de foraminíferos que indicaría un fuerte cambio en los factores ecológicos. La gran mayoría de especies disminuye considerablemente, salvo *B. seminuda*, que no disminuye de manera considerable y mantiene su dominio. La drástica disminución de las especies de aguas cálidas, como *N. auris* y *C. inflatus*, podría indicar una disminución progresiva de la temperatura, de igual forma que la aparición de *Buccella peruviana* s.l. a los 5 y 1 cm, indicarían condiciones más frías.

El estudio sedimentológico de Avilés (2016) indica que la unidad 1 no presenta mayor cambio sedimentológico respecto a la unidad 2. En su techo (0-1 cm) predomina (69-60%) tamaños entre 28-34 μm (moda 4; limo medio-grueso), y en menor medida presentan granos limo medio (9-13 μm) con un porcentaje de volumen entre 27-36% (moda 4; Figura 4.1). El resto de la unidad tiene mayores tamaños de grano siendo mayoritaria la arena muy fina (moda 3, 82-68 μm ; Figura 4.1) con un % de volumen prácticamente constante de 80%. La arena media (moda 2; Figura 4.1) tiene un mayor tamaño y % de volumen con respecto a la unidad 2 (todos los tamaños entre 400-450 μm) sin una tendencia clara de algún aumento o disminución del tamaño de grano

o porcentaje de volumen. El % de volumen de la fracción arcilla (moda 1; Figura 4.1) varía entre 5-7,5%, mayor a la unidad anterior. La mediana $d(0,5)$ muestra mayores tamaños entre los 6 y 3,5 cms ($\sim 70 \mu\text{m}$) con un $x=53,3 \mu\text{m}$ y $\sigma=16$ (Avilés, 2016).

Basado en el mayor tamaño de grano de la mediana ($63 \mu\text{m}$) respecto a la unidad 2, Avilés (2016) plantea que los flujos aluviales fueron de mayor energía. Esto podría tener relación con el fuerte cambio en las condiciones ecológicas evidenciado por la asociación de foraminíferos, ya que el aumento de los flujos de detritos hacia la superficie submarina podría aumentar la oxigenación de las aguas, pero no es concluyente al no verse reflejado en las demás condiciones ecológicas.

4.2 Implicancias océano-climáticas

La transición de un ambiente infralitoral submareal a un ambiente más profundo al ir avanzando hacia el techo de la **unidad 4 (Holoceno temprano, ca. 9500 – 7600 años cal. AP)**, indicado tanto por la sedimentología estudiada por Avilés (2016) como por la fauna de foraminíferos, estaría asociado al aumento gradual del nivel del mar durante el Pleistoceno tardío-Holoceno inferior (Catuneanu, 2002; Lambeck *et al.*, 2002), post- Último Máximo Glacial ocurrido hace 15-7 ka AP (Lambeck *et al.*, 2002). La presencia de *Textularia gramen* y *Quinqueloculina seminula*, especies que pueden vivir adheridas a sustratos duros y resistir ambientes con constantes cambios de energía como los que ocurren en la zona sublitoral (Murray, 1006), serían indicativas de un ambiente cercano a la línea de costa, al igual que *Buccella peruviana* s.l., que se ha descrito en ambientes entre 0 a 100 m de profundidad (Murray, 2006). La asociación de foraminíferos también indica un ambiente hipóxico para esta unidad, en donde proliferan las especies que se adaptan a la escasez de oxígeno, tales como *Bolivina seminuda* y *B. plicata* (Boltovskoy y Wright, 1976) El aumento de estas especies hacia el techo de la unidad indicaría una reducción aun mayor de oxígeno y una profundización del ambiente. La alta presencia de *Buccella peruviana* s.l. y *Epistominella exigua*, especies que han sido descritas como especies de aguas más frías (Murray, 2006), indican temperaturas más bajas en las aguas respecto al resto de las unidades. Esta baja temperatura de las aguas también se ha visto reflejado en los registros de temperatura superficial del océano (SST) obtenidos en testigos marinos fuera de la costa (27°- 41°S), que indican una SST fría durante el Holoceno temprano, luego condiciones más tibias de la SST durante el Holoceno medio y una tendencia decreciente de ésta durante los últimos 2.000 años (Kim *et al.*, 2002; Lamy *et al.*, 2002, 2004 y 2007; Kaiser *et al.*, 2005; Ortlieb *et al.*, 2011). Las bajas temperaturas en la bahía durante el Holoceno temprano también pueden atribuirse a una surgencia costera predominante asociada a la intensificación del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental en esta región junto con condiciones de aguas más frías de la corriente de Humboldt (Kim *et al.*, 2002; Kaiser *et al.*, 2005; Lamy *et al.*, 2002; 2004; 2007; Ortlieb *et al.*, 2011; Ortega *et al.*, 2012) ocurridas durante el Holoceno temprano (Garreaud *et al.*, 2009; Ortega *et al.*, 2012). Esto es concordante con condiciones tipo La Niña que han sido sugeridas para el Holoceno temprano (Vargas *et al.*, 2006, Ortega *et al.*, 2012). Registros paleoclimáticos de la costa semiárida (Ortega *et al.*, 2012) y Chile Central (Jenny *et al.*, 2002) evidencian condiciones de aridez y escasez de lluvias torrenciales durante el Holoceno temprano. La escasa escorrentía junto con el aumento del nivel del mar habría contribuido a la menor oxigenación de la bahía, volviéndose así un ambiente cada vez más hipóxico a anóxico en donde prolifera fauna que se adapta a zonas de mínimo oxígeno, como *B. seminuda*, *B. plicata* y *B. marginata* (Figura 4.2).

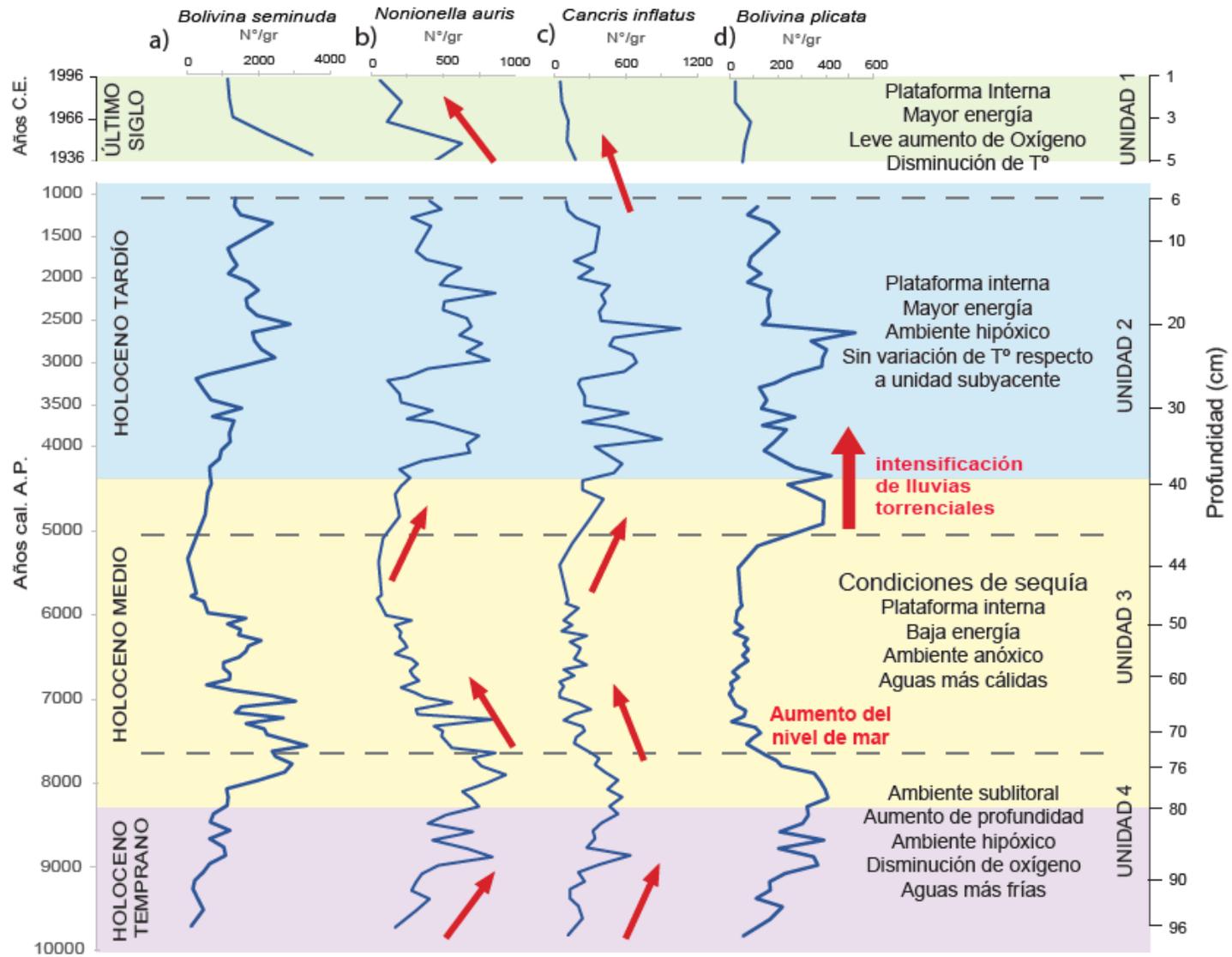


Figura 4.2 Principales cambios ecológicos durante el Holoceno reflejados en las curvas de abundancia de las 4 especies más representadas. Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

Para el Holoceno medio, la asociación de foraminíferos de la **unidad 3 (ca. 7600 – 5100 años cal. AP)** indicaría un ambiente de plataforma interna, es decir, un ambiente más profundo que el sugerido para la unidad 4, en donde los flujos de detritos provenientes del continente deben ser de gran energía para alcanzar a depositar sedimento en esta zona. Avilés (2016) sugiere una depositación de baja energía, hemipelágica, que se ve reafirmada por la fauna de foraminíferos en la que las especies descritas de mayor energía dejan de tener una presencia sostenida y solo hacen apariciones aisladas, y predominan las especies de ambientes más tranquilos afines a un ambiente de plataforma. Esto marcaría el inicio de una desaceleración del aumento del nivel de mar durante el máximo climático del Holoceno, a partir de 7-6 ka AP (Figura 4.2; Mitchum, 1977; Catuneanu, 2002; Lambeck *et al.*, 2002). Es notable la disminución de la mayoría de las especies de foraminíferos, que durante este período tienen su menor presencia, salvo *Bolivina seminuda*, especie que ha sido descrita como una de las más resistentes a la carencia de oxígeno (Boltovskoy y Wright, 1976). Esto podría deberse a un drástico cambio en la oxigenación de las aguas siendo posible una disminución de la cantidad de oxígeno, llegando a niveles más bajos que los resistidos por la mayoría de las especies. El aumento en la oxigenación se descarta dada la ausencia de especies pertenecientes a géneros afines a ambientes más óxicos, como *Cibicides* y *Hanwazaiia* (Van der Zwaan, 1982; Murray, 2006). La drástica disminución del oxígeno en el fondo sería consecuencia de la profundización del ambiente, los escasos eventos de escorrentía y probablemente de la ocurrencia de surgencias que provocaron el alzamiento de nutrientes en la bahía. El mayor contenido en nutrientes es consumido por algas, que forman una densa capa que impide que la luz solar llegue más profundo en la columna de agua. Así, al no poder hacer fotosíntesis, las algas más profundas mueren haciendo que proliferen bacterias que disminuyen el oxígeno del fondo, en un proceso de eutrofización natural a escala local. Por otro lado, el aumento de las surgencias podría provocar que masas de Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales (ESSW) que circulan a profundidades entre 300 y 700 m, como la Contracorriente del Perú (PUC) que se caracteriza por concentraciones muy bajas de oxígeno (Strub *et al.*, 1998), se acerquen a la costa provocando un descenso en la oxigenación a nivel regional. La presencia de las intercalaciones de laminaciones, según Avilés (2016), asociadas a períodos de intensificación de vientos del SW que realizarían la surgencia y la producción primaria conduciendo flujos con más restos biogénicos y materia orgánica hacia el fondo de la bahía concuerdan con ambas interpretaciones, por lo que es necesario estudios en otros puntos de la costa del norte de Chile para verificar el carácter regional o local de este fenómeno. La aparición esporádica de especies de ambientes de mayor energía, como las pertenecientes a los géneros *Quinqueloculina*, y *Cibicides*, indicarían escasos pero fuertes flujos de detritos desde el continente. Esto concordaría con estudios anteriores (Vargas *et al.*, 2006; Ortega *et al.*, 2012), que indicarían condiciones de sequía en la costa árida y semiárida de Chile durante el Holoceno medio, en donde los flujos de detritos serían escasos. Los eventos de lluvia que provocarían estos flujos estarían relacionados con la posición más al norte y/o al oeste de ASPS en relación con el Holoceno temprano y a condiciones neutras Tipo-ENSO (Ortega *et al.*, 2012; Ortega, 2014). La asociación de foraminíferos de aguas cálidas y aguas frías es similar a la que se reconoce actualmente en la subprovincia del Norte de Chile, indicando una fauna de aguas templadas frías con especies de climas cálidos (Boltovskoy y Wright, 1976), y por tanto un leve aumento en la temperatura de las aguas respecto al Holoceno temprano (Figura 4.2), lo que se ve acompañado también por el

aumento de la temperatura superficial del mar (TSM) posterior al Holoceno temprano (Kim *et al.*, 2002; Lamy *et al.*, 2002, 2004 y 2007; Kaiser *et al.*, 2005; Ortlieb *et al.*, 2011).

Para la **Unidad 2 (ca. 5100 – 500 años cal. AP)**, que representa el Holoceno tardío, se ha interpretado un ambiente de plataforma interna dada la asociación faunística y al análisis sedimentológico de Avilés (2016). Esto sugiere que el nivel del mar se habría mantenido desde el Holoceno medio, lo que concuerda con lo sugerido por Lambeck *et al.* (2002), quienes indican que el Holoceno medio se encontraría en un alto estadio global post-Último Máximo Glacial (desde los ca. 7 ka. AP). En esta unidad, la mayoría de las especies alcanzan su mayor abundancia, principalmente *B. seminuda*, *N. auris*, *C. inflatus*, *B. plicata*, *B. marginata* y *C. auka*. Esto sugiere un ambiente de escaso contenido en oxígeno, pero un poco mayor respecto al Holoceno medio, ya que permite el crecimiento de especies que son descritas como de ambientes pobres en oxígeno, como *Bolivina plicata* y *Bulimina marginata* (Boltovskoy y Wright, 1976). El fuerte dominio de *B. seminuda* confirma un ambiente más bien hipóxico. El leve aumento en la oxigenación de las aguas podría estar asociado al aumento de precipitaciones interpretado por Avilés (2016) a partir de la sedimentología del testigo marino (Figura 4.3) y por otros autores que apuntan a la ocurrencia de mayor frecuencia de intensas lluvias a lo largo de la vertiente poniente de la Cordillera de los Andes asociadas al comienzo del fenómeno El Niño como se conoce hoy en día (Rodbell *et al.*, 1999; Jenny *et al.*, 2002; Vargas *et al.*, 2006; Ortega *et al.*, 2012, 2013). La mayor frecuencia de fuertes lluvias se vería reflejado en la irregularidad de las curvas de abundancia de las especies, en las que se observa que las especies que son abundantes en este período tienen cortas pero marcadas disminuciones en su abundancia, lo que se vería explicado por el ingreso de flujos que aportan más oxígeno y energía al ambiente depositacional, donde además, la presencia esporádica de foraminíferos de ambientes de mayor energía y más superficiales, como *Cibicides*, *Textularia* y *Quiqueloculina*, indicarían flujos de detritos que los arrastrarían a ambientes más profundos. La asociación faunística indicaría un ambiente de aguas templadas frías con presencia de especies de aguas cálidas (Boltovskoy y Wright, 1976), lo que no marcaría un cambio notorio respecto a la temperatura de las aguas en comparación al Holoceno medio. Así, se sugiere un ambiente profundo de sedimentación, posiblemente de plataforma interna con poca oxigenación (Figura 4.2), y de mayor energía por el arribo de manera más frecuente de flujos de detrito con respecto al ambiente para el Holoceno medio dado el comienzo el fenómeno El Niño en la costa semiárica de Chile. El comienzo de El Niño marcaría una variación océano-climática a escala milenial.

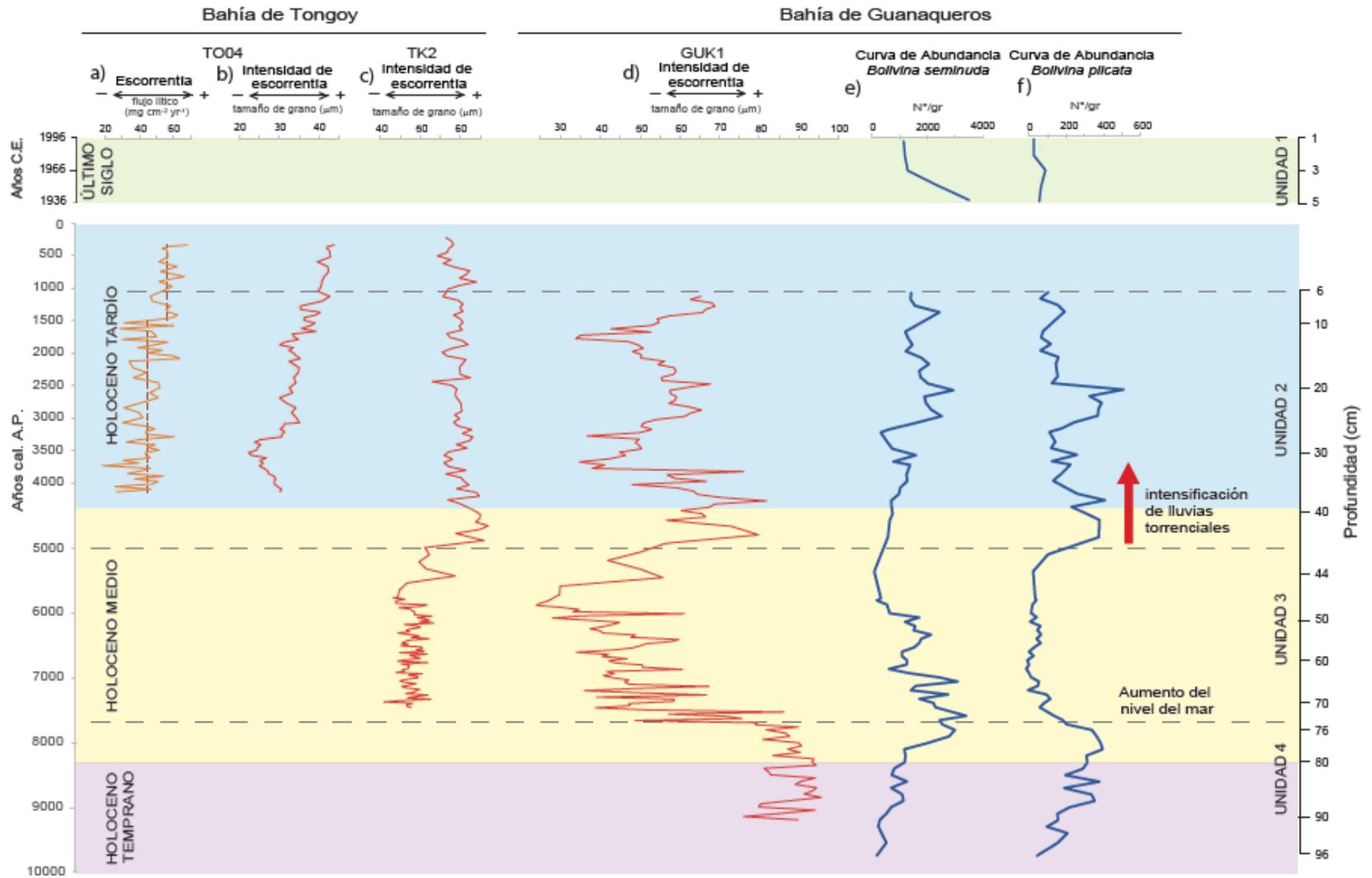


Figura 4.3 a) Escorrentía en la bahía de Tongoy (TO04). b) Intensidad de escorrentía en la bahía de Tongoy (TO04). c) Intensidad de escorrentía en la bahía de Tongoy (TK2). d) Intensidad de escorrentía en la bahía de Guanaqueros (GUK1). e) Curva de abundancia de *B. seminuda*. f) Curva de abundancia de *B. plicata*. a) y b) tomadas de Ortega *et al.* (enviado). c) y d) tomadas de Avilés (2016). Unidades delimitadas por líneas punteadas. Subdivisiones del Holoceno delimitadas por colores.

Finalmente, la **Unidad 1 (reciente)**, que representa la sedimentación del último siglo, presenta una fuerte disminución de especies en los últimos 6 cm, lo que indica un fuerte cambio en las condiciones ecológicas. La disminución de una gran cantidad de especies, entre las que se cuentan *Nonionella auris* y *Cancris inflatus*, especies reconocidas como de aguas cálidas, y la reaparición de *Buccella peruviana* s.l., especie de aguas frías, indicarían una disminución en la temperatura de las aguas. Este descenso en la temperatura se ve reflejado en la disminución de las TSM registrada en alquenonas durante el último siglo (Ortega *et al.*, enviado) y es concordante con la tendencia de enfriamiento de la costa del Norte de Chile (Falvey y Garreaud, 2009). Especies como *Bolivina plicata* y *Bulimina marginata* también registran una fuerte disminución, lo que podría indicar un leve aumento en la oxigenación de las aguas provocando la disminución de las especies afines a ambientes de baja oxigenación (Figura 4.2).

5 Conclusiones

En la costa semiárida de Chile (30 a 32° S) han ocurrido significativos cambios climáticos durante el Pleistoceno terminal – Holoceno, los cuales pueden ser reconocidos mediante el estudio de foraminíferos bentónicos contenidos en el testigo de fondo marino extraído en la Bahía de Guanaqueros (30°S). Esta zona es altamente sensible a los cambios climáticos dado su clima transicional entre el clima hiperárido del desierto de Atacama y el clima mediterráneo de la zona central de Chile y ha preservado el registro sedimentario gracias a la geomorfología de la bahía, consistente en una costa lobulada protegida de los vientos del Suroeste por la península Punta Guanaquero.

El análisis de la abundancia de los foraminíferos, excelentes bioindicadores de cambios ecológicos, permitió inferir las condiciones ecológicas y paleoambientales durante el Holoceno. En total se recolectaron 77.358 individuos, los que se agrupan en 48 especies, 28 géneros, 21 familias y 4 órdenes, siendo el Orden Rotaliida el más abundante (99,8%). Las especies más representadas son *Bolivina seminuda* (50,45%), *Nonionella auris* (13,79%), *Cancris inflatus* (10,67%), *Bolivina plicata* (5,84%), *Bulimina marginata* (5,7%), *Cassidulina auka* (4,31%), *Epistominella exigua* (4,22%), *Epistominella pacifica* (1,22%), *Bolivina* sp.1 (0,67%), *Buccella peruviana* s.l. (0,4%), *Buliminella elegantissima* (0,37%) y *Uvigerina striata* (0,36%).

Durante el Holoceno temprano, ocurrió la transición de un ambiente sublitoral a uno de plataforma interna, marcado por la presencia de *Quinqueloculina seminula* y *Textularia gramen*, especies pertenecientes a géneros de ambientes de mayor energía. La profundización del ambiente estuvo acompañada por un ambiente de poca oxigenación, que se vuelve más hipóxico al llegar al Holoceno medio, lo que se observa por el aumento en la abundancia de especies indicadoras de ambientes de baja oxigenación como *Bolivina seminuda*, *B. plicata* y *Bulimina marginata*. La mayor presencia de las especies *Buccella peruviana* s.l. y *Epistominella exigua* indicarían condiciones más frías. La profundización del ambiente estaría relacionado al aumento del nivel del mar post-Último Máximo Glacial. La baja temperatura en la bahía durante el Holoceno temprano pudo ser consecuencia de una surgencia costera intensa asociada a una mayor influencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental en esta región junto con condiciones de aguas más frías de la corriente de Humboldt durante el Holoceno temprano.

Para el Holoceno medio, el ambiente se habría establecido como un ambiente de plataforma interna, y condiciones de hipoxia/anoxia. El dominio de *B. seminuda* y la escasez de la mayoría de las especies, indicarían una disminución aun mayor del oxígeno respecto al Holoceno temprano. La sedimentación hemipelágica rítmica con múltiples laminaciones acompañada de una baja aparición de especies de ambientes menos profundos indican aportes de detritos esporádicos, así como variaciones en la surgencia y productividad primaria asociada. La asociación faunística indica un aumento en la temperatura con respecto al Holoceno temprano, estableciéndose la asociación de foraminíferos propia de aguas templadas frías con presencia de especies de climas cálidos. Estas condiciones de temperatura y oxigenación dentro de la bahía, asociada a surgencia costera y productividad primaria variables, junto con la presencia de flujos detríticos esporádicos sugieren condiciones neutras tipo-ENSO junto con una menor influencia del Anticiclón subtropical respecto del Holoceno temprano.

En el Holoceno tardío, la mayoría de las especies alcanzan su mayor abundancia. Especies como *Bolivina seminuda*, *B. plicata* y *Bulimina marginata* indicarían condiciones bajas en oxígeno (hipóxicas), pero ligeramente mayor respecto al Holoceno medio. La asociación de foraminíferos indica un ambiente de plataforma interna al igual que en el Holoceno medio, sin grandes variaciones en la temperatura. El mayor arribo de flujos detríticos, la inestabilidad de las curvas de abundancia y la aparición esporádica de especies de ambientes más someros indican un ambiente de mayor energía, provocado por la mayor frecuencia de lluvias intensas asociadas al comienzo de El Niño moderno sugerido por diversos autores (Rodbell *et al.*, 1999; Jenny *et al.*, 2002; Vargas *et al.*, 2006).

Finalmente, en el último siglo se registró una gran variación en la abundancia de las especies. Si bien permanece un ambiente de plataforma interna, la mayoría de las especies disminuyen, pero la aparición de especies de aguas frías indica un descenso en la temperatura, además de un leve aumento en la oxigenación de las aguas. Esto es concordante con la tendencia de enfriamiento de la costa del Norte de Chile durante las últimas décadas.

6 Bibliografía

- Aceituno, P., Montecinos, A., 1993. Stability analysis of the relation between the Southern Oscillation and rainfall in South America (in Spanish). *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 22, 53–61.
- Allmendinger, R.W., González, G. 2010. Invited review paper: Neogene to Quaternary tectonics of the coastal Cordillera, northern Chile. *Tectonophysics*, 495: 93–110.
- Alve, E. 1994. Opportunistic features of the foraminifer *Stainforthia fusiformis* (Williamson): evidence from Frierfjord, Norway. *Journal of Micropalaeontology*, 13: 24.
- Alve, E. 2003. A common opportunistic foraminiferal species as an indicator of rapidly changing conditions in a range of environments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 501–14.
- Araya-Vergara, J. F., 1976. Reconocimiento de tipos e individuos geomorfológicos regionales en la costa de Chile. *Información Geográfica (Chile)*, 23, 9-30.
- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., Yamagata, T. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112.
- Ashok, K., Yamagata, T. 2009. The El Niño with a difference. *Nature* 461. 481–484.
- Avilés, J., 2016. Estratigrafía y sedimentología de registros marinos de las bahías de Tongoy y Guanaqueros (~30°S), y sus implicancias paleohidrológicas. Memoria para optar al título de geólogo, Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Bandy, O. L., & Arnal, R. E. 1960. Concepts of foraminiferal paleoecology: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 44.
- Benado, D., 2000. Estructuras y estratigrafía básica de terrazas marinas en sector costero de Altos de Talinay y Bahía Tongoy: Implicancia Geotectónica. *Memoria de título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*.
- Bjerknes, J., 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163-172.
- Boltovskoy, E., 1965. Los foraminiferos recientes: biología, métodos de estudio, aplicación oceanografía. Eudeba.
- Boltovskoy, E. 1966. Methods for sorting of foraminifera from plankton samples. *Journal of Paleontology*, 1244-1246.
- Boltovskoy, E.; Theyer, F. 1970. Tít. Analit.: Foraminíferos recientes de Chile central. Serie: Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", Hidrobiología. 2(9). 6 láminas. 279-380. P.imprenta: Instituto Nacional de Investigación de las Ciencias Naturales, Buenos Aires. AR. 1970. 279-380.

- Boltovskoy, E., 1976. Distribution of recent foraminifera of the South American region. *Foraminifera*, 2, 171-236.
- Boltovskoy, E. y Wright, R. C. (Eds.). 1976. *Recent foraminifera*. Springer Science & Business Media.
- Boltovskoy, E., Giussani, G., Watanabe, S., & Wright, R. C. (Eds.). 1980. *Atlas of benthic shelf foraminifera of the southwest Atlantic*. Springer Science & Business Media.
- Boltovskoy, E. y Totah, V. 1985. Diversity, Similarity and Dominance in benthic foraminiferal fauna along one transect of the argentine shelf. *Revue de Micropaléontologi* 28: 23-31.
- Boltovskoy, E., Scott, D. B., & Medioli, F. S., 1991. Morphological variations of benthic foraminiferal tests in response to changes in ecological parameters: a review. *Journal of Paleontology*, 65(2), 175-185.
- Brock, G. 1999. Application of Foraminiferida in earth sciences. *GEOS* 39: 1-6.
- Cahill, T., & Isacks, B. L. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B12), 17503-17529.
- Cane, M. A. 2005. The evolution of El Niño, past and future. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3-4), 227-240.
- Carré, M., Azzoug, M., Bentaleb, I., Chase, B.M., Fontugne, M., Jackson, D., Ledru, M., Maldonado, A., Sachs, J.P., Schauer, A.J. 2011. Mid-Holocene mean climate in the south eastern Pacific and its influence on South America. *Quaternary International* 253, 55–66.
- Catuneanu, O. 2002. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls. *Journal of African Earth Sciences*, 35(1), 1-43.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. In *The Geology of Chile*.
- Chen, W. Y. 1982. Assessment of Southern Oscillation sea-level pressure indices. *Monthly Weather Review*, 110(7), 800-807.
- Coloma, C., Marchant, M., & Hebbeln, D. 2005. Foraminíferos planctónicos durante El Niño 1997-98 del área de Coquimbo (30 S; 73 W), Chile. *Gayana (Concepción)*, 69(1), 48-77.
- Cusminsky, G., Martínez, D. y Bernasconi, E. 2006. Foraminíferos y ostrácodos de sedimentos recientes del estuario de Bahía Blanca, Argentina. *Revista Española de Micropaleontología*, 38: 395-410.
- Curtis, S., & Adler, R. F., 2003. Evolution of El Niño-precipitation relationships from satellites and gauges. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D4).
- Delouis, B., Philip, H., Dorbath, L., Cisternas, A., 1998. Recent crustal deformation in the Antofagasta region (northern Chile) and the subduction process. *Geophysical Journal International* 132, 302–338.

- Donders, T. H., Wagner-Cremer, F., & Visscher, H., 2008. Integration of proxy data and model scenarios for the mid-Holocene onset of modern ENSO variability. *Quaternary Science Reviews*, 27(5-6), 571-579.
- Emery, K. O., & Hülsemann, J., 1961. The relationships of sediments, life and water in a marine basin. *Deep Sea Research* (1953), 8(3-4), 165-IN2.
- Emparán, C., Pineda, G., 2006. Geología del Area Andacollo-Puerto Aldea, Región de Coquimbo. Escala 1:100.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica 96, 85p. Santiago.
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
- Ferrero, L. 2006. Micropaleontología y Paleoecología del Cuaternario del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, 373 pp.
- Figueroa, S., Marchant, M., Giglio, S., & Ramírez, M., 2005. Foraminíferos bentónicos rotalínidos del centro sur de Chile (36 S-44 S). *Gayana (Concepción)*, 69(2), 329-363.
- Figueroa, S., Marchant, S. M., Giglio, S., & Ramírez, M., 2006. Foraminíferos bentónicos del talud continental desde Concepción a las Islas Guaitecas (36°-44° S), Chile (FORAMINIFERA: Lagenina, Miliolina Y Robertinina). *Gayana (Concepción)*, 70(2), 255-279.
- Figueroa, D., Moffat, C., 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean Coast. *Geophysical Research Letters* 27: doi: 10.1029/1999GL011302. issn: 0094-8276.
- Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Alfaro, S., Caquineau, S., & Valdés, J., 2014. Assessing the Origin and Variability of Eolian Lithic Material For High-Resolution Paleooceanographic Reconstructions Off Northern Chile (23° S). *Journal of Sedimentary Research*, 84(10), 897-909.
- Folland, C. K., Renwick, J. A., Salinger, M. J., Mullan, A. B., 2002. Relative influences of the Interdecadal Pacific Oscillation and ENSO on the South Pacific Convergence Zone. *Geophysical Research Letters* 29, (13).
- Fuenzalida, H., 1982. Un país de clima extremo. Chile: Esencia y Evolución, H. García, Ed., *Instituto de Estudios Regionales de la Universidad de Chile*, 27-35.
- Gajardo, N., & Marchant, M. 2012. Variaciones estacionales de los foraminíferos planctónicos durante 2005-2006 frente a Iquique (20° S) y Concepción (36° S), Chile. *Latin American journal of aquatic research*, 40(2), 376-388.
- Gajardo, N., González, H. E., & Marchant, M. 2013a. Characterization of El Niño, La Niña, and normal conditions through planktonic foraminifera (2006–2007) in the southeastern Pacific. *Ciencias Marinas*, 39(3).

- Gajardo, N., Marchant, M., & Hebbeln, D. 2013b. Variación temporal de los afloramientos costeros frente a Chile Central (36° S; 74° W), mediante los isótopos estables de oxígeno de foraminíferos planctónicos, durante El Niño 2006. *Gayana (Concepción)*, 77(1), 10-20.
- Garreaud, R., & Aceituno, P., 2001. Interannual rainfall variability over the South American Altiplano. *Journal of Climate*, 14(12), 2779-2789.
- Garreaud, R., & Rutllant, J. 1996. Análisis meteorológico de los aluviones de Antofagasta y Santiago de Chile en el periodo 1991-1993. *Atmósfera*, 9(4), 251-271.
- Garreaud, R.D., Battisti, D.S. 1999. Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation, *Journal of Climate* 12, 2113–2123.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J., 2009. Present-day south American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195.
- Gómez, E., Martínez, D., Borel, M., Guerstein, G.R. y Cusminsky, G.C. 2005. Submarine evidences of Holocene sea-level fluctuations in the Bahía Blanca estuary, Argentina. *Journal of South America Earth Sciences* 20: 139-155.
- Grosjean, M., Núñez, L., Cartajena, I., Messerli, B., 1997. Mid-Holocene climate and culture change in the Atacama Desert, northern Chile. *Quaternary Research* 48, 239–246.
- Gutiérrez, D., Bouloubassi, I., Sifeddine, A., Purca, S., Goubanova, K., Graco, M., Field, D., Méjanelle, L., Velazco, F., Lorre, A., Salvattecchi, R., Quispe, D., Vargas, G., Dewitte, B., Ortlieb, L., 2011. Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophysical Research Letters* 38, L07603.
- Guzman, N., Saá, S., Ortlieb, L. 1998. Catálogo descriptivo de los moluscos litorales (Gastropoda y Pelecypoda) de la zona de Antofagasta, 23°S (Chile). *Estudios Oceanológicos*, 17(1).
- Hebbeln, D., Marchant, M., & Wefer, G. 2002. Paleoproductivity in the southern Peru–Chile Current through the last 33 000 yr. *Marine Geology*, 186(3-4), 487-504.
- Heusser, C.J., 1990. Ice age vegetation and climate of subtropical Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 80, 107–127.
- Holbourn, A., Henderson, A. S., & MacLeod, N. 2013. *Atlas of benthic foraminifera*. John Wiley & Sons.
- Hromic', T. 1996. Foraminíferos bentónicos (Protozoa: Foraminiferida) de aguas profundas del Estrecho de Magallanes, Chile. *Anales Instituto Patagonia Serie Ciencias Naturales*, 24: 65-86.
- Hromic', T. 1999. Foraminíferos bentónicos de canales australes: Canal Kirke, Seno Almirante Montt y Seno Ultima Esperanza, XIIª Región Magallanes y Antártica chilena. *Anales Instituto Patagonia Serie Ciencias Naturales*, 27: 91-104.

- Hromic', T. 2001a. Foraminíferos bentónicos recientes de Bahía Nassau (55°S; 66°W), Cabo de Hornos, Chile (Expedición CIMAR - FIORDO III, 1997) y su relación con la fauna de área vecinas. Congreso de Ciencias del Mar, Viña del Mar, Chile. Actas de Resúmenes. Pág. 49.
- Hromic', T. 2001b. Foraminíferos bentónicos de Canales y Fiordos Patagónicos chilenos Expedición CIMAR-FIORDOS I. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias mención Zoología, Universidad de Concepción, Chile. 234 pp.
- Hromic', T. 2001c. Foraminíferos bentónicos del Canal Baker (47°S; 74°W), Pacífico Sudoriental, Chile. *Anales Instituto Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 29: 135-156.
- Hromic', T. 2002. Foraminíferos bentónicos de Bahía Nassau, Cabo de Hornos, Chile. Comparación con Foraminíferos del Cono Sur de América, Antártica e Islas Malvinas. *Anales Instituto Patagonia, Serie Ciencias Naturales*, 30: 95 – 108.
- Hromic', T. 2009. Distribución batimétrica de foraminíferos bentónicos (Protozoa: Foraminiferida) al sur del estrecho de Magallanes (52-56 S), Chile. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 37, No. 1, pp. 23-38). Universidad de Magallanes.
- Hromic', T. 2011. Foraminíferos bentónicos recolectados durante la expedición Cimar 14 Fiordos, Patagonia Chilena. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 39, No. 1, pp. 75-89). Universidad de Magallanes.
- Hromic', T. 2012. Foraminíferos bentónicos de la expedición Cimar 11 Fiordos, canales patagónicos chilenos: biodiversidad y abundancia. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 35.
- Hromic, T., & Montiel, A. 2011. Foraminíferos Bentónicos de Seno Gallegos y Bahía Brookes (54, 5° S-69, 5° S), Chile: patrones de distribución y diversidad. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 39, No. 2, pp. 33-46). Universidad de Magallanes.
- Hromic, T., Cambolor, M., & Quezada, L. 2012. Foraminíferos Textuláridos en sedimentos someros recientes de la Península Antártica y su relación con el Área Subantártica Sudamericana. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 40, No. 1, pp. 125-138). Universidad de Magallanes.
- Ingle, J., G. Keller & R. Kolpack. 1980. Benthic foraminiferal biofacies sediments and water masses of the southern Peru-Chile trench area southeastern Pacific Ocean. *Micropaleontology*, 26 (2): 113-150.
- Jenny, B., Valero-Garcés, B. L., Villa-Martínez, R., Urrutia, R., Geyh, M., & Veit, H., 2002. Early to mid-Holocene aridity in central Chile and the southern westerlies: the Laguna Aculeo record (34 S). *Quaternary research*, 58(2), 160-170.
- Kaiser, J., Lamy, F., Hebbeln, D., 2005. A 70-kyr sea surface temperature record off southern Chile (ocean drilling program site 1233). *Paleoceanography* 20, PA4009.
- Kennett, J.P. & Srinivasan, M.S. 1983. Neogene Planktonic Foraminifera. Hutchinson Ross Publishing Co., Stroudsburg, Pennsylvania, 1-265 pp.

- Kim, J.-H., Schneider, R. R., Hebbeln, D., Müllern P. J., Wefer, G., 2002. Last deglacial sea-surface temperature evolution in the Southeast Pacific compared to climate changes on the South American continent. *Quaternary Science Reviews* 21, 2085-2097.
- Labeyrie, L; Cole, J.; Alverson, K.; Stocker, T., 2003. The History of Climate Dynamics in the Late Quaternary. Springer Berlin Heidelberg: 33-61
- Lambeck, K., & Chappell, J., 2001. Sea level change through the last glacial cycle. *Science*, 292(5517), 679-686.
- Lambeck, K., Esat, T. M., & Potter, E. K., 2002. Links between climate and sea levels for the past three million years. *Nature*, 419(6903), 199.
- Lamy, F., Hebbeln, D., Wefer, G., 1999. High-resolution marine record of climatic change in mid-latitude Chile during the last 28,000 years based on terrigenous sediment parameters. *Quaternary Research* 51, 83–93.
- Lamy, F., Rühlemann, C., Hebbeln, D., Wefer, G., 2002. High- and low-latitude climate control on the position of the southern Peru–Chile current during the Holocene. *Paleoceanography* 17 (2).
- Lamy, F., Kaiser, J., Ninnemann, U., Hebbeln, D., Arz, H., Stoner, J., 2004. Antarctic timing of surface water changes off Chile and Patagonian Ice Sheet response. *Science* 304, 1959–1962.
- Lamy, F., Kaiser, J., Arz, H.W., Hebbeln, D., Ninnemann, U., Timm, O., Timmermann, A., Toggweiler, J.R., 2007. Modulation of the bipolar seesaw in the Southeast Pacific during termination 1. *Earth and Planetary Science Letters* 259, 400–413.
- Latorre, C., Betancourt, J. L., Rylander, K. A., & Quade, J., 2002. Vegetation invasions into absolute desert: A 45; th000 yr rodent midden record from the Calama–Salar de Atacama basins, northern Chile (lat 22°–24° S). *Geological Society of America Bulletin*, 114(3), 349-366.
- Le Roux, J. P., Gómez, C. A., Olivares, D. M., & Middleton, H. 2005a. Determining the Neogene behavior of the Nazca plate by geohistory analysis. *Geology*, 33(3), 165-168.
- Le Roux, J. P., Gómez, C., Venegas, C., Fenner, J., Middleton, H., Marchant, M., Buchbinder, B., Frassinetti, D., Marquardt, C., Gregory-Wodzicki, K. M., Lavenu, A., 2005b. Neogene-Quaternary coastal and offshore sedimentation in north central Chile: Record of sea-level changes and implications for Andean tectonism. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 83-98.
- Le Roux, J.P., Olivares, D.M., Nielsen, S.N., Smith, N.D., Middleton, H., Fenner, J., Ishman, S.E., 2006. Bay sedimentation as controlled by regional crustal behaviour, local tectonics and eustatic sea-level changes: Coquimbo Formation (Miocene–Pliocene), Bay of Tongoy, central Chile. *Sedimentary Geology* 184, 133–153.

- Maldonado, A., & Villagrán, C., 2006. Climate variability over the last 9900 cal yr BP from a swamp forest pollen record along the semiarid coast of Chile. *Quaternary Research*, 66(2), 246-258.
- Maldonado, A., Méndez, C., Ugalde, P., Jackson, D., Seguel, R., Latorre, C., 2010. Early Holocene climate change and human occupation along the semiarid coast of north-central Chile. *Journal of Quaternary Science* 25, 1–4.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., Francis, R.C., 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 1069–1079.
- Mantua, N. J., & Hare, S. R., 2002. The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44.
- Marchant, M. 1997. Rezente und spätquartäre sedimentation planktischer foraminiferen im Peru-Chile strom. Tesis de Doctorado, Universität Bremen, Bremen, 115 pp.
- Marchant, M., Hebbeln, D., & Wefer, G. 1998. Seasonal flux patterns of planktic foraminifera in the Peru–Chile Current. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(7), 1161-1185.
- Marchant, M., Hebbeln, D., & Wefer, G. 1999. High resolution planktic foraminiferal record of the last 13,300 years from the upwelling area off Chile. *Marine Geology*, 161(2-4), 115-128.
- Marchant, M. & A. Guzmán. 2002. Índice bibliográfico sobre biodiversidad acuática de Chile: foraminíferos planctónicos recientes (Foraminiferida). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 25(1): 163-165.
- Marchant, M., D. Hebbeln, S. Giglio, C. Coloma & H. González. 2004. Seasonal and interannual variability in the flux of planktic foraminifers in the southern Humboldt Current System off central Chile. *Deep-Sea Res.*, 51: 2441-2455.
- Marchant, M., Zapata, J., Ruíz, V., & Moyano, H. 2004. Foraminíferos bentónicos recientes de Islas Oceánicas: Isla de Pascua e Isla Salas y Gómez, Chile. *R. Rojas, Y. Guerrero, J. González & N. Silva*.
- Marchant, M. & N. Gajardo. 2010. Foraminíferos planctónicos recientes (Foraminifera). En: S. Palma, P. Báez & G. Pequeño (eds.). *Bibliografía sobre biodiversidad acuática de Chile*. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso, 37-42.
- Mitchum, R. M.; Vail, P.R.; Sangree, J.B. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part 6: stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: *Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration* (ed. by C.E. Payton). *Memoir of the American Association of Petroleum Geologist*, Tulsa, 26: 117-134.
- Mix, A. C. & Ruddiman, W. F., 1984. Oxygen isotope analyses and Pleistocene ice volumes. *Quat. Res.* 21, 1–20.

- Mo, K. C., & Higgins, R. W., 1998. The Pacific–South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 126(6), 1581-1596.
- Mohtadi, M., & Hebbeln, D. 2004. Mechanisms and variations of the paleoproductivity off northern Chile (24 S–33 S) during the last 40,000 years. *Paleoceanography*, 19(2).
- Montecino, V., & Lange, C. B., 2009. The Humboldt Current System: Ecosystem components and processes, fisheries, and sediment studies. *Progress in Oceanography*, 83(1-4), 65-79.
- Moscoso, R., Nasi, C., Salinas, P., 1982. Hoja Vallenar y parte norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, N° 55, 100 p.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T., Anderson, D.M., 2002. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420, 162-165.
- Munoz, M., 2005. No flat Wadati–Benioff Zone in the central and southern central Andes. *Tectonophysics*, 395(1-2), 41-65.
- Murray, J. W. 1973. *Distribution and ecology of living benthic Foraminiferids* (Heineman oo.). Landon, 274 págs.
- Murray, J. W. 2006. *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge University Press.
- Náñez, C. & Malumián, N., 2007. Foraminífera. In: Camacho, H. (Ed.), Los invertebrados Fósiles. *Fundación de Historia Natural Félix de Azara*, Buenos Aires, 65-100.
- Ortega, C., Vargas, G., Rutllant, J. A., Jackson, D., & Méndez, C., 2012. Major hydrological regime change along the semiarid western coast of South America during the early Holocene. *Quaternary Research*, 78, 513-527.
- Ortega, C., Vargas, G., Rutllant, J., 2013. Major hydrological regime change along the semiarid western coast of South America during the Early Holocene – Response to comments by Maldonado and Moreiras. *Quaternary Research*, 80, 140-142.
- Ortega, C., 2014. Variabilidad climática en la costa semiárida de Chile (30-32 S) durante los últimos 13.000 años. *Santiago de Chile: Tesis para optar al Grado de Doctora en Ciencias, mención Geología, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile*.
- Ortega, C., Vargas, G., Rojas, M., Rutllant, J., Muñoz, P., Lange, C., Pantoja, S., Dezileau, L., Ortlieb, L. Extreme ENSO-driven torrential rainfalls at the southern edge of the Atacama Desert during the Late Holocene and their projection into the 21th century. Enviado a *Earth and Planetary Science Letters*.

- Ortlieb, L., Vargas, G., Saliège, J.F., 2011. Marine radiocarbon reservoir effect along the northern Chile–southern Peru coast (14–24°S) throughout the Holocene. *Quaternary Research* 75, 91–103
- Ota, Y., Miyauchi, T., Paskoff, R., Koba, M., 1995. Plio-Quaternary marine terraces and their deformation along the Altos de Talinay, north-central Chile. *Andean Geology*, 22(1), 89-102.
- Páez, M., Zúñiga, O., Valdés, J., & Ortlieb, L. 2001. Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos micróxicos de la bahía Mejillones del Sur (23° S), Chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 36(2), 129-139.
- Pardo, M., Comte, D., & Monfret, T., 2002. Seismotectonic and stress distribution in the central Chile subduction zone. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 11-22.
- Paskoff, R., 1970. *Le Chili semi-aride. Rhologiques*. Biscaye Fr. Impr., 420 p. Bordeaux.
- Paskoff, R., 1999. *Le Chili semi-aride. Rhologiques*. Biscaye Fr. Impr., 420 p. Bordeaux.
- Pfeiffer, M., Le Roux, J.P., Solleiro-Rebolledo, E., Kemnitz, H., Sedov, S., Seguel, O., 2011. Preservation of beach ridges due to pedogenic calcrete development in the Tongoy palaeobay, North-Central Chile. *Geomorphology* 132, 234-248.
- Power, S., Casey, T., Folland, C. Colman, A., Mehta, V., 1999. Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Climate Dynamic* 15, 319–324.
- Pujol, S. 1977. Contribución al conocimiento de los Foraminíferos bentónicos de Bahía Quintero (32° 46'S; 71° 31' W), Chile. Tesis para optar al título de Licenciado en Biología. Departamento de Biología Marina. Universidad de Concepción. 90 pp.
- Quintana, J.M., Aceituno, P., 2012. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30°-43°S. *Atmósfera* 25(1), 1-22.
- Rahn, D. A., Garreaud, R. D., Rutllant, J. A. 2011. The low-level atmospheric circulation near Tongoy Bay-Point Lengua de Vaca (Chilean Coast, 30 S). *Monthly Weather Review*, 139(11): 3628-3647.
- Riquelme, R., Martinod, J., Hérail, G., Darrozes, J., Charrier, R. 2003. A geomorphological approach to determining the Neogene to Recent tectonic deformation in the Coastal Cordillera of northern Chile (Atacama). *Tectonophysics*, 361(3): 255-275.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., 1991. Hoja Illapel, Región de Coquimbo. Escala 1:250.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Carta Geológica de Chile 69, 132 p. Santiago.
- Rodbell, D. T., Seltzer, G. O., Anderson, D. M., Abbott, M. B., Enfield, D. B., & Newman, J. H., 1999. An~ 15,000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science*, 283(5401), 516-520.
- Rodríguez, M.P., Carretier, S., Charrier, R., Saillard, M., Regard, V., Hérail, G., Hall, S., Farber, D., Audin, L., 2013. Geochronology of pediments and marine terraces in north-

central Chile and their implications for Quaternary uplift in the Western Andes. *Geomorphology* 180–181, 33-46.

Ruddiman, W. F., 2009. *Earth's climate: past and future*. W.H. Freeman and Company.

Rutllant, J., Fuenzalida, H., Torres, R., & Figueroa, D., 1998. Interacción océano-atmósfera-tierra en la Región de Antofagasta (Chile, 23 S): Experimento DICLIMA. *Revista Chilena de Historia Natural*, 71, 405-427.

Rutllant, J., & Fuenzalida, H., 1991. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 11(1), 63-76.

Rutllant, J., 2004. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. *In: El Niño-La Niña 1997-2000, sus efectos en Chile. Comité Oceanográfico Nacional CONA, Valparaíso, 2004, pp. 65-76.*

Saillard, M., 2008. Dynamique du soulèvement côtier Pléistocène des Andes centrales: Étude de l'évolution géomorphologique et datations (^{10}Be) de séquences de terrasses marines (Sud Pérou-Nord Chili). *Ph.D Thesis, Université de Toulouse, Toulouse, France.*

Saillard, M., Hall, S.R., Audin, L., Farber, D.L., Hérail, G., Martinod, J., Regard, V., Finkel, R.C., Bondoux, F., 2009. Non-steady long-term uplift rates and Pleistocene marine terrace development along the Andean margin of Chile (31°S) inferred from ^{10}Be dating. *Earth and Planetary Science Letters* 277, 50–63.

Saillard, M., Riotte, J., Regard, V., Violette, A., Hérail, G., Audin, L., Riquelme, R., 2012. Beach ridges U-Th dating in Tongoy bay and tectonic implications for a peninsula-bay system, Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 40, 77-84

Sandweiss, D.H., Richardson, J.B., Reitz, E.J., Rollins, H.B., Maasch, K.A., 1996. Geoarchaeological evidence from Peru for a 5000 years BP onset of El Niño. *Science* 273, 1531–1533.

Sen Gupta, B. K. S., & Machain-Castillo, M. L., 1993. Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats. *Marine Micropaleontology*, 20(3-4), 183-201.

Shackleton, N. J., 1967. Oxygen isotope analyses and Pleistocene temperatures re-assessed. *Nature* 215, 15–17.

Sifeddine, A., Gutiérrez, D., Ortlieb, L., Boucher, H., Velasco, F., Field, D., Vargas, G., Boussafir, M., Salvatelli, R., Ferreira, V., García, M., Valdés, J., Caquineau, S., Mandeng Yogo, M., Cetin, F., Solis, J., Soler, P., Baumgartner, T., 2008. Laminated sediments from the central Peruvian continental slope: a 500-year record of upwelling system productivity, terrestrial runoff and redox conditions. *Progress in Oceanography* 79, 190–197.

Smith, P. B., 1963. Quantitative and qualitative analysis of the family Bolivinidae (No. 429-A).

Strub, P. T., Mesías, J. M., Montecino, V., Rutllant, J., & Salinas, S., 1998. Coastal ocean circulation off western South America. *The global coastal ocean*, 273-313.

- Tapia, R. 2003. Variación de la intensidad de la mínima de oxígeno en los últimos 200 años estudiada mediante foraminíferos bentónicos en la plataforma continental de Chile Central (36°S). Seminario de título presentado al Departamento de Oceanografía de la Universidad de Concepción, para optar al título de Biólogo Marino mención Oceanografía y Calidad Ambiental. Concepción, Chile. 55 pp.
- Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa, entre el valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 2*, Santiago, Chile, 86 pp.
- Usera, J. y Blázquez, A. 1997. Influencia del substrato en la distribución de los foraminíferos bentónicos de la plataforma continental interna entre Valencia y Alicante (España). *Revista Española de Micropaleontología* 29: 85-104.
- Van der Zwaan, G. J. 1982. *Paleoecology of late Miocene Mediterranean foraminifera* (Doctoral dissertation, Utrecht University).
- Vargas, G., Ortlieb, L., & Rutllant, J., 2000. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista geológica de Chile*, 27(2), 157-176.
- Vargas, G., Rutllant, J., & Ortlieb, L., 2006. ENSO tropical–extratropical climate teleconnections and mechanisms for Holocene debris flows along the hyperarid coast of western South America (17–24 S). *Earth and Planetary Science Letters*, 249(3-4), 467-483.
- Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J.A., Lange, C.B., Ortlieb, L., 2007. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru–Chile Current since late 19th century, *Geophysical Research Letters*, 34, L13607, doi:10.1029/2006GL028812.
- Veit, H., 1996. Southern Westerlies during the Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in the Norte Chico, Northern Chile (27-33°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 123, 107-119.
- Vilela, C., 2003. Diagnóstico ambiental da Baía Da Guanabara e Regiões adjacentes. In: IX Congresso da Associação Brasileira de estudos do Quaternário. II Congresso do Quaternário de países de línguas ibéricas-II. Congresso sobre planejamento e gestão da zona costeira dos países de expressão portuguesa (Brasil). p. 3.
- Vilela, C., Baptista, D., Baptista-Neto, A., Crapez, M., Mcallister, J., 2004. Anais da Academia Brasileira de Ciências. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 76, 161–171.
- Vilela, C., Baptista-Neto, A., Mendonca-Filho, J., Sanjinés, A., Batista, D., Barbosa, D., 2002. Benthic foraminifer's occurrence in subenvironments on Guanabara Bay, Rio de Janeiro, southeast Brazil. *Forams: International Symposium Perth on Foraminifera Western Australia*, volume of abstracts, 7.
- Vilela, C., Sanjinés, E., Ghiselli, R., Mendonca-Filho, J., Baptista-Neto, A., Barbosa, C., 2003. Search for bioindicators of pollution in the Guanabara Bay: integrations of ecologic patterns. *Anuário do Instituto de Geociências. UFRJ* 26, 26–35.

- Villagrán, C., Varela, J., 1990. Palynological evidence for increased aridity on the central Chilean coast during the Holocene. *Quaternary Research* 34, 198-207.
- Villa-Martínez, R., Villagrán, C., Jenny, B., 2003. The last 7500 cal yr BP of westerly rainfall in central Chile inferred from a high-resolution pollen record from Laguna Aculeo (34°S). *Quaternary Research* 60, 284–293.
- Yáñez, G. A., Ranero, C. R., Huene, R., & Díaz, J., 2001. Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32–34 S): The role of the Juan Fernández Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B4), 6325-6345.
- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B. P., Jin, F.-F. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature* 461, 511–514.
- Yu, J.-Y., Giese, B. 2013. ENSO diversity observations. *U.S. CLIVAR* 11, N°2, 1–5
- Zapata, J. 1999. Foraminíferos bentónicos recientes de Bahía Cumberland (33° 41' S; 78° 50' W) Archipiélago de Juan Fernández, Chile: Aspectos zoogeográficos. *Bol. Soc. Biol. Concepción, Chile*, 70: 21-35.
- Zapata, J. A. & R. Alarcón. 1988. Foraminíferos bentónicos del Estrecho de Magallanes (52° 33' S; 69° 54' W), Chile. *Biota*, 4: 17-29. Osorno, Chile.
- Zapata, J. & A. Gutiérrez. 1995. Foraminíferos litorales recientes de Tocopilla (22° 06' S; 70°13' W), Chile. *Rev. Estud. Oceanol., Chile*, 14: 49-59.
- Zapata, J., C. Zapata & A. Gutiérrez. 1995. Foraminíferos bentónicos del sur de Chile. *Gayana Zool.* 59 (1): 23-40.
- Zapata, J. & H. Moyano. 1996. Distribución de los Foraminíferos bentónicos recolectados por el AKEBONO MARU “72”, en el sur de Chile. *Gayana Zool.* 60 (2): 89-98.
- Zapata, J. & H. Moyano. 1997. Foraminíferos bentónicos recientes de Chile austral. *Bol. Soc. Biol. Concepción, Chile*, 68: 27-37.
- Zapata, J. & J. Olivares. 2000. Biodiversidad y zoogeografía de los Foraminíferos bentónicos de Isla de Pascua (27°10'S; 109°20'W), Chile. *Bol. Soc. Biol. Concepción, Chile*, 71: 53-77.
- Zapata, J. & C. Cea. 2004. Foraminíferos Litorales Recientes del Norte de Chile (18°28' -31° 56' S) y sus relaciones zoogeográficas. *Bol. Soc. Biol. Concepción, Chile*, 75: 7-57.
- Zhang, Y., Wallace, J.M., Battisti, D.S., 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900– 93. *Journal of Climate* 10, 1004–1020.