

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

NUEVAS EVIDENCIAS PARA LA RECONSTRUCCIÓN DEL AMBIENTE
DEPOSICIONAL DE UN SITIO PALEONTOLÓGICO SUMERGIDO (GNL-
QUINTERO 1) EN LA BAHÍA DE QUINTERO, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MAGDALENA MARÍA BASSI BARROS

PROFESORA GUÍA:
VALENTINA FLORES AQUEVEQUE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RENATO SIMONETTI VICUÑA
RODRIGO FERNÁNDEZ VÁSQUEZ

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN

En el año 2005, en la bahía de Quintero, Región de Valparaíso (~32°S), se encontró un sitio paleontológico sumergido a 13 m de profundidad que contiene huesos de diversas taxas de animales de origen continental ya extintos. Este sitio, llamado GNL Quintero 1 (GNLQ1), es muy importante ya que es el único con esas características encontrado hasta el momento en toda la Costa del Pacífico sur.

El objetivo de este trabajo es poder determinar, mediante el uso de distintas metodologías, el ambiente deposicional del estrato donde se encontraron los huesos, para entender su formación y que procesos lo han afectado posteriormente, y así poder sistematizar la búsqueda de otros sitios similares en otras zonas de Chile y el mundo.

Para esto se utilizaron 3 metodologías. Primero se hizo un estudio granulométrico y estratigráfico a un testigo (T5) con el fin de determinar las unidades sedimentológicas presentes y sus posibles ambientes. Luego se caracterizó el fondo marino a través de imágenes obtenidas con un sonar de barrido lateral y finalmente se utilizó un perfilador sísmico para determinar la continuidad lateral, espesores y geometría de las unidades sedimentológicas y del sitio de interés, a través del análisis de perfiles sísmicos de varias áreas de la zona de estudio.

Gracias al estudio sedimentológico fue posible determinar el paleoambiente deposicional del estrato de interés, y también se pudo establecer una historia evolutiva de la zona de estudio. Según esto, el ambiente habría pasado por uno de tipo fluvial, que luego, debido a una transgresión marina, de a poco fue transitando a uno de tipo estuarial, y que finalmente fue totalmente inundado por el mar, dando paso a un ambiente de anteplaya (marino somero) que corresponde al paisaje actual.

Además, se pudo determinar que en la zona existen 3 unidades sísmicas que presentan una gran continuidad lateral en ambos sentidos (NW-SE y NE-SW), extendiéndose al menos entre las cotas 8-25 m de profundidad, y que pueden asociarse a las unidades estratigráficas definidas para el testigo T5. Por otro lado, a partir del estudio de las imágenes adquiridas con el sonar de barrido lateral, se logró obtener información sobre la dinámica del oleaje y las corrientes que se forman dentro de la bahía, factores que afectan directamente la preservación del sitio GNLQ1. Conocer los sectores donde la influencia de las corrientes y olas es menor puede dar indicios de posibles lugares donde el estrato de interés puede estar también presente, cubierto y protegido por sedimento marino.

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a mi familia por apoyarme y confiar en mí y mis habilidades para terminar esta carrera. Al Mati (alias Relámpago), por instarme a siempre seguir adelante y no perder la esperanza.

También quiero agradecer a mi profe guía Valentina, por su ayuda y por entregarme paz cada vez que iba a hablar con ella por dudas. A Renato por enseñarme los programas que necesité usar y por los terrenos en lancha. Gracias a Rodrigo por acompañarme a terreno y ayudarme con los perfiles sísmicos. Además, un agradecimiento especial a DZ por acompañarme a terreno también y a ARQMAR-Centro de Investigación en Arqueología Marítima del Pacífico Sur Oriental por el apoyo y préstamo de equipos e infraestructura para el desarrollo de las actividades en terreno. Y por supuesto, gracias también al Fondo de Instalación Académica FCFM (V. Flores Aqueveque) y ARQMAR por financiar este estudio.

Un gracias general a todos mis amigos que, aunque no vi mucho en este último tiempo, sé que están ahí y me apoyan infinito.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TABLA DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Planteamiento del problema	10
1.2. Objetivos.....	11
1.2.1. Objetivo General	11
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. Ubicación y vías de acceso	12
2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Ambientes y procesos costeros.....	13
2.1.1. Perfil costero	13
2.1.2. Clasificación de las costas	15
2.1.2.1. Bahías.....	16
2.1.3. Hidrodinámica costera	17
2.2. Técnicas de exploración geológica submarina	21
2.2.1. Muestreo submarino	21
2.2.2. Métodos geofísicos	22
3. MARCO GEOLÓGICO	24
3.1. Contexto geomorfológico y climático	24
3.2. Periodos de glaciación y cambios del nivel del mar	28
3.3. Geología de la zona.....	30
3.3.1. Unidades intrusivas	30
3.5. Edad del depósito	36
4. METODOLOGÍA	37
4.1. Análisis granulométrico y estratigráfico.....	37
4.2. Sonar de barrido lateral y prospección sísmica.....	38

4.2.1. Preparación previa.....	38
4.2.2. Obtención de los datos	40
4.2.3. Trabajo de los datos obtenidos	46
5. RESULTADOS	50
5.1. Estratigrafía y granulometría	50
5.2. Sonar de barrido lateral y perfilador sísmico	55
5.2.1. Transectas definitivas	55
5.2.2. Sonar de barrido lateral.....	56
5.2.3. Perfilador sísmico (SBP)	62
6. DISCUSIONES	75
6.1. Unidades estratigráficas	75
6.2. Caracterización del fondo marino.....	81
6.3. Caracterización sismoestratigráfica.....	83
6.4. Preservación del sitio GNLQ1	87
7. CONCLUSIONES.....	89
BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a. Ubicación del sitio GNLQ1-Quintero. b. Perfil de batimetría de la zona. Obtenido de López et al., 2016.....	10
Figura 2. Mapa topográfico de Chile y de la zona de estudio. Escala 1:30.000.000 y 1:100.000 respectivamente. Elaboración propia.....	12
Figura 3. Rutas desde Santiago (azul) y desde Valparaíso (verde) hasta la zona de estudio. Escala 1:1.000.000. Elaboración propia.....	13
Figura 4. Ilustración de cada una de las zonas del perfil costero. Obtenido de Ibarra y Belmonte (2017).	14
Figura 5. Terminología asociada a las olas cercanas a la costa. Los círculos muestran el movimiento orbital del agua a medida que la ola avanza. Obtenido de Waters, 1992.....	18
Figura 6. Comportamiento del agua en la zona de inundación o swash zone. Beach drift se refiere a la deriva de la playa. Obtenido de Waters, 1992.....	18
Figura 7. Corrientes costeras (longshore currents) y de resaca (rip currents) a lo largo de una costa. Las corrientes costeras fluyen paralelamente a la costa y transportan sedimentos lateralmente. Las corrientes de resaca canalizan el agua y sedimento de regreso al océano. Obtenido de Waters, 1992.	19

Figura 8. a. Draga. b. Sacatestigos de caja o box corer. c. Rastra. d. Sacatestigos tubular o gravity corer. Imágenes obtenidas del libro “Geología Marina de Chile”, Capítulo 2 (Díaz-Naveas & Frutos, 2010).	21
Figura 9. Distintos equipos utilizados para el estudio de la geología y geofísica submarina. Imagen obtenida del libro “Geología Marina de Chile”, Capítulo 2 (Díaz-Naveas & Frutos, 2010).	23
Figura 10. Algunas características geomorfológicas observadas en la zona de estudio. El punto rojo representa la ubicación del sitio GNLQ1. Imagen satelital Landsat. Escala 1:100.000. Modificado de Vargas y Ortega, 2008.....	24
Figura 11. Circulación de corrientes marinas superficiales y profundas de la bahía de Quintero. Obtenido de Escobar et al., 1971.	26
Figura 12. a. Patrón de circulación de corrientes marinas superficiales en llenante y vaciante de la bahía de Quintero, propuesto por Bakovic y Balic (1984). b. Modelo de circulación superficial de las aguas de la bahía de Quintero, propuesto por Malet y Andrade (1991).	26
Figura 13. Recorte de la carta náutica de la bahía de Quintero, escala 1:40.000. Autor: capitán de corbeta don Luis Pomar, 1876.	28
Figura 14. Perfil batimétrico de la bahía de Quintero. Obtenido de Carabias et al., 2014.....	28
Figura 15. Mapa de la bahía de Quintero que muestra el avance de la línea de costa hacia el continente a lo largo de los años desde hace 16.000 años atrás. Obtenido de López et al., 2015.	29
Figura 16. Hoja Quillota-Portillo, escala 1:250.000 (modificado de Rivano et al., 1993). El cuadro rojo corresponde a la zona de estudio, la que se muestra con mayor detalle en el recuadro negro.....	34
Figura 17. Características texturales y sedimentológicas de las unidades definidas para el testigo T1. Modificado de Vargas y Ortega (2008).	35
Figura 18. Mapa satelital (imagen Landsat) de la zona de estudio donde se muestran las isóbatas de la bahía y las transectas propuestas a recorrer durante la primera campaña de terreno, asociadas a quebradas y esteros cercanos. Las líneas blancas continuas indican las transectas escogidas y las líneas segmentadas representan las quebradas que rodean la bahía. Escala 1:100.000. Elaboración propia.	39
Figura 19. A la derecha se puede ver una imagen satelital Landsat de la zona de estudio. El cuadro rojo encierra el área más acotada abarcada durante la segunda campaña de terreno. A la izquierda se observa la grilla propuesta a recorrer con el SBP durante la segunda campaña de terreno. Escala 1:100.00 y 1:25.000 respectivamente. Elaboración propia.	40
Figura 20. a. Lancha utilizada para la toma de los datos. b. Cabina de la lancha equipada. c. Pantalla que muestra la transecta a recorrer (se utiliza para poder manejar la lancha sobre la transecta definida previamente). d. Visualización de los datos sísmicos en tiempo real (Hypack-2017). Imágenes propias.....	41
Figura 21. a. Equipo SB-424 en la lancha. b. Polea instalada en el mástil de la lancha. c. SB-424 siendo sumergido lentamente. Imágenes propias.....	42
Figura 22. Diagrama del funcionamiento de los equipos utilizados (perfilador SB-424 y sonar de barrido lateral). La fórmula utilizada para los cálculos corresponde al método clásico, marcado con un rectángulo rojo. Imagen obtenida del software Hypack-2017.	43

Figura 23. Esquema explicativo del alcance de cada subparámetro de la ganancia (TGV). Elaboración propia.	44
Figura 24. Imágenes del sonar de barrido lateral, su instalación en la lancha y siendo lentamente sumergido. Imágenes propias.	45
Figura 25. Esquema explicativo del uso del sonar de barrido lateral. La línea punteada representa las transectas recorridas previamente por el SBP. Las flechas de color celeste corresponden a las transectas recorridas por el sonar (una desde la orilla y la otra hacia la orilla), ambas distanciadas por aproximadamente 20 m. El ancho de las flechas corresponde al rango total o área barrida por el sonar, en este caso fueron 38 m por cada lado. La zona de color más oscuro representa el solapamiento de ambas áreas. Elaboración propia.	45
Figura 26. Corrección del fondo marino de las imágenes obtenidas por el sonar de barrido lateral utilizando el software Hypack. La línea azul representa el fondo marino, los puntos rojos corresponden al fondo corregido manualmente. Imágenes obtenidas del programa Hypack-2007.	47
Figura 27. Comparación de datos sísmicos sin filtro y con filtro. Se puede ver como la imagen se aclara y se obtiene más información. En el recuadro se especifican los parámetros utilizados. Imágenes obtenidas del software SeiSee.	48
Figura 28. Comparación de datos sísmicos con ruido y sin ruido. En las imágenes con zoom se puede notar que las líneas que corresponden a ruido, destacadas en amarillo, son pares de trazas idénticas. En los recuadros se especifican los parámetros utilizados en ambos casos. Imágenes obtenidas del software SeiSee. .	49
Figura 29. Imagen del testigo T5 donde se pueden distinguir 5 unidades estratigráficas. A la izquierda se muestra una tomografía del testigo, donde se notan mejor los cambios texturales. A la derecha el testigo está cortado por la mitad y abierto, y se pueden notar mejor los colores de cada unidad. Elaboración propia.	50
Figura 30. Mapeo estratigráfico de la tomografía del Testigo T5. Las líneas negras continuas indican los límites de las unidades. La línea negra punteada delimita las 2 subunidades dentro de la Unidad 1. Las figuras amarillas corresponden a algunos de los huesos encontrados en la Unidad 2 y las líneas blancas señalan algunas estructuras internas (aglomerados) de la unidad 3. Elaboración propia.	51
Figura 31. Gráfico que muestra el porcentaje de cada moda presente en cada cm del testigo T5. Elaboración propia.	52
Figura 32. Gráfico de frecuencias de cada tamaño de grano presentes en el primer tramo del testigo T5 (primeros 13 cm). La flecha indica la única moda presente. Elaboración propia.	53
Figura 33. Gráfico de frecuencias de cada tamaño de grano presentes en el segundo tramo del testigo T5 (desde el cm 14 al 18). Las flechas grises corresponden a las modas más destacables y las azules a modas presentes solo en algunos cm del testigo T5. Elaboración propia.	53
Figura 34. Gráfico de frecuencias de cada tamaño de grano presentes en el tercer tramo del testigo T5 (desde el cm 19 al 70). Las flechas indican las modas. Elaboración propia.	54
Figura 35. Las líneas blancas representan las transectas recorridas por el sonar de barrido lateral, nombradas de L1 a L7. El punto rojo representa la ubicación del sitio GNLQ1. Los puntos azules corresponden a las ubicaciones aproximadas de las imágenes de las estructuras más representativas encontradas a lo largo de cada	

transecta (las que se detallan en las Figuras 37 a 42). Imagen satelital Landsat. Escala 1:40.000. Elaboración propia.	55
Figura 36. Las líneas blancas representan las transectas recorridas por el SBP durante la segunda campaña de terreno. El punto rojo representa la ubicación del sitio GNLQ1. Imagen satelital Landsat. Escala 1:25.000. Elaboración propia.	56
Figura 37. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L1.	57
Figura 38. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L2.	58
Figura 39. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L4.	59
Figura 40. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L5.	59
Figura 41. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L6.	60
Figura 42. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L7.	61
Figura 43. Mapa de la zona de estudio que muestra la ubicación aproximada de las estructuras y características antes mencionadas. Las líneas blancas representan cada una de las transectas recorridas. (Las isóbatas corresponden a los 5, 10, 20 y 50 m de profundidad respectivamente, desde la orilla hacia lo más profundo). Imagen satelital Landsat. Escala 1:35.000. Elaboración propia.	62
Figura 44. Perfiles del fondo marino. Transectas perpendiculares a la línea de costa (A1-A4).	63
Figura 45. Perfiles del fondo marino. Transectas paralelas a la línea de costa (B1-B5). Las D indican la presencia de leves depresiones a lo largo de cada perfil.	64
Figura 46. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A1. Los recuadros rojos representan las zonas donde se ubican. Las líneas amarillas, rojas y celestes representan los reflectores 1, 2 y 3 respectivamente.	66
Figura 47. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A2. La flecha negra indica la ubicación aproximada del sitio de interés GNLQ1. Las marcas verticales negras representan la ubicación y longitud de los testigos T1 y T5. La línea punteada señala el lugar de intersección de la transecta A2 con la B3.	67
Figura 48. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A3.	68
Figura 49. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A4.	69
Figura 50. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B1.	70
Figura 51. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B2.	71
Figura 52. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B3. La línea punteada señala el lugar de intersección de la transecta B3 con la A2.	72
Figura 53. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B4.	73
Figura 54. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B5.	74
Figura 55. Unidades sedimentológicas definitivas para el testigo T1. Se define una nueva Unidad 2. Las antiguas unidades 2 y 3 pasan a llamarse 3 y 4 respectivamente (solo cambian sus nombres). Modificado de Vargas y Ortega (2008).	76
Figura 56. Unidades estratigráficas definitivas para el testigo T5 con sus respectivas subunidades. Sobre la tomografía (a la izquierda) se observa el mapeo estratigráfico antes detallado. Elaboración propia.	77
Figura 57. Correlación de testigos T1 y T5. Elaboración propia.	78
Figura 58. Mapa de las estructuras sedimentarias y afloramientos encontrados en la zona de estudio. Se agregaron flechas que indican la dirección del oleaje, según la orientación de las óndulas y ondulitas. Escala 1:35.000. Elaboración propia.	81

Figura 59. Imagen que abarca una zona mayor al área de estudio. A la izquierda se puede notar la presencia de valles y cañones submarinos. (Tierra: imagen satelital multiespectral Landsat, océano: combinación de modelo gravimétrico y medidas de sonares de fondo). Escala 1:400.000. Elaboración propia..... 84

Figura 60. Reflectores y unidades sísmicas presentes en las cercanías del sitio GNLQ1. Los rectángulos negros representan los testigos T1 y T5. Las marcas blancas en cada testigo indican los límites de las unidades estratigráficas presentes en cada uno. Elaboración propia. 85

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Durante la última década, gracias a los nuevos instrumentos de exploración que han sido desarrollados, se ha logrado el descubrimiento de sitios arqueológicos/paleontológicos sumergidos a lo largo y ancho de todo el mundo. Estos sitios, muy escasos, son de gran interés dentro de la arqueología y otras disciplinas, ya que entregan nueva información sobre posibles ambientes deposicionales, como también posibles asentamientos humanos y de animales en el pasado (Sturt et al., 2018).

En la costa central de Chile (~32°S), específicamente en la bahía de Quintero, región de Valparaíso, el año 2005, durante la construcción de un terminal marítimo para la descarga de gas natural licuado (GNL), se encontró un sitio sumergido con fósiles de megafauna extinta de origen continental. Este sitio, llamado GNL Quintero 1 (GNLQ1), se ubica actualmente a unos 13 m bajo el nivel del mar y a 650 m de la costa (Carabias et al., 2014), y contiene huesos de animales de distintas taxas, entre las cuales se distinguen Camelidae, Cervidae, Equidae, Mylodontidae y Xenarthra, entre otros (Cartajena et al., 2013; López et al., 2016). Mediante análisis de bioapatita en colágeno para los restos óseos y de ¹⁴C para el sedimento que los contiene, se ha podido estimar que ambos pertenecen al Pleistoceno tardío, teniendo una antigüedad de ~21.000-24.000 años (López et al., 2015) y ~13.600 años (Carabias et al., 2014), respectivamente.

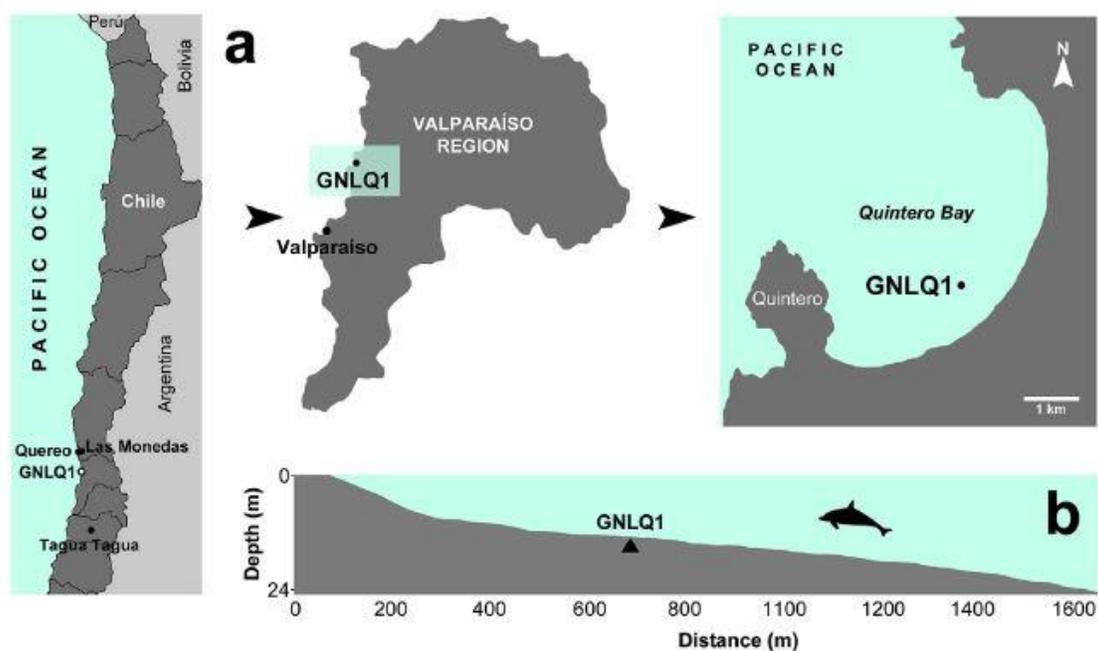


Figura 1. a. Ubicación del sitio GNLQ1-Quintero. b. Perfil de batimetría de la zona. Obtenido de López et al., 2016.

El sitio GNLQ1 es de gran importancia, ya que representa el único registro con estas características que se ha encontrado hasta el momento en las costas del Pacífico Sur en todo América (Carabias et al., 2014). Su hallazgo fue algo inesperado y sugiere que quizás existen muchos otros sitios con características similares sumergidos a lo largo de la costa de Chile y Sudamérica. Para lograr encontrar estos posibles sitios, primero es necesario conocer y caracterizar las condiciones tanto climáticas como geomorfológicas que permitieron la formación y preservación en el tiempo del sitio GNLQ1, lo que servirá como base para nuevos descubrimientos en el futuro.

Algunos factores importantes que deben ser estudiados son los cambios globales del nivel del mar (regresiones y transgresiones marinas) asociados a periodos de glaciación, actividad tectónica y el posible aporte de sedimento desde las quebradas cercanas. Estos pueden tener relación directa con la formación y, en mayor medida, con la preservación del sitio GNLQ1. Además, el viento y el oleaje pueden afectar significativamente la morfología de las distintas zonas de la bahía, tanto en superficie como en profundidad, generando sectores más propensos a la conservación del estrato de interés y otros donde es probable que haya una mayor tasa de erosión, por lo que también es importante estudiar la dinámica de las olas dentro de la bahía.

Carabias et al. (2014) han propuesto que el paleoambiente de la zona corresponde a uno de tipo estuario o llanura de inundación, basado en un estudio sedimentológico y estratigráfico de un testigo (T1) extraído del sitio GNLQ1. Sin embargo, una correcta contextualización de este hallazgo requiere de nuevas evidencias que apoyen dicha interpretación.

El objetivo de este trabajo es definir la geometría, potencia y extensión del estrato en el que se encuentra el sitio de interés GNLQ1, para poder comprender su formación y los procesos que lo han afectado posteriormente, y así poder definir con mayor claridad el ambiente en que se formó. Para esto se llevarán a cabo diversas metodologías que incluyen un estudio de la estratigrafía y granulometría de un testigo (T5), además de una caracterización sísmica y del fondo marino de ciertas zonas de la bahía que serán indicadas más adelante. A través de la integración de estas metodologías se podrá obtener información que evidencie los distintos procesos que han afectado el sitio. Entender bien todos estos procesos y las variables involucradas permitirá sistematizar la búsqueda de nuevos sitios con características similares en el futuro.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo de este trabajo es definir la geometría, potencia y extensión del estrato en el que se encuentra el sitio de interés GNL Quintero 1, con el fin de comprender su formación y los procesos que lo han afectado posteriormente.

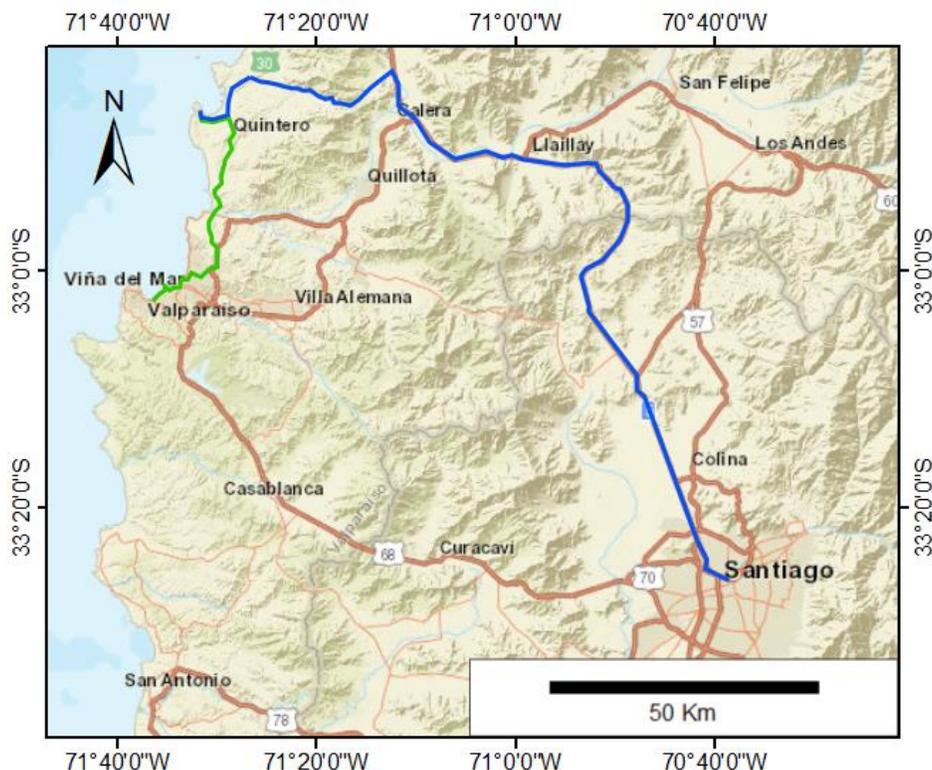


Figura 3. Rutas desde Santiago (azul) y desde Valparaíso (verde) hasta la zona de estudio. Escala 1:1.000.000. Elaboración propia.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Ambientes y procesos costeros

La zona costera constituye uno de los ambientes más frágiles del planeta Tierra, donde se producen importantes interacciones entre la atmósfera, el mar y la tierra (Merlotto y Bértola, 2008). El término zona costera describe al área litoral que se extiende desde la base de la duna o el límite donde termina la vegetación hasta una profundidad donde los sedimentos ya no se mueven por la acción del oleaje. Esta profundidad varía entre playas dependiendo de la batimetría, geomorfología y el oleaje. Las costas arenosas son altamente dinámicas y sus rasgos morfológicos evolucionan continuamente en respuesta a las condiciones cambiantes del mar, las corrientes y el viento.

2.1.1. Perfil costero

Con el fin de comprender todos los procesos que ocurren en las zonas litorales, Komar (1998) ha definido y dividido el perfil costero en varias secciones, las cuales serán brevemente descritas, desde la orilla hacia lo más profundo, y que se ilustran en la Figura 4.

- Backshore: se extiende desde el límite de las líneas de espuma de alta agua (marea alta) hasta las dunas o el límite interior extremo de la playa. Solo se ve afectado por las olas durante las mareas altas excepcionales o tormentas severas.
- Shoreline: se refiere a la orilla, es la intersección entre el agua y la tierra.
- Beachface: es la zona arenosa sumergida de la playa, se desarrolla a lo largo del perfil de la pendiente bajo la primera berma.
- Berma: depósito de sedimento situado en la playa que presenta una sección triangular que comienza en la pendiente del beachface y que, a partir de la zona superior, desciende suavemente hacia tierra o queda coronada por una forma plana conocida como berm top.

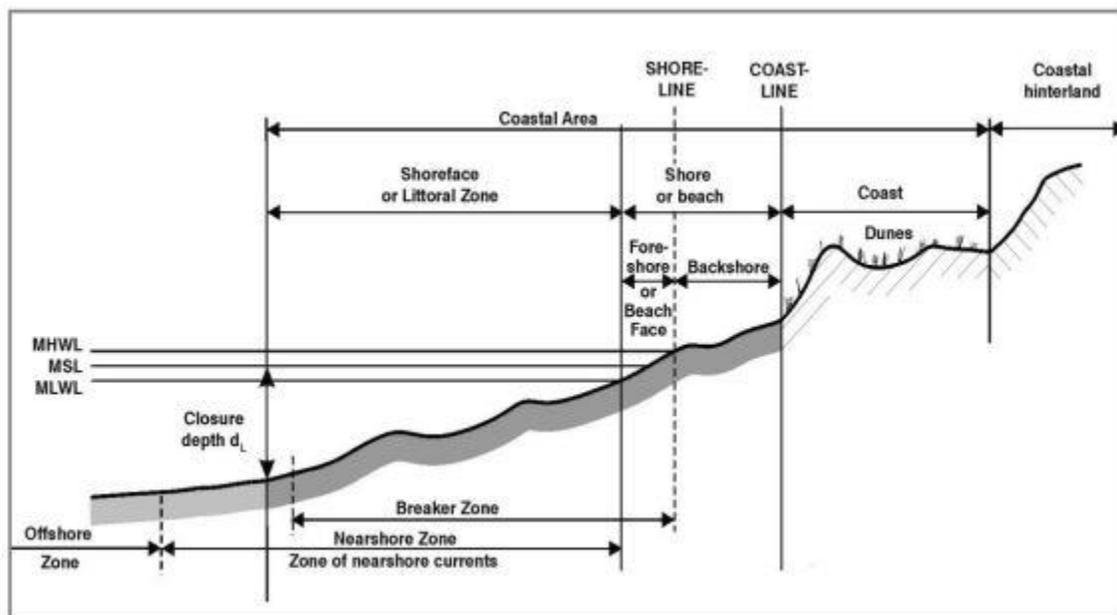


Figura 4. Ilustración de cada una de las zonas del perfil costero. Obtenido de Ibarra y Belmonte (2017).

- Foreshore: parte de la playa que se encuentra entre los límites de las mareas bajas y las altas. Puede coincidir con el beachface o bien contener algo de la porción plana del perfil de playa.
- Shoreface: es un término que se aplica a zonas litorales constituidas por materiales consolidados y no consolidados para denominar a la zona de transición entre el interlitoral y la plataforma continental.
- Nearshore: es la zona ocupada por los sistemas de barras y surcos en litorales constituidos por sedimento no consolidado. Cuando no hay barras presentes, el nivel de base del oleaje se convierte en el límite inferior. Se pueden distinguir tres perfiles:

- Breakerzone (zona de ruptura): es la sección en la que el oleaje llega desde el offshore y con la proximidad del fondo, comienza a perder estabilidad y romper.
- Surf zone (zona de surf): es la zona en la que el oleaje avanza hacia la playa formando un resalte (bore) en el frente de ola.
- Swash zone (zona de derrame): es la zona del nearshore donde, tras la rotura de la ola, el agua asciende por el beachface (run-up) y posteriormente retrocede hacia el mar por el efecto de la gravedad (backwash).
- Closure depth (profundidad base de la ola): es una profundidad teórica a lo largo del perfil de una playa donde el transporte de sedimentos es muy pequeño o inexistente. Depende de la altura y el período de las olas y, ocasionalmente, del tamaño de grano del sedimento.
- Offshore: zona del perfil que se extiende mar adentro desde la zona de ruptura hasta el límite de la plataforma continental.

2.1.2. Clasificación de las costas

La primera y más sencilla clasificación divide las costas entre rocosas y arenosas. Las costas rocosas (o erosivas) son dominadas por la erosión y se caracterizan por la formación de acantilados costeros, siendo muy comunes a lo largo de la Costa del Pacífico y noreste de América del Norte (Waters, 1992). En cambio, en las costas arenosas predomina la deposición de sedimentos que genera la formación de playas (Waters, 1992), las cuales se definen como depósitos de sedimentos no consolidados en zonas costeras sujetas a la acumulación y a la erosión por el efecto de las olas y las corrientes (Hattersley y Foster, 1968; Masselink y Hugues, 2003; Boak y Turner, 2005). Los cambios en las costas rocosas son muy lentos a escala temporal humana (Pérez-Alberti et al., 2013), mientras que las costas arenosas (playas) cambian con gran facilidad.

Otra forma de clasificación está relacionada con los cambios en los niveles anteriores del nivel del mar. De esta manera, una costa emergente es una costa que ha experimentado un descenso del nivel por efectos relacionados con el cambio del nivel del mar global o elevaciones locales y un litoral sumergido es aquel en el que el nivel del mar ha aumentado, por causa de cambios globales del nivel del mar, subsidencia local o equilibrios isostáticos (Ibarra y Belmonte, 2017). Las costas sumergidas se caracterizan por tener una configuración irregular, con acumulaciones de agua o embalses (embayments) que se extienden tierra adentro desde la costa y acantilados que se adentran en el océano, destacando la formación de estuarios y fiordos (Waters, 1992).

Según la estructura geológica, una costa es concordante cuando las bandas de diferentes tipos de rocas se disponen de forma paralela y la tendencia de la erosión es la formación de cabos y bahías, según el grado de resistencia. En cambio, en las

costas discordantes la disposición es perpendicular. Rías y fiordos son algunas de las formas de relieve propios de este tipo de costas (Ibarra y Belmonte, 2017).

2.1.2.1. Bahías

Según Sweers (1999), una bahía, también llamada costa entre afloramientos rocosos (headlands, acantilados, rocas de playa), se define como una costa arenosa entre dos puntos resistentes a la erosión (headlands), cuya orientación se va reajustando para dar lugar a un beachface más o menos perpendicular a la dirección principal de la onda. Aquí, la difracción y la refracción del oleaje desempeñan un papel importante, donde las arenas son erosionadas al incidir las ondas refractadas en el extremo de la bahía (en los headlands) por la deriva de la playa, proceso que se conoce como desarrollo de una bahía. Las bahías pueden ser expuestas o abrigadas, en función de la presencia de montículos y el grado de penetración de ondas en la bahía (Villagrán, 2007).

La fuente mínima de alimentación de las bahías proviene de ríos cercanos. El transporte litoral puede ser constante en caso de que exista una fuente continua de abastecimiento de arena alrededor de la deriva, por lo que la bahía depende de la cantidad de sedimento que viene del mar de fondo y de la cantidad de sedimento que trae un río. Así también, el equilibrio de la bahía depende del comportamiento del clima de la onda, puesto que muchas bahías pueden no manifestarse en estado estático o de equilibrio, debido a estar en un estado dinámico con una fuente constante de sedimento proveniente del mar (offshore) (Villagrán, 2007).

Desde un punto de vista morfológico, existen parámetros que afectan a las bahías. Según Benedet et al. (1999), estos parámetros son las dimensiones de los headlands, la orientación de la playa, la configuración batimétrica, la presencia de obstáculos costa afuera (islas pequeñas), la fuente del sedimento, las estructuras costeras, entre muchos otros. En la mayoría de los casos, las bahías con un solo headland tienen formas asimétricas, caracterizadas por una zona muy curvada y una zona transitoria suavemente curvada transformándose en rectilínea, mientras que las bahías conformadas por dos headlands tienen una curvatura distinta, una “doble curvatura” y una parte central de fondo, en la mitad de la bahía (Villagrán, 2007).

Las bahías limitadas por un headland (Sweers, 1999), se pueden clasificar como de equilibrio estático o dinámico. Una bahía en equilibrio estático es aquella que cuenta con una deriva litoral que genera casi nula entrada y salida de sedimento. En este tipo de bahía existen procesos de difracción de las ondas alrededor de la formación rocosa costera, que luego se disipan deriva abajo. En cambio, las bahías en equilibrio dinámico son aquellas que generalmente tienen alta dinámica de entrada y salida de sedimento. Son activas debido a la entrada de agua y sedimento a la célula (bahía), a la existencia de un río, y cuando los límites headlands o macizos costeros son de dimensiones poco significativas, permitiendo el transporte del sedimento. Este hecho también se puede ver impulsado por la intervención humana (Villagrán, 2007).

En materia de la conformación morfoestructural del borde costero, Soto (2005) señala que este aspecto se ve determinado por la variabilidad de formas como líneas litorales arenosas, procesos oceanográficos y morfológicos, que inciden en sus dinámicas espaciales y temporales. Desde el punto de vista morfológico, las líneas de costa con presencia de una saliente rocosa constituyen el factor morfotectónico y estructural incidente en la evolución de éstas, donde el headland corresponde al punto cero de una bahía, presentando un efecto de protección que resulta en una distribución sistemática de la energía de onda. La conformación geológica, los procesos ocurridos durante el cuaternario, la curvatura de la bahía, el tipo de zona de rompiente y la posición relativa del litoral son condiciones geográficas que permiten explicar la presencia, distribución y variabilidad de formas de ensenadas, tal como la presencia y dinámica de dunas y su relación con el litoral cercano, por lo que se toman en cuenta estos factores para entender los procesos que ocurren en el litoral como parte de todo un sistema (Villagrán 2007).

2.1.3. Hidrodinámica costera

Entre los principales factores de la hidrodinámica costera, se puede mencionar el comportamiento de las ondas cuando se acercan a la costa, en conjunto con el transporte de sedimentos hacia éstas, aspectos determinantes en la evolución, geometría y composición de las playas (Sweers, 1999).

Las ondas (olas) se generan en el océano abierto, donde el viento distorsiona la superficie del agua formando “swells” (olas de mar de fondo). Este tipo de olas tiene una forma en superficie caracterizada por una cresta, que corresponde a la altura máxima del agua por encima del nivel de aguas tranquilas, y un valle, que corresponde a la máxima depresión del agua por debajo del nivel de aguas tranquilas. Otras características de estas ondas superficiales incluyen la longitud de onda (distancia horizontal entre dos crestas adyacentes) y la altura de la ola (distancia vertical total entre la cresta y el valle de una ola) (Waters, 1992). Esta última se asocia directamente con la velocidad y duración del viento, y con la extensión del área de generación de éstas, llamada fetch (Komar, 1998). En el caso de la línea litoral de Chile, la dirección predominante del swell proviene del SW, y su área de acción es hacia el norte, teniendo una relación directa en los alineamientos litorales con esta orientación, mientras que, en litorales con ambientes protegidos frente a mar abierto, las causas de los alineamientos son más complejas, sobre todo teniendo en cuenta la importancia que en esos lugares tienen las corrientes de marea (Araya-Vergara, 1982).

Además de la onda superficial, la columna de agua directamente debajo de cada oleaje tiene un movimiento circular. Este movimiento orbital disminuye rápidamente debajo de la superficie y se vuelve insignificante a una profundidad igual a aproximadamente la mitad de la longitud de onda, nivel conocido como la base de la onda (Waters, 1992). Esta agua en órbita no genera transporte de masas. En ellas, un objeto que flota en la superficie marina describe una órbita o trayectoria circular completa con el paso de cada ola. Sin embargo, cuando estas olas llegan a aguas poco profundas cercanas a la costa, donde la profundidad del fondo es inferior

a la mitad de su longitud de onda, éstas se transforman en olas de traslación y comienzan a sufrir deformaciones provocadas por la resistencia que ejerce el fondo marino.

A medida que las olas superficiales entran en aguas poco profundas, el agua que circula debajo de ellas entra en contacto con el fondo del mar por primera vez en un punto conocido como base de olas de buen tiempo (fair-weather wave base). Cuando esto ocurre, el movimiento orbital debajo de la onda se distorsiona y las olas superficiales se elevan y se inclinan hacia adelante a medida que pasan a través de la zona de impacto (breaker zone). Conforme las olas continúan acercándose a la tierra, se vuelven demasiado empinadas y colapsan, haciendo que el agua que circula debajo de las olas se mueva hacia adelante, creando rompientes y transformándose en ondas de traslación o bores en la zona de surf. Luego, el oleaje avanza hacia la tierra como una fina corriente de agua, llamada swash, seguido por un flujo de retorno aún más delgado dirigido al mar, denominado backwash o resaca (Figura 6). Juntos, constituyen la zona de inundación o swash zone (Waters, 1992).

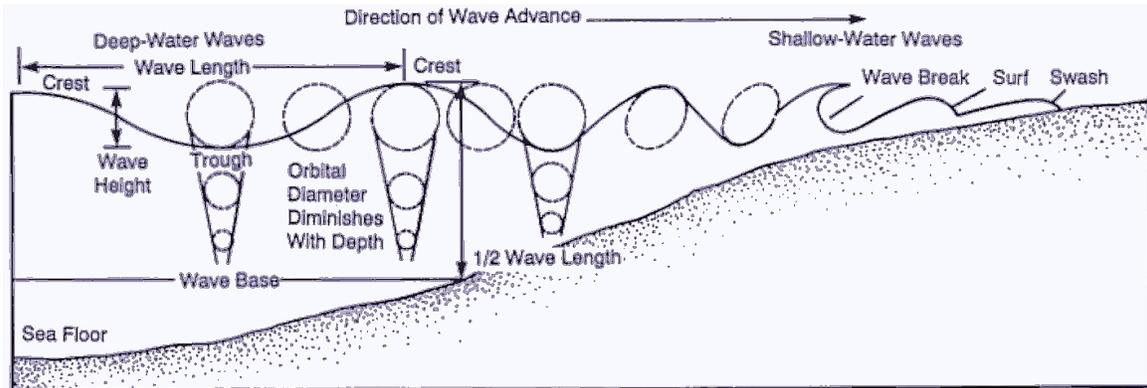


Figura 5. Terminología asociada a las olas cercanas a la costa. Los círculos muestran el movimiento orbital del agua a medida que la ola avanza. Obtenido de Waters, 1992.

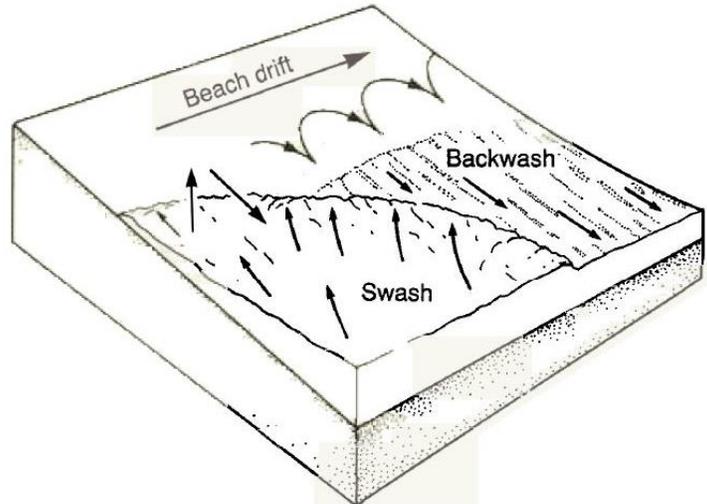


Figura 6. Comportamiento del agua en la zona de inundación o swash zone. Beach drift se refiere a la deriva de la playa. Obtenido de Waters, 1992.

El agua que circula por debajo de las olas erosiona los sedimentos del sustrato sumergido en la zona que se extiende desde la base de olas de buen tiempo hasta la parte superior de la zona de inundación. Estos sedimentos, una vez arrastrados por las olas, son transportados por la deriva de la playa, las corrientes costeras y las corrientes de resaca. La deriva de la playa es el transporte lateral unidireccional de sedimentos en la zona de inundación (Figura 6). Esto ocurre en áreas donde el flujo ascendente viaja diagonalmente por la superficie de la playa y el flujo de retorno es aproximadamente perpendicular a la costa. Esto hace que la arena se mueva en un patrón aproximadamente en zig-zag a través de la playa. En las zonas de surf y de impacto, los procesos de olas generan corrientes costeras (longshores) y corrientes de resaca (rip currents) (Figura 7). Las corrientes costeras son fuertes corrientes unidireccionales que transportan grandes volúmenes de sedimentos paralelos a la costa, mientras que las corrientes de resaca son corrientes que fluyen hacia el mar a través de la zona de ruptura y que también transportan sedimentos (Waters, 1992).

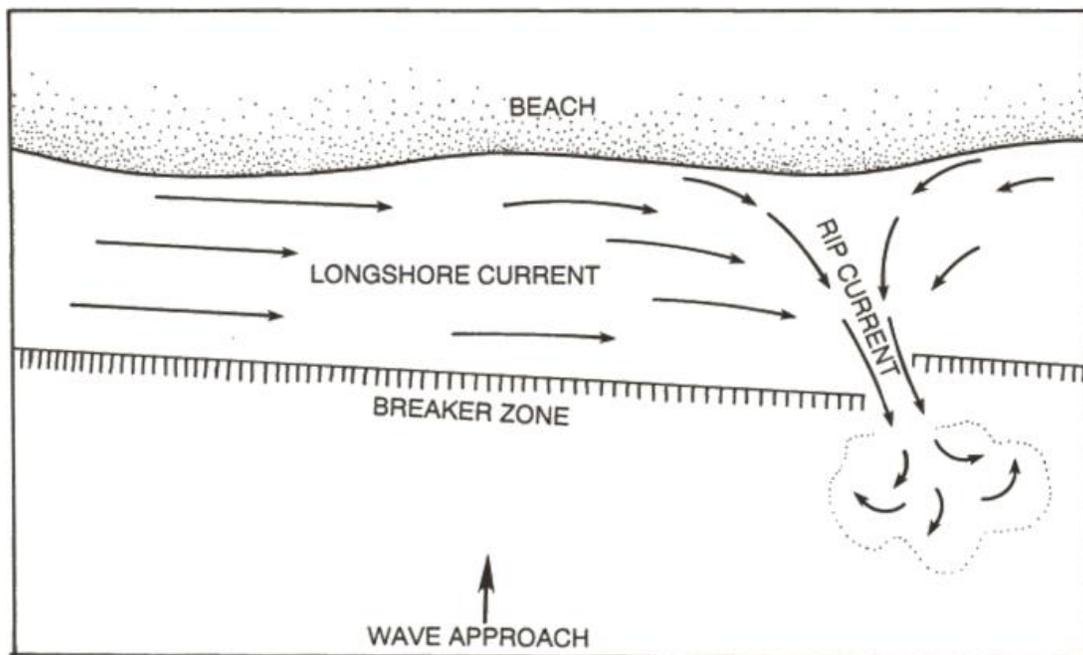


Figura 7. Corrientes costeras (longshore currents) y de resaca (rip currents) a lo largo de una costa. Las corrientes costeras fluyen paralelamente a la costa y transportan sedimentos lateralmente. Las corrientes de resaca canalizan el agua y sedimento de regreso al océano. Obtenido de Waters, 1992.

Las mareas también son importantes procesos costeros. Son el ascenso y la caída rítmica del océano producidos, dos veces cada 24 horas, por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol. La diferencia entre los niveles de agua alto y bajo se conoce como rango de marea. Las mareas afectan la zona costera de tres maneras: (1) el aumento y la caída constantes del agua generan corrientes de marea que pueden erosionar el fondo del océano y transportar sedimentos; (2) los procesos de olas erosivas se desplazan hacia la tierra y hacia el mar con cada subida y bajada de la marea; y (3) si el rango de marea es lo suficientemente grande, los procesos de olas se neutralizan. Además, las costas pueden modificarse sustancialmente durante las tormentas o si hay cambios estacionales en la intensidad de los procesos de olas. Durante estos períodos, la base de olas de buen tiempo baja y se extraen grandes

volúmenes de sedimentos de la costa que son transportados a alta mar. Gran parte de este sedimento se devuelve a la costa cuando se restablece el régimen de olas y corrientes normal (Waters, 1992).

Por otro lado, durante la propagación, la onda puede encontrarse con obstáculos, tales como, penínsulas, obras marítimas, islas, entre otros, que provocan una profunda modificación de la onda incidente, tales como, quiebre, refracción, difracción o reflexión (Sweers, 1999).

La refracción es aquel proceso en el que la dirección de propagación de las ondas cambia con la disminución de la profundidad, de tal manera que las crestas tienden a ponerse paralelas a las isóbatas, implicando una modificación en la dirección de la ola. Se refiere a un proceso cinemático de transformación de la ola, y en algunas circunstancias su altura cambia por la diferencia del espaciado de los trenes de ola (Villagrán, 2007). A medida que una onda viaja de aguas profundas a aguas más someras, la longitud de onda se acorta, la velocidad disminuye y la onda se refracta, o se curva, hacia el área poco profunda para conservar su energía. Esto se ve comúnmente en cañones en alta mar, cuando las ondas encuentran aguas poco profundas en los bordes de los cañones, lo que hace que la ola se refracte (doble) hacia la zona menos profunda.

Cabe señalar que la refracción puede ser producida, no sólo por la batimetría, si no que por cualquier fenómeno que produzca un cambio en la velocidad de propagación en una parte de la cresta de ola (Komar, 1998). Por su parte, Castro y Morales (2006) plantean que la refracción del oleaje es una acción diferenciada de las ondas según la topografía submarina, existiendo concentración de energía y erosión en las salientes, y dispersión de la energía del oleaje en las bahías, produciéndose sedimentación.

La difracción ocurre cuando una onda encuentra un obstáculo en su trayectoria y cambia de dirección o lo “envuelve”, provocando mayores gradientes de altura de ola en el frente de ola, lo que induce una transferencia lateral de energía. El proceso de difracción puede provocar que haya una transferencia de energía no interferida que penetre en una zona protegida, como un puerto o una bahía (Villagrán, 2007). El potencial de “envolver” o de cambiar dirección de una ola es mayor cuanto mayor es la longitud de ondas. Esta es la razón por la que un largo periodo de onda creado por un swell de largo periodo puede hacer que una ola pueda girar 180 grados alrededor de un embarcadero, mientras que en un swell de viento de corto periodo se dispersará antes. La difracción puede ocurrir tanto en aguas llanas como en aguas profundas y se separa de la refracción porque no es un resultado del cambio en la profundidad del océano. De todos modos, tanto la refracción como la difracción implican un cambio en la dirección de las olas.

La reflexión se genera cuando cualquier barrera en el camino de propagación de una ola puede reflejar o irradiar energía, provocando una devolución de ésta. La cantidad de energía reflejada depende de la pendiente de la barrera, por ejemplo, estructuras más verticales pueden reflejar una mayor cantidad de energía y, si el

oleaje se aproxima normalmente, dar lugar a ondas estacionarias que pueden tener el doble de altura que las olas incidentes (Batjes, 1974; Zanuttigh, 2006).

2.2. Técnicas de exploración geológica submarina

El estudio de la geología submarina de un determinado sector requiere el uso de equipos de diversos tipos, dependiendo de la información que se quiera recopilar. A continuación, serán descritas brevemente algunas de las técnicas más comunes.

2.2.1. Muestreo submarino

La exploración geológica marina requiere determinar la naturaleza de las rocas y sedimentos que yacen en el piso marino. Para ello normalmente se recolectan muestras geológicas por medio de instrumentos tales como dragas, rastras y sacatestigos tubulares o núcleos (corer, multicorer, piston-corer, etc) o de caja (box-corer) (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

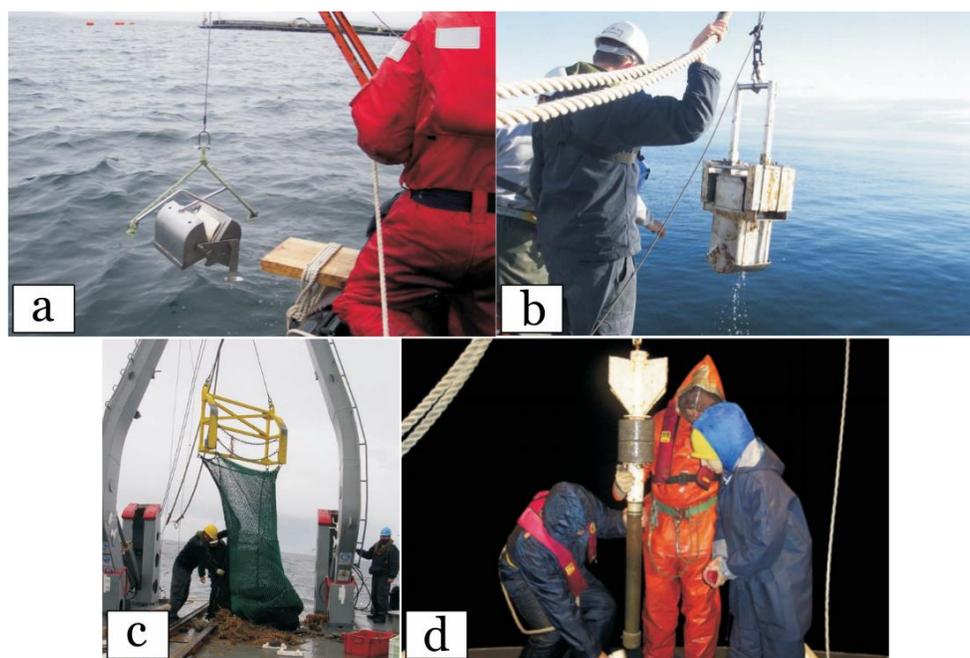


Figura 8. a. Draga. b. Sacatestigos de caja o box corer. c. Rastra. d. Sacatestigos tubular o gravity corer. Imágenes obtenidas del libro “Geología Marina de Chile”, Capítulo 2 (Díaz-Naveas & Frutos, 2010).

Las dragas, a través de sistemas parecidos a mandíbulas, sacan las muestras de sedimentos del fondo. Los box-corer consisten en una caja con mandíbulas en su extremo inferior que permite tomar muestras un poco más profundas que las dragas sin llegar a alterar el sedimento. Ambos equipos se utilizan conectados a un cable de acero que le permite bajar al fondo mediante un winche ubicado en la embarcación utilizada en terreno. Las rastras, son arrastradas a baja velocidad por el fondo, durante un determinado tiempo, cubriendo un área mayor que las dragas. Ellas pueden capturar rocas de laderas de montes marinos y aquellas diseminadas en las planicies y cuencas abisales (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

Los corer o sacatestigos permiten obtener una muestra en profundidad no alterada de sedimento bajo el piso marino, la cual se utiliza para realizar caracterizaciones estratigráficas. Existen varios tipos de sacatestigos, por ejemplo, algunos se dejan caer libremente por gravedad y después son recuperados con el winche de a bordo. Otros disponen en su interior de un pistón, que cuando se inicia su recuperación al tensar el cable, se activa y los sedimentos ingresan con mayor facilidad en su interior. Para obtener muestras más profundas, se realizan perforaciones con equipos de mayor complejidad (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

2.2.2. Métodos geofísicos

Otras formas de exploración de los fondos marinos, se basa en la utilización de diversos métodos que miden los parámetros o variables geofísicas. Estas variables pueden ser medidas desde la plataforma científica o cerca de ella (por medio de instrumentos remolcados). Sin embargo, actualmente, el mayor interés se centra en las mediciones muy cercanas al fondo del mar que persiguen una mejor resolución en los resultados. Los métodos geofísicos marinos clásicos son la batimetría, gravimetría, magnetometría y sísmica. Otros métodos son los eléctricos, electromagnéticos, radiométricos y las mediciones de flujo de calor (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

La batimetría consiste en la medición de la profundidad del fondo del mar. El instrumento principal utilizado es la ecosonda, la cual mide los tiempos de viaje de ida y regreso de ondas acústicas que se reflejan en el fondo marino a una frecuencia dada. Conocida la velocidad del sonido (por ejemplo, a través de un perfilador acústico) se puede, entonces, determinar la profundidad. Los resultados batimétricos indican la forma de la topografía submarina y su conocimiento es esencial para las asociaciones estructurales, tectónicas y otros problemas geológicos. Cada vez es requerida mayor resolución y cobertura espacial, por lo que han nacido los sistemas de ecosondas multihaz, que a diferencia de la ecosonda clásica (un haz), emiten en forma simultánea varios haces estrechos de sonido en forma transversal, a medida que el buque navega sobre su trayectoria de levantamiento (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

Muchas veces este sistema multihaz tiene incorporada la función de sonar de rebusca lateral (o sonar de barrido lateral), con la cual se barre acústicamente el fondo marino, lo que permite obtener información de amplitudes acústicas que se asocian a la rugosidad y a diferencias de material geológico. Este instrumento también puede ser independiente y remolcado. Como resultado se obtiene un sonograma o imagen acústica con contrastes de color o tonos de grises (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

La gravimetría mide la componente vertical de la aceleración de gravedad por medio de un instrumento llamado gravímetro. Generalmente, éste va instalado dentro del buque, en un lugar donde las influencias por movimiento son mínimas. En cambio, el magnetómetro, que mide el campo geomagnético total, siempre va alejado del buque para disminuir las influencias magnéticas de éste, por lo que va

remolcado a una distancia mínima tres veces la longitud del buque que remolca (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

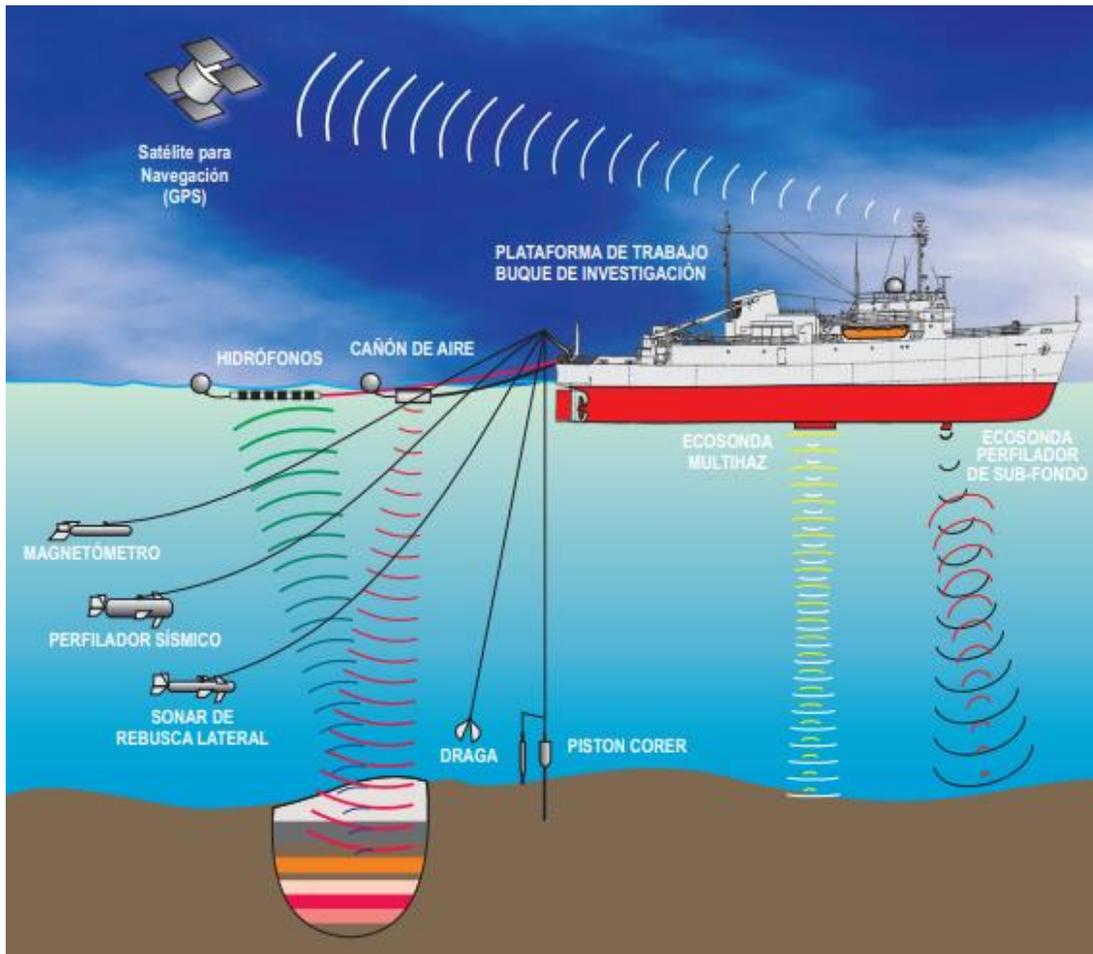


Figura 9. Distintos equipos utilizados para el estudio de la geología y geofísica submarina. Imagen obtenida del libro “Geología Marina de Chile”, Capítulo 2 (Díaz-Naveas & Frutos, 2010).

Para realizar análisis más detallados de las estructuras y la estratigrafía del subsuelo marino, se utilizan los perfiladores de subfondo y los equipos de sísmica marina. Los primeros pueden penetrar decenas de metros bajo el fondo del mar debido a sus bajas frecuencias ($\sim 3,5$ kHz) comparados con los ecosondas tradicionales (Díaz-Naveas y Frutos, 2010). Estos equipos sirven para detectar los reflectores más superficiales del subsuelo marino, y así poder visualizar con precisión la geometría de los estratos más superficiales, lo cual es clave para el estudio de los procesos sedimentarios activos actuales, como por ejemplo las avalanchas submarinas (Michaud et al., 2009). Por otro lado, los equipos de sísmica marina pueden alcanzar grandes profundidades (varios kilómetros), dependiendo del arreglo sísmico, las frecuencias y la energía sísmica generada. En este último método, es común tener separado el sistema generador de señales sísmicas (por ejemplo, cañones de aire) del sistema receptor (hidrófonos). Esto permite alcanzar mayores profundidades (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

Además, es necesario mencionar que la embarcación utilizada en terreno debe contar con un sistema de posicionamiento adecuado, para georreferenciar correctamente cualquier observación geofísica o geológica que se obtenga. Actualmente, la mayoría de los buques cuentan con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). En este sistema, una red de satélites artificiales, entregan información a los equipos a bordo para determinar la posición del buque (en el caso de este trabajo una lancha) con gran exactitud (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. Contexto geomorfológico y climático

La localidad de Quintero se ubica sobre la Planicie Costera de la costa central de Chile. En la zona de estudio el relieve es bastante suave y se pueden reconocer algunas plataformas marinas expuestas y erodadas, que hacia el este limitan con la Cordillera de la Costa, muy probablemente con depósitos aluviales, y hacia los valles probablemente se conectan con terrazas de origen fluvial (Flores y Ortega, 2014; López et al., 2015).

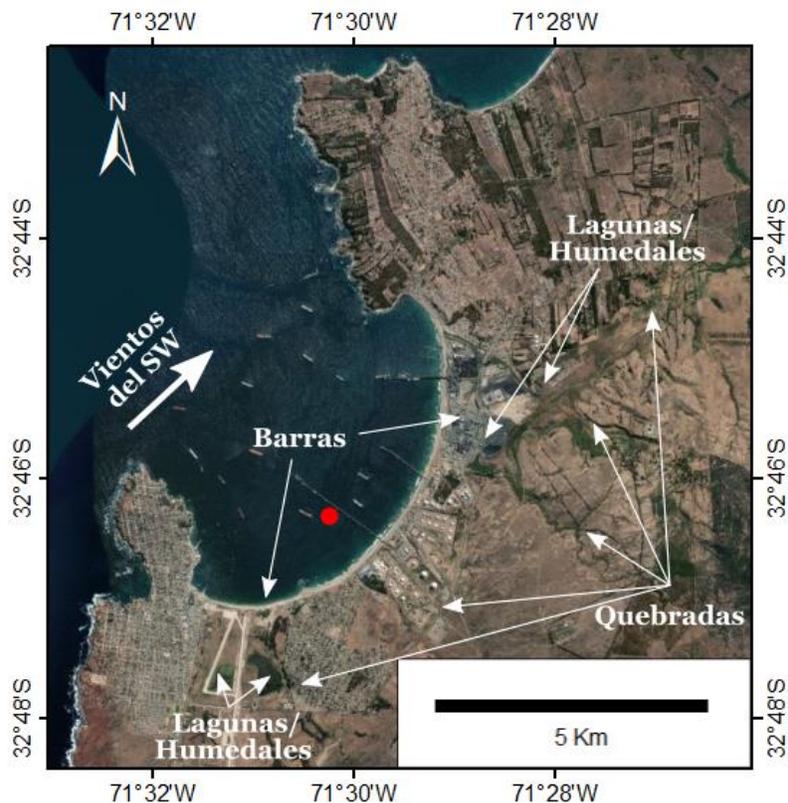


Figura 10. Algunas características geomorfológicas observadas en la zona de estudio. El punto rojo representa la ubicación del sitio GNLQ1. Imagen satelital Landsat. Escala 1:100.000. Modificado de Vargas y Ortega, 2008.

La bahía de Quintero es una bahía somera, con una profundidad máxima de 55 a 60 m, un largo de 5 km y un ancho de 2.4 km aproximadamente. Esta se abre

hacia el noroeste y está protegida, por la punta de la ciudad de Quintero, del impacto directo del frente de olas generadas por los vientos climatológicos del suroeste, que son los que abundan en la zona. En esta bahía descargan algunas quebradas con escorrentía permanente, como el estero Puchuncaví (o Campiche), cuya desembocadura se ubica en el sector noreste de la zona de estudio, específicamente en la caleta Ventanas, las cuales generan lagunas y/o humedales entrampados por barras de arena asociadas a la acción de la hidrodinámica litoral (Vargas y Ortega, 2008). De hecho, el sector en donde fueron obtenidas las muestras estudiadas se encuentra cercano a la desembocadura de una quebrada menor. Es importante tomar en cuenta la existencia de estas quebradas ya que son vías por donde posiblemente hubo transporte de sedimentos que pudieron haber ayudado a la formación y/o enterramiento del sitio GNLQ1.

El clima de la zona de estudio corresponde a uno de tipo templado con temperaturas moderadas, característico del sector costero de la Región de Valparaíso, con una media mensual superior a 10°C la cual se extiende por más de 4 meses, con ausencia de nieve y con escasas heladas. Además, se caracteriza por lluvias invernales intensas y con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses y gran nubosidad durante todo el año. Las precipitaciones promedio ocurridas en el área de estudio, son inferiores a 31,5 mm, con valores extremos de 0 y 106,4 mm. Según el reporte del Instituto de Fomento Pesquero (2016) los mayores niveles de precipitaciones se presentan durante el mes de julio, mientras que los valores mínimos ocurren durante febrero.

La marea presente en la zona es semi-diurna mixta (SHOA, 2007), es decir, se presentan dos pleamares y dos bajamares en un día. El viento S-SW es dominante durante verano, mientras que en invierno la componente S es más débil y aparecen periodos de viento N y NW. Las corrientes superficiales son conducidas principalmente por el viento, por lo que los cambios estacionales del viento muestran cambios estacionales en la circulación (IFOP, 2016). Por otro lado, durante la noche predomina una dirección de E a E-SE que se intensifica durante la época invernal (Oxiquim, 2013). Lo anterior evidencia que durante el día los vientos ingresan desde el mar hacia el interior, revirtiéndose el ciclo durante la noche y evidenciando una señal significativa de la brisa marina, estando sujetos a variaciones diarias donde se presentan más débiles durante la noche y madrugada, y también durante la tarde y el ocaso (ESVAL S.A., 2003).

Respecto al patrón hidrodinámico de la bahía, un estudio oceanográfico desarrollado por Escobar et al. (1971) indicó que las aguas entrarían por el sector norte de la boca y saldrían por el sur de la bahía de Quintero (Figura 11). Otro estudio efectuado por Baković y Balić (1984) mostró la importancia de la marea en la circulación y velocidad de las aguas en la bahía (Figura 12.a), ya que en llenante las corrientes se orientan hacia el interior del cuerpo de agua, mientras que en vaciante ocurre lo contrario. Observaciones posteriores realizadas por Malet y Andrade (1991) mostraron que la dinámica de las aguas de la bahía de Quintero presenta un sistema de doble celda permanente, con giro en sentido ciclónico, con un flujo de entrada por el norte de la bahía y un fuerte flujo de salida por el sur (Figura 12.b).

reconocer algunas terrazas en la zona. Aunque la cantidad de estas no se conoce con certeza y debe confirmarse en terreno, se puede reconocer que la altura de la plataforma que limita con la costa al norte y al sur de la bahía de Quintero, en su borde occidental, es de aproximadamente 60 m.s.n.m. Esta plataforma podría correlacionarse altimétricamente con las terrazas III de Saillard et al. (2009, 2012) en Altos de Talinay (30-31°S) que según las edades basadas en fechas de U-Th y ¹⁰Be podrían corresponder a un subestadío isotópico marino (MISS7e) hace 225.000 ± 17.000 años atrás (Saillard et al., 2008, 2009, 2012).

Dicha plataforma está compuesta por sedimentos marinos que según evidencias de bioturbación tipo skolithos o glossifungites sugieren un ambiente marino poco profundo. En dicha plataforma también se pueden apreciar clastos redondeados, imbricados y superficies de contacto irregulares que podrían sugerir efectivamente la presencia en esa localidad, cercano a la cordillera y en el valle, de una transición de terraza marina a fluvial. Se cree que el sitio se depositó en un contexto de llanura de inundación de dicha quebrada, cuando ésta estaba menos desarrollada y aún expuesta dado el bajo nivel del mar global (Flores y Ortega, 2014).

Además, se puede distinguir en el relieve actual que la quebrada que bordea el estero Puchuncaví posee extensas llanuras de inundación localizadas al nororiente del sitio, las cuales podrían estar espacialmente correlacionada con el éste (Flores y Ortega, 2014).

Por otro lado, la geomorfología de la bahía hace ~150 años, nos indica un escenario diferente al actual. Según la carta náutica de Pomar del año 1876 (Figura 13), en la zona donde ahora se ubica el humedal y el estero Pchuncaví (o Campiche) existía una gran laguna navegable, llamada Laguna de Campiche, de una extensión aproximada de 3 km, además de una pequeña laguna-humedal en la zona sur de la bahía (Loncura), donde ahora se puede encontrar el remanente de un pantano que forma parte del Santuario de la naturaleza Bosque las Petras. También se observa claramente la presencia de 4 quebradas que bajan hacia la bahía. Por otro lado, en el área centro-norte de la bahía, muy cerca de la orilla, se puede observar gran cantidad de dunas pequeñas. Estas posiblemente tuvieron relación con la formación de la Laguna Campiche, actuando como barreras para el agua proveniente del estero y provocando que se fuera acumulando en ese sector. Estas características evidencian una notable disminución de la cantidad de agua en todo el sector desde hace menos de 150 años, debido principalmente a la industrialización que ha ocurrido desde la década de los 60, y también a un cambio en el clima de la zona, pasando de ser más húmedo y lluvioso a uno cada vez más seco.

En cuanto a la batimetría de la bahía, el perfil de la Figura 14 muestra que el sedimento submarino presenta una mayor pendiente en los primeros 250 m aproximadamente desde la línea de costa, y una menor pendiente hasta los 1600 m alejados de ésta (Carabias et al., 2014).

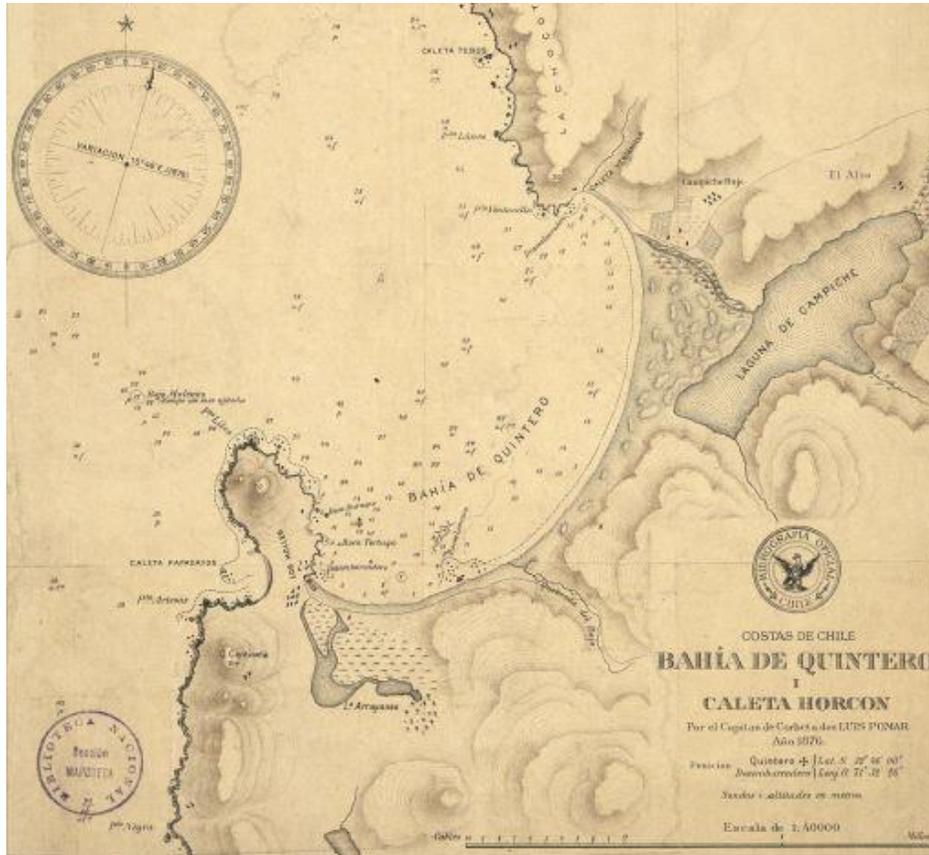


Figura 13. Recorte de la carta náutica de la bahía de Quintero, escala 1:40.000. Autor: capitán de corbeta don Luis Pomar, 1876.

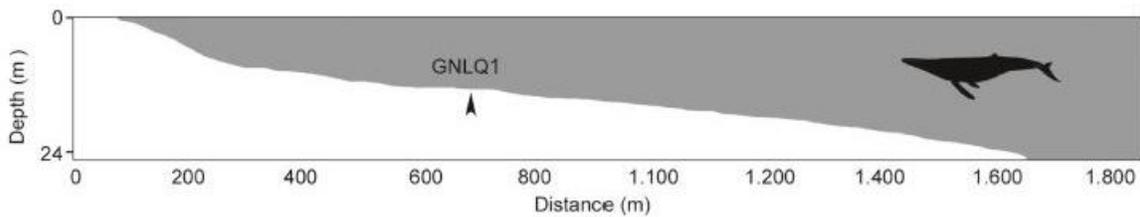


Figura 14. Perfil batimétrico de la bahía de Quintero. Obtenido de Carabias et al., 2014.

3.2. Periodos de glaciación y cambios del nivel del mar

Para un mejor estudio y comprensión del sitio sumergido GNLQ1, es necesario tomar en cuenta la historia local del nivel del mar en la zona de interés. Estudios anteriores (Carabias et al. 2014, López et al. 2015) han determinado que hace ~16.000 años atrás la línea de costa en la bahía de Quintero estaba mucho más alejada de la actual (alrededor de 6 km). Desde el último máximo glacial, o LGM por su sigla en inglés (Last Glacial Maximum), hace ~20.000 años, el nivel global del mar ha aumentado unos 120-130 m de altura (Lambeck et al., 2002) provocando la inundación de las costas del Pleistoceno en todo el mundo, y por lo tanto el avance de la línea de costa hacia el continente a lo largo de los años.

El cálculo del historial del nivel del mar en las áreas afectadas directa o indirectamente por la desglaciación es bastante complejo, ya que es necesario considerar diversas variables que se relacionan entre sí, como la tectónica, el nivel eustático y los cambios isostáticos. Debido a que estas variables pueden ser muy diferentes si se compara una zona específica con otra, no se puede tener una curva generalizada (Carabias et al., 2014). En el caso de Chile, se tiene registro de diversas tasas de alzamiento y actividad tectónica importante, sin embargo, las tasas de alzamiento calculadas para la zona de interés son bastante moderadas, con un mínimo estimado de 0.4 m/ka (Encinas et al., 2006). Este valor es consistente con los valores que se conocen para el Holoceno desde la última era Interglacial registrada para la zona norte-centro de Chile (Leonard y Wehmiller, 1991; Ota y Paskoff, 1993).

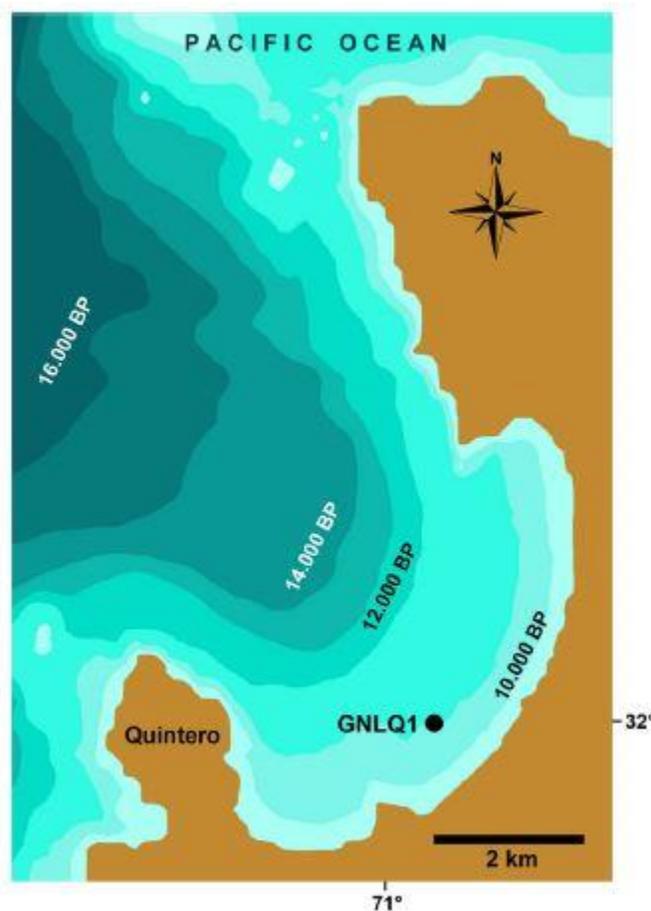


Figura 15. Mapa de la bahía de Quintero que muestra el avance de la línea de costa hacia el continente a lo largo de los años desde hace 16.000 años atrás. Obtenido de López et al., 2015.

Para determinar el nivel del mar relativo o RSL (Relative Sea-Level) de la Bahía de Quintero, Carabias et al. (2014) se basaron en los trabajos de los autores Spada y Stocchi (2007) y utilizaron un programa computacional Fortran para resolver la “ecuación del nivel del mar” o SLE (Sea-Level Equation). A través de una ecuación integral lineal pudieron determinar las variaciones del nivel del mar

provocadas por el derretimiento de las capas de hielo del Pleistoceno. Esto se corrigió utilizando una tasa de alzamiento constante de 0.5 m/ka (Carabias et al., 2014).

Según un primer modelamiento realizado por López et al. (2015), el paisaje de la bahía habría sido afectado por un solo evento de transgresión marina post-glacial que cubrió el sitio GNLQ1, luego de pasar unos 11.000 años expuesto (Carabias et al., 2014). De acuerdo a esto, la bahía habría pasado por dos fases. La primera correspondería a una fase continental, con desarrollo terrestre y un probable ambiente de llanura de inundación durante el LGM, y la segunda correspondería a una fase marina de agua poco profunda, producto de una transgresión marina durante la etapa post-glacial temprana (López et al., 2015).

En la Figura 15 se puede observar que hace aproximadamente 16.000 - 14.000 años, el aumento sostenido del nivel del mar postglacial causó la inundación progresiva y sustancial de ~3.2 km de la costa en una dirección general de SE. Debido a la geomorfología local, la línea de la costa avanzó ~0.9 km entre 14.000 AP y 12.000 AP. Entre 12.000 AP y 10.000 AP, la línea costera avanzó otros ~1.5 km, con la mayor parte de este progreso ocurriendo durante los primeros mil años, cuando la Bahía de Quintero adquirió la mayor parte de su forma moderna. El sitio GNLQ1 fue el último en condiciones subaéreas hace ~11.000 AP (Carabias et al., 2014). Esto explicaría el hecho de haber encontrado huesos de megafauna de origen continental en un sitio submarino.

3.3. Geología de la zona

Según la Hoja Quillota-Portillo (Rivano et al., 1993), que se muestra en la Figura 16, en la zona de estudio y sus alrededores se pueden distinguir unidades de diversos orígenes, las cuales se detallan a continuación.

3.3.1. Unidades intrusivas

En la zona de estudio y sus alrededores afloran cuerpos intrusivos que forman parte de la Superunidad Mincha, de edad Jurásica. Estos cuerpos intruyen rocas paleozoicas y rocas estratificadas del Triásico-Jurásico Medio de las formaciones Pichidangui, La Ligua, Los Molles, Quebrada del Pobre, Ajial y Cerro Calera. Esta Superunidad está constituida por 4 unidades, pero solo 3 afloran cerca de la zona de estudio, la Unidad Puerto Oscuro (Jmi4), la Unidad Tranquila (Jmi3) y la Unidad Cavilolén (Jmi2).

Rivano et al. (1985) definen la Unidad Puerto Oscuro como dos cuerpos batolíticos de forma irregular que se extienden entre el río La Ligua por el norte, y el estero La Canela por el sur, denominados Plutón Papudo y Plutón La Laguna respectivamente. Ambos cuerpos están separados por una franja de intrusivos pertenecientes a la Unidad Cavilolén. Según Espiñeira (1989), en el acantilado costero entre la caleta Horcón y Ventanas, también afloran rocas de esta unidad, donde están cubiertas por sedimentos cuaternarios (PQd) y del Plioceno (Th). Pese a que presenta variaciones litológicas y texturales de cierta importancia, esta unidad

se distingue por su color gris-verdoso a oscuro, y por la abundancia de minerales máficos (Rivano et al. 1985). Se le atribuye una edad del Jurásico medio (Rivano et al. 1985) y aflora en la localidad de Quintero, al sur de la bahía de Quintero y también hacia el noreste de la zona de estudio.

La Unidad Tranquila fue definida por Rivano et al. (1985 y 1993). Es la más reducida y sus afloramientos principales, que siguen un rumbo norte-sur, están formados por plutones de pequeño tamaño. No se pudo efectuar dataciones K-Ar en esta unidad debido a la ausencia, casi completa, de minerales ferromagnesianos, pero sus relaciones de terreno con la Unidad Puerto Oscuro sugerirían que es más joven que ella, aunque no se descarta por completo la posibilidad de una relación genético-temporal con la Unidad Millahue, que corresponde a la unidad más vieja de la Superunidad Mincha, con una edad del Jurásico inferior (Rivano et al. 1985). Aflora al sureste del área de estudio.

Por último, la Unidad Cavilolén fue definida por Rivano et al. (1985 y 1993). Es la más extensa y aflora en forma de grandes plutones batolíticos y cuerpos menores asociados. Intruye a todas las formaciones más antiguas estando a su vez intruída por pequeños cuerpos graníticos y filones dioríticos. Se le atribuye una edad del Jurásico medio a superior (Rivano 1985) y aflora más lejos, al noreste de la zona de estudio (no se alcanza a ver en la Figura 16).

3.3.2. Depósitos sedimentarios Cenozoicos

Formación Caleta Horcón (Th):

Thomas (1958) denominó así a los sedimentos poco consolidados que aparecen a lo largo de la costa entre Maitencillo y Horcón. También se reconocen entre las localidades de La Laguna y Cachagua, y entre Quintero y Ventanas. Estos sedimentos se disponen horizontalmente y afloran en forma de acantilados costeros de manera casi continua por aproximadamente 8 km de extensión entre la caleta Horcón y las playas de Maitencillo. Estos acantilados son el resultado de la acción erosiva del mar sobre las rocas expuestas en el borde costero, y constituyen una unidad fisiográfica muy importante en la conformación del paisaje local (Carrillo-Briceño et al. 2013).

Según Thomas (1958), la Formación Caleta Horcón no se restringe sólo a la zona costera, sino que se extiende (~13 km) hasta el pie de los cerros al este de Puchuncaví y en las cercanías de Quintero. Su espesor estimado es de 45 m (Carrillo-Briceño et al. 2013) y está en discordancia con las formaciones más antiguas. Lateralmente coincide con la Formación Confluencia (Rivano y Sepúlveda, 1991).

Corresponde a una unidad geológica depositada en un ambiente marino durante el Plioceno tardío. Inicialmente, Tavera (1960) determinó una edad del Plioceno para esta unidad, a partir de la recolección de una asociación de moluscos en los afloramientos entre Horcón y Maitencillo, más al norte de la zona de estudio. Posteriormente, en base a un conjunto faunístico de invertebrados y vertebrados

recolectado en los mismos estratos, se pudo restringir la edad al Plioceno tardío (Carrillo-Briceño et al. 2013).

Esta formación está compuesta principalmente por areniscas finas, limolitas y arcillolitas de colores claros, con intercalaciones de coquina y conglomerados en algunos sectores. Además, posee un alto potencial paleontológico (Tavera, 1960). Hasta el momento se han reconocido un poco más de 60 taxas de invertebrados y vertebrados, que incluyen las especies referidas por Tavera (1960) y otros nuevos registros que han sido estudiados más recientemente (Carrillo-Briceño et al. 2013).

Dentro de la secuencia estratigráfica que conforma a esta unidad, según Carrillo et al. (2013), se pueden distinguir 2 intervalos, los cuales se diferencian por sus características litológicas y paleontológicas. El intervalo inferior corresponde a los estratos basales de la unidad, tiene una potencia estimada de unos 8 m y está caracterizado por la ausencia de macrofósiles y una secuencia de conglomerados y areniscas verdosas con algunas concreciones calcáreas blancas. El intervalo superior corresponde con el resto de la secuencia estratigráfica hasta su techo. La litología presente está caracterizada por capas de areniscas finas a gruesas poco consolidadas de colores claros con algunas intercalaciones de conglomerados de clastos de tamaños muy variables, con formas redondeada y discoidal. Estas capas conforman dos estratos bien definidos a lo largo de toda la secuencia estratigráfica lo que permite correlacionar las capas en todos los afloramientos de la Formación Caleta Horcón.

Aflora principalmente hacia el norte de la zona de estudio (Figura 16) y está cubierta por paleodunas según lo que se puede observar en la Hoja Quillota-Portillo (Rivano et al., 1993).

Formación Confluencia (Tc):

Formación de origen sedimentario fluvio-aluvial. Fue definida por Espiñeira (1989) y luego por Rivano y Sepúlveda (1991) como una secuencia de gravas y ripios con intercalaciones de arenas poco consolidadas que se distribuyen en terrazas altas y con potencias de 50 a 100 m, las que muestran una distribución superficial parcialmente concordante con el sistema hidrográfico actual. Estos sedimentos se encuentran en discordancia con formaciones más antiguas y engranan lateralmente con la Formación Caleta Horcón. Se le atribuye una edad Pliocena, equivalente a la Formación Horcón debido a su coincidencia lateral. Aflora hacia el este del área de estudio (Figura 16) y está cubierta por paleodunas y sedimentos aluvionales.

Unidad de sedimentos eólicos y litorales (Qel):

Definidos por Rivano et al. (1993), corresponden a depósitos de playas y dunas costeras recientes, pertenecientes al Holoceno. Su distribución se relaciona estrictamente con la morfología actual, la actividad de cursos de agua y la dirección del viento. Están ubicados cerca de la franja costera, desarrollándose al norte de puntas de acantilados (headlands) donde se resguardan de los vientos NNE y las

corrientes marinas con dirección norte. Reciben sus principales aportes sedimentarios de ríos que ayudan a construir los depósitos litorales como playas, y al norte de ellas el viento construye depósitos eólicos con formas de dunas crecientes y morfologías parabólicas, en media luna y de barjanas. Dentro de la zona de estudio, se ubican en el sector más norte (NE) de la orilla de la bahía (Figura 16).

Unidad de sedimentos aluviales y coluviales (Qac):

Definidos por Rivano et al. (1993), corresponden a sedimentos aluviales, coluviales y depósitos de relleno de valles pertenecientes al Holoceno. Pueden reconocerse morfologías de conos de deyección torrencial y escombros de falda, además de depósitos de colapso gravitacional. Estos sedimentos están relacionados con los cursos de agua actuales y están conformados por acumulaciones de gravas y ripios con estratificación regular a mala y arenas y limos bien estratificados que en la mayoría de los casos son efímeros y evolucionan año a año.

Unidad de terrazas de depósitos marinos (Qtm):

Esta unidad, que en realidad corresponde a una unidad morfológica, está compuesta por pequeñas terrazas que aparecen en Cachagua y Quintero. Estas terrazas, de extensión bastante reducida, se encuentran sobre rocas sedimentarias poco consolidadas marino-litorales que son cubiertas lateralmente por paleodunas y que probablemente pueden corresponder a la Formación Caleta Horcón (Plioceno tardío). Además, estas formas afectan a las Paleodunas (QPd), por lo cual se habrían generado posteriormente, y probablemente fueron favorecidas por su ubicación geográfica (Rivano et al., 1993). Paskoff (1999) definió estas terrazas (y otras más en la región de Coquimbo) como el “nivel de Cachagua”, las cuales habrían sido labradas por una transgresión marina hace 80.000 años atrás, llamado el estadio de Cachagua. Se ubican en la zona más sur (SW) de la orilla de la bahía (Figura 16).

Unidad de sedimentos eólicos antiguos (PQd):

Esta unidad fue descrita por Rivano et al. (1993) y corresponde a arenas poco consolidadas de colores ocres, muy bien seleccionadas y con estratificación cruzada, pertenecientes al Plioceno-Pleistoceno. Su espesor es variable, desde unos pocos cm hasta unos 10 m aproximadamente. Estos sedimentos se reconocen en lugares discretos a lo largo de toda la costa, extendiéndose sobre terrazas costeras y cubriendo formaciones neógenas, rocas intrusivas paleozoicas y mesozoicas, tales como la Formación Caleta Horcón y la Superunidad Mincha.

Los sedimentos forman superficies suavemente onduladas a lo largo de la franja litoral, en las zonas de sotavento y al norte de las playas. Su emplazamiento sugiere que han sido acumulados bajo un régimen de vientos muy similar al actual, con una componente predominante desde el suroeste. Se ubican en gran parte de la zona de estudio (Figura 16).

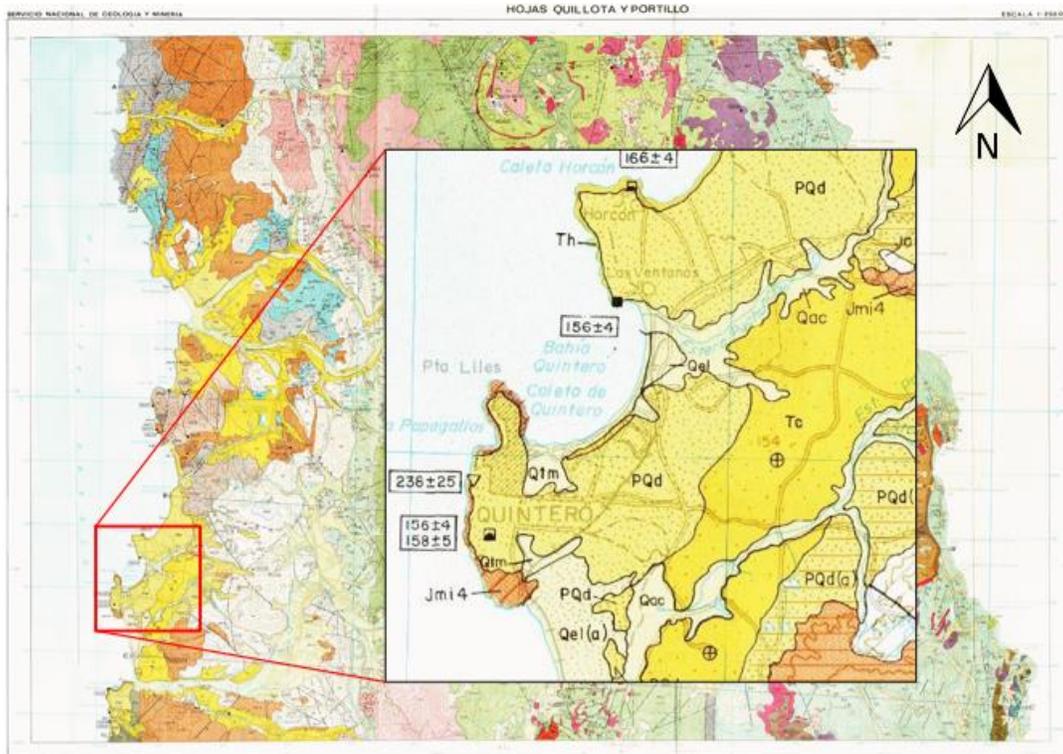


Figura 16. Hoja Quillota-Portillo, escala 1:250.000 (modificado de Rivano et al., 1993). El cuadro rojo corresponde a la zona de estudio, la que se muestra con mayor detalle en el recuadro negro.

3.4. Antecedentes estratigráficos y sedimentológicos del sitio

Vargas y Ortega (2008) realizaron un estudio sedimentológico, el cual incluyó un análisis de la granulometría, mineralogía y características texturales, a un testigo (T1) de 74.3 cm de largo y extraído en el fondo de la bahía (coordenadas UTM:

265697.6163 E, 6371205.9675 N). Gracias a esto se pudo determinar la presencia de 3 unidades, siendo la Unidad 1 la más joven y la Unidad 3 la más antigua. Cada una presenta características sedimentológicas diferentes y puede asociarse a un ambiente deposicional distinto. Estas se muestran en la Figura 17.

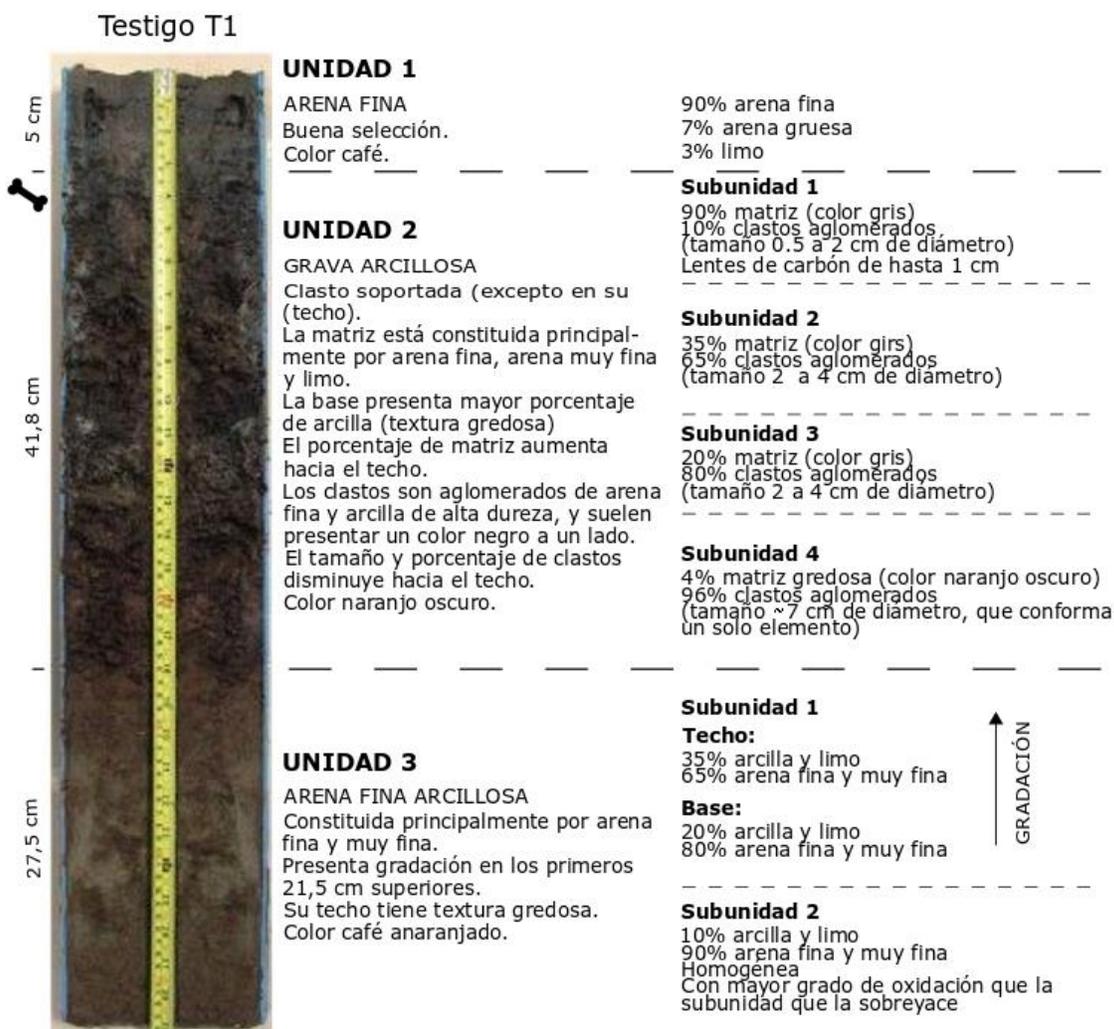


Figura 17. Características texturales y sedimentológicas de las unidades definidas para el testigo T1. Modificado de Vargas y Ortega (2008).

La Unidad 1 está constituida por arena fina color café de buena selección y ausencia de limos y arcillas. Tiene una potencia de 5 cm y sus características sedimentológicas son similares a las de muestras del fondo superficial ubicadas muy cerca del testigo T1. La Unidad 2 está constituida por aglomerados de arcilla tamaño grava, en una matriz de arena fina y limo de color naranja y gris. Posee algunas pátinas de carbón, y en la parte superior e inferior de la unidad se intercalan lentes milimétricos de carbón. Tiene un espesor de 41.8 cm y fue dividida en 4 subunidades, las cuales se diferencian por el porcentaje de matriz y clastos que posee cada una. Los restos óseos de fauna continental fueron registrados en la parte superior de esta unidad, distribuidos horizontalmente sobre un área extensa y asociados directamente con los lentes de carbón presentes dentro de los primeros 5 cm

(Carabias et al., 2014). La Unidad 3 está constituida por arena fina arcillosa de color café anaranjado, el cual indicaría cierto grado de oxidación. Tiene un espesor de 27.5 cm y presenta gradación normal con un mayor porcentaje de arcillas en el techo.

Debido a sus características, la Unidad 1 se asocia a un ambiente de anteplaya superior, y corresponde a arenas modernas que cubren el estrato de interés. En el caso de la Unidad 2, las propiedades de los aglomerados, compuestos principalmente de arcilla y arena fina, así como los lentes de carbón, sugieren un origen distinto, probablemente por obliteración, por ejemplo, por pisoteo animal, de un sedimento de tipo estuarial-lagunar somero. En cuanto a la Unidad 3, la gradación normal presente podría indicar que se depositó en un ambiente similar a la Unidad 2. En este sentido, la Unidad 2 podría reflejar una somerización-disecación del ambiente de sedimentación estuarial, con una posterior obliteración de los depósitos.

Si se considera que el ambiente de sedimentación de las Unidades 2 y 3 corresponde a uno de tipo estuario, y se toma en cuenta la variación global del nivel del mar mencionado anteriormente junto con un alzamiento tectónico despreciable para la zona en los últimos miles de años, se podría sugerir una edad de formación de la Unidad 2 superior a los 7.000 años AP (Vargas y Ortega, 2008).

En resumen, la estratigrafía del testigo analizado podría reflejar el paso de un ambiente de tipo estuarial-lagunar, con un período de somerización-disecación, a uno de tipo anteplaya superior, inundado por el mar (Vargas & Ortega 2008).

Estudios posteriores realizados por Flores y Ortega (2014) establecieron que es posible asociar la Unidad 2 con un ambiente aluvial o fluvial, con aporte de sedimentos desde quebradas y esteros de alrededor. Esta suposición se basa en la presencia de lentes y pátinas de carbón, y la tonalidad generalmente oscura de los sedimentos, que indicarían un ambiente de tipo continental con aporte moderado de materia orgánica. Además, se reconocieron marcas de pequeñas raíces en los restos faunísticos. Por otro lado, el color anaranjado que se observa en la Unidad 3 y en la base de la Unidad 2, evidencia que los sedimentos experimentaron una transición de ambiente deposicional subaéreo a uno subacuático. La secuencia estratigráfica del Testigo T1 junto al contexto geomorfológico actual indican que el ambiente de deposición correspondería a un ambiente fluvial, particularmente una llanura de inundación somera con desarrollo de humedales formada en un clima semiárido. Estas condiciones particulares de sedimentación contribuirían a que el espesor de esta unidad sea acotado, así como probablemente su extensión sea también limitada (Flores y Ortega, 2014).

3.5. Edad del depósito

Se ha determinado una edad de 21.580 ± 60 a 24.890 ± 70 años AP a partir de un análisis de bioapatita en colágeno (López et al., 2015) para los fósiles encontrados en el sitio GNLQ1, mientras que análisis radiocarbónicos en el sedimento arrojaron una edad distinta, de 13.640 ± 40 (Carabias et al., 2014). Esta inconsistencia puede explicarse a través de dos hipótesis (Flores y Ortega, 2014).

La primera hipótesis implica que los huesos fueron transportados y/o redepositados en un sedimento más joven, ya que estos tendrían una edad mayor que el estrato donde se encuentran. Esto se contradice un poco debido a las características del sedimento que indican que el ambiente deposicional correspondería a uno de baja energía y, por lo tanto, de poco o limitado transporte. El estudio realizado por López et al. (2015) también respalda esta idea, ya que las características de los restos óseos encontrados sugieren que estos no se acumularon por transporte hidráulico, sino más bien que los animales murieron en o cerca del sitio, y que fueron rápidamente enterrados. Sin embargo, como se dijo anteriormente, el nivel global del mar era mucho menor (130 m b.n.m. actual) hace unos 20-23 mil años (Lambeck et al., 2002), por lo que los huesos pudieron haber estado expuestos por un largo periodo de tiempo y luego haber sido sepultados hace unos 13.000 años atrás por sedimentos asociados a una llanura de inundación causada por la subida del nivel del mar. Para ese entonces, el nivel global del mar se ubicaba a 50 m b.n.m. actual (Lambeck et al., 2002).

La segunda hipótesis tiene relación con una posible datación de bioapatita alterada por contaminación de carbonatos más antiguos. La fuente de estos carbonatos más antiguos podría corresponder a las conchillas presentes en los sedimentos más antiguos que conforman el basamento sedimentario y que constituyen las plataformas marinas de la planicie costera.

4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este trabajo consiste en la integración de información estratigráfica y granulométrica obtenida de un testigo, con datos sísmicos e imágenes del fondo marino adquiridos de la zona de interés. El análisis granulométrico y estratigráfico servirá para determinar las unidades estratigráficas presentes en los testigos estudiados, mientras que las imágenes del fondo marino y los datos de prospección sísmica se utilizarán para caracterizar la bahía tanto superficialmente como en profundidad, respectivamente. Todo esto con el fin de poder determinar el paleoambiente deposicional del sitio GNLQ1 y sus condiciones de formación. A continuación, se detalla cada sección por separado.

4.1. Análisis granulométrico y estratigráfico

Se realizó un análisis granulométrico al testigo T5 (distinto al testigo T1 referido anteriormente), igualmente obtenido del sitio GNLQ1 (coordenadas UTM son 265690.7903 E, 6371211.6984 N). Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Se utilizó el instrumento MasterSizer 2000 de la marca Malvern para obtener información sobre los tamaños de granos presentes y sus frecuencias, en cada cm del testigo, el cual tenía una longitud total de 70 cm. Toda esta información se recopiló en una planilla de cálculo.

Luego se graficaron los datos de cada cm para poder apreciar de una manera más visible las modas presentes y sus variaciones en profundidad. Para comparar

entre si los resultados de cada cm del testigo, se utilizaron los porcentajes relativos de las modas de cada uno. Las modas presentes se clasificaron según el tamaño de grano. Gracias a esto se pudieron distinguir distintos tramos del testigo T5 que presentaban las mismas modas. Con esa información se hicieron gráficos que muestran la frecuencia de cada tamaño de grano para cada tramo, que reflejan las modas presentes en cada uno. Con esto se complementó la descripción estratigráfica previa, pudiendo determinar la estratigrafía del testigo T5 y sus distintas unidades. Además, se compararon con las unidades del testigo T1 definidas anteriormente.

4.2. Sonar de barrido lateral y prospección sísmica

Para la obtención de los datos sísmicos y de sonar de barrido lateral de la zona de estudio, se realizaron 2 campañas de terreno. Durante la primera campaña, realizada entre los días 23 y 25 de abril del año 2019, se obtuvieron imágenes del fondo marino y perfiles sísmicos, tratando de abarcar la mayor parte de la bahía, y durante la segunda campaña, realizada el día 13 de agosto de 2019, se obtuvieron nuevos datos sísmicos de mayor resolución en un área más acotada y cercana al sitio GNLQ1. Ambas campañas tuvieron lugar en la localidad de Quintero, específicamente en la bahía de Quintero, entre Loncura y Las Ventanas.

4.2.1. Preparación previa

Antes de ir a ambas campañas de terreno se definieron las transectas a recorrer. Para la primera campaña se tomaron en cuenta 2 criterios. El primero fue abarcar la mayor parte de la bahía, incluyendo zonas más expuestas y zonas más protegidas del oleaje, para determinar si existe alguna diferencia notable entre ambos sectores en cuanto a estructuras presentes y sus características. Además, si es posible, determinar la potencia del estrato de interés y que tan cubierto está en cada zona.

El segundo criterio se basó en una combinación de 3 condiciones: la topografía de los alrededores de la bahía, la presencia de esteros cercanos y la batimetría disponible de la bahía. Tanto la topografía como la presencia de flujos de agua se determinó gracias a la observación de imágenes satelitales y modelos de elevación de la zona, poniendo énfasis en depresiones o quebradas y zonas donde se observaba vegetación, que se consideró como un indicador de la presencia de agua. La batimetría de la bahía se obtuvo de la carta náutica de Quintero del SHOA (2002). Las quebradas y esteros se proyectaron hacia la bahía, tomando en cuenta los bajos que existen en ella, y así se definieron 6 transectas a recorrer, las que se muestran en la Figura 18.

La razón de tomar en cuenta este último criterio es debido a que esas quebradas representarían vías de posible transporte de sedimento, tanto en la actualidad como en el pasado, que podrían haber ayudado a la formación y/o enterramiento del sitio GNLQ1-Quintero.

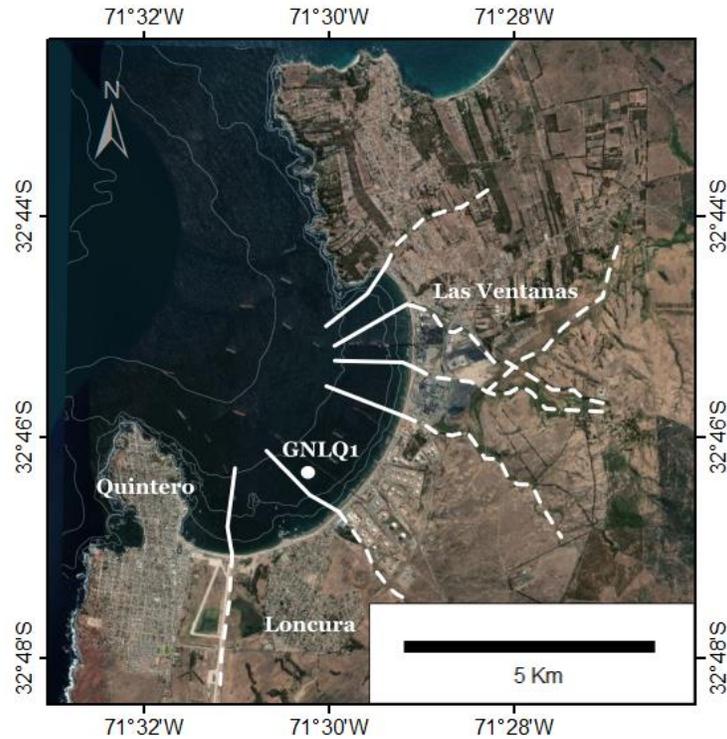


Figura 18. Mapa satelital (imagen Landsat) de la zona de estudio donde se muestran las isóbatas de la bahía y las transectas propuestas a recorrer durante la primera campaña de terreno, asociadas a quebradas y esteros cercanos. Las líneas blancas continuas indican las transectas escogidas y las líneas segmentadas representan las quebradas que rodean la bahía. Escala 1:100.000. Elaboración propia.

Para la segunda campaña de terreno se tomó en cuenta un área más acotada y cercana al sitio GNLQ1, para tener una caracterización más detallada de esa zona de mayor interés. Esta vez se trazó una sola transecta continua, considerando que solo se contaba con un día para la obtención de los nuevos datos. La transecta conforma una especie de grilla alrededor del sitio, y está compuesta de 4 trazas paralelas y 4 trazas perpendiculares a la línea de costa. Cabe destacar que 2 de estas trazas, una en cada sentido, pasan justo sobre el sitio de interés GNLQ1. La grilla puede observarse en la Figura 19.

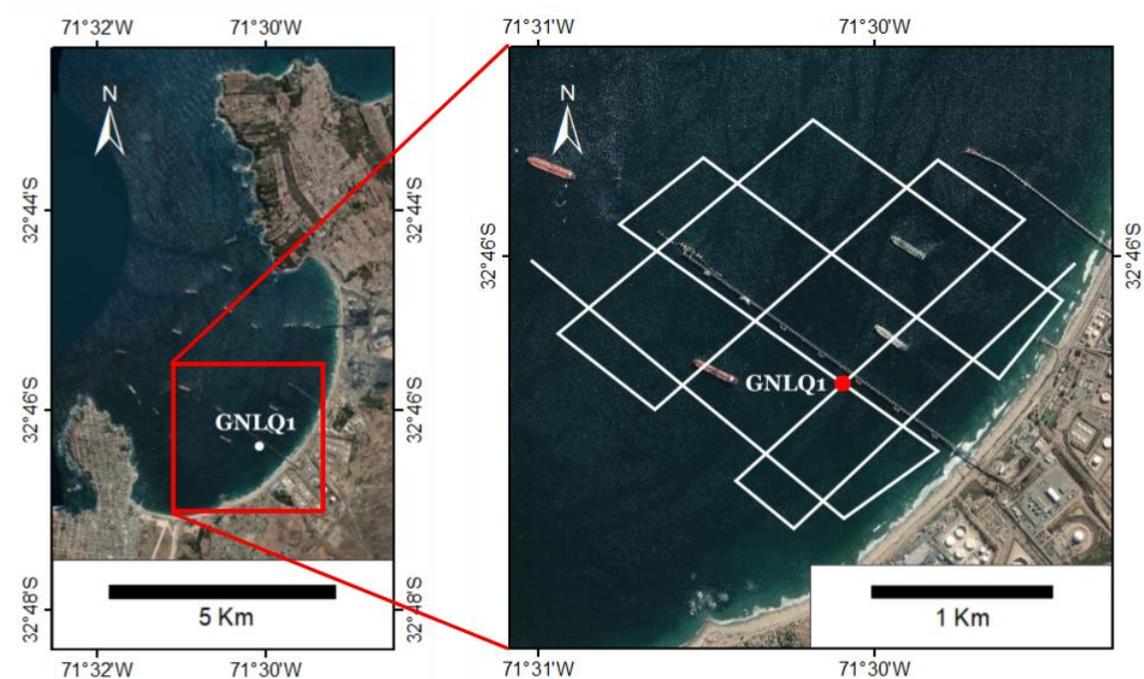


Figura 19. A la derecha se puede ver una imagen satelital Landsat de la zona de estudio. El cuadro rojo encierra el área más acotada abarcada durante la segunda campaña de terreno. A la izquierda se observa la grilla propuesta a recorrer con el SBP durante la segunda campaña de terreno. Escala 1:100.00 y 1:25.000 respectivamente. Elaboración propia.

4.2.2. Obtención de los datos

La primera campaña de terreno tuvo una duración de 3 días, los que se organizaron de la siguiente manera: El primer día se configuraron los equipos para obtener los datos con la mejor resolución posible, el segundo día se obtuvieron los datos de prospección sísmica y el tercer día los datos del sonar de barrido lateral. La segunda campaña de terreno duró solo 1 día, en el que se optimizó el tiempo disponible para alcanzar a recolectar todos los datos necesarios.

En ambas oportunidades se recorrieron las transectas antes definidas en una pequeña lancha, propiedad del Centro de Investigaciones en Arqueología Marítima del Pacífico Sur Oriental (ARQMAR), equipada con todo lo necesario para la toma de datos, que se muestra en la Figura 20.

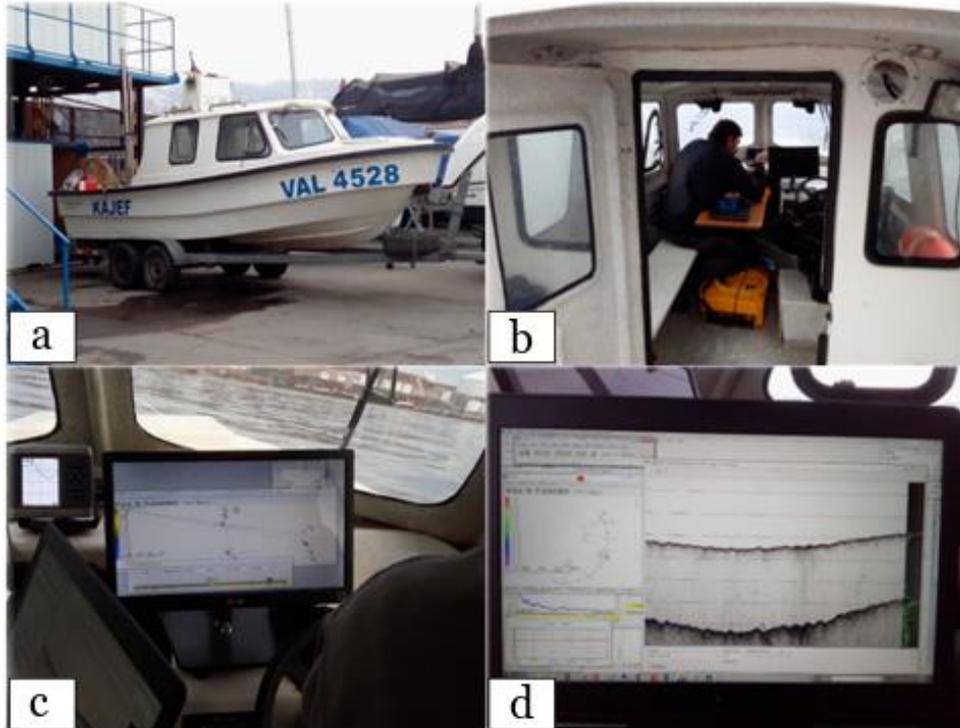


Figura 20. a. Lancha utilizada para la toma de los datos. b. Cabina de la lancha equipada. c. Pantalla que muestra la transecta a recorrer (se utiliza para poder manejar la lancha sobre la transecta definida previamente). d. Visualización de los datos sísmicos en tiempo real (Hypack-2017). Imágenes propias.

4.2.2.1. Perfiles sísmicos

Para la obtención de los datos sísmicos se utilizó el perfilador 3100 Sub-Bottom Profiling System (SBP), de la marca EdgeTech. Existen 2 modelos, el SB-216S, que alcanza una mayor penetración del sustrato, pero tiene una menor resolución, y el SB-424, que alcanza una menor penetración, pero tiene una mayor resolución. El modelo utilizado fue el SB-424, debido a que entrega imágenes con mayor resolución, lo que servirá para conseguir un mejor modelamiento de la zona. El estrato de interés se ubica a una profundidad bastante somera (~ 13 m), por lo que no fue necesario alcanzar una distancia muy profunda.

El equipo se amarró a un cable el cual se pasó por una polea instalada en el mástil de la lancha, con el fin de poder regular la profundidad del perfilador. Se utilizó un largo constante de cable de 5 m que mantenía al SB-424 a unos 3 m de profundidad. Este aparato fue conectado a un computador encargado de ir mostrando la información en tiempo real e ir grabando los datos que se obtienen al avanzar. En las Figura 21 y 22 se muestra el equipo y el montaje de este en la lancha.

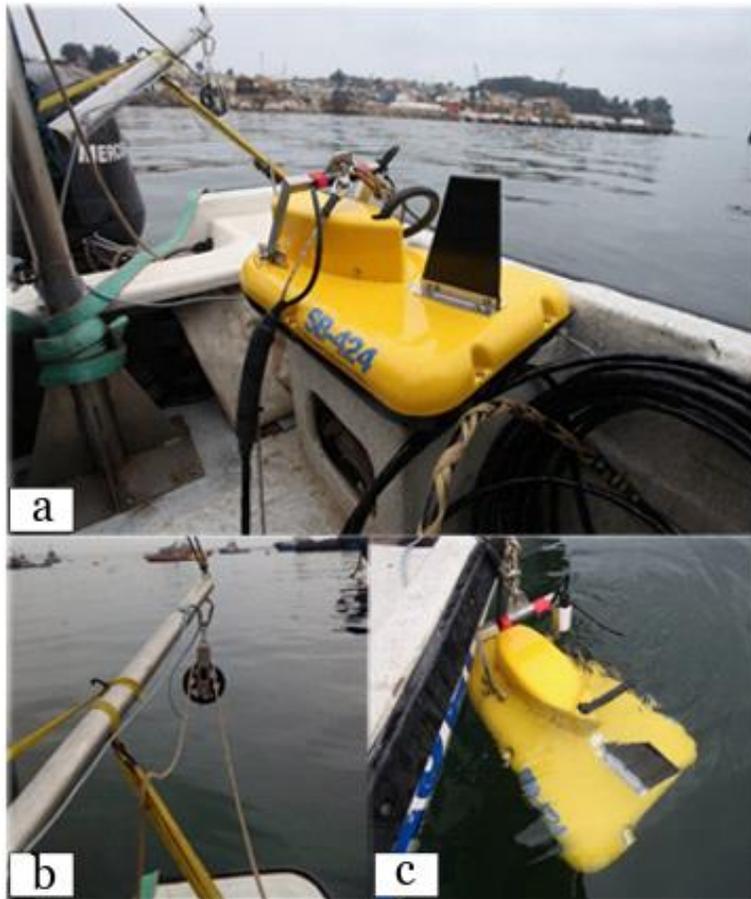


Figura 21. a. Equipo SB-424 en la lancha. b. Polea instalada en el mástil de la lancha. c. SB-424 siendo sumergido lentamente. Imágenes propias.

El equipo SBP va calculando su posicionamiento en tiempo real mediante el teorema de Pitágoras, teniendo en cuenta el largo del cable (L), multiplicado por un coeficiente catenario (k) debido a la curvatura de este, el alto de la polea (z) y la profundidad a la que va sumergido el SBP (I). Con esos datos es capaz de calcular el *layback* (o posicionamiento), que a su vez debe ser corregido ya que el GPS se ubica en el techo de la lancha, a una distancia conocida de la polea que sujeta el equipo. En la Figura 22 se puede observar esta configuración y las 3 diferentes fórmulas para el cálculo. En este caso se utilizó el método clásico.

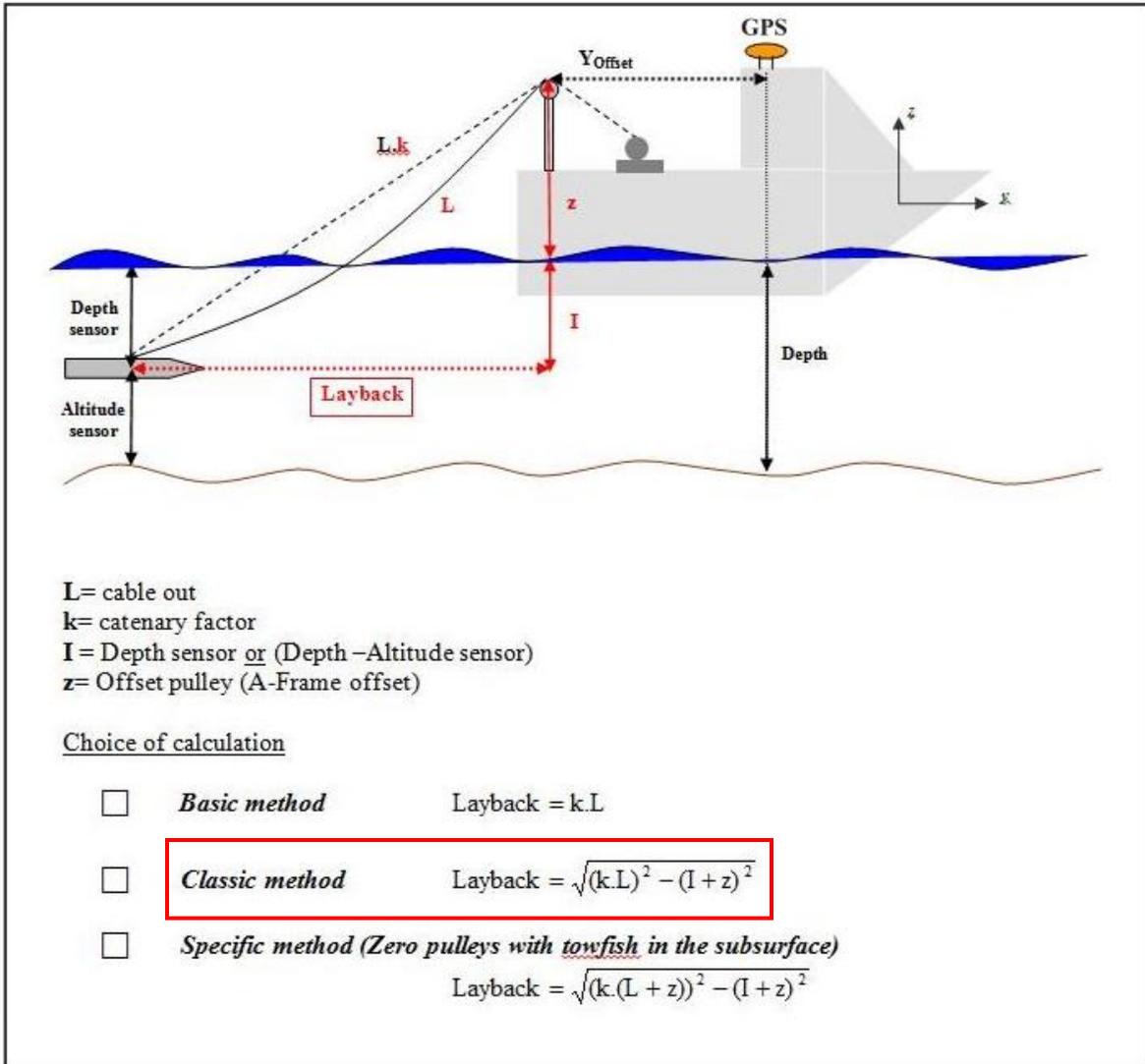


Figura 22. Diagrama del funcionamiento de los equipos utilizados (perfilador SB-424 y sonar de barrido lateral). La fórmula utilizada para los cálculos corresponde al método clásico, marcado con un rectángulo rojo. Imagen obtenida del software Hypack-2017.

En cuanto a la configuración técnica del equipo, en la primera campaña de terreno se utilizó una frecuencia bimodal de 4-20 kHz, un pulso de 5 pulsaciones por segundo y un rango de colores (escala de grises) entre 10 y 80 de un total de 256 tonalidades. Esto último se utiliza para obtener una imagen con los colores más equilibrados. Además, existe un parámetro llamado ganancia, que permite modificar la escala de grises aclarando u oscureciendo la imagen dependiendo de lo que se quiera acentuar. Este se divide en 3 subparámetros: TGV_1 , que afecta toda la imagen (desde la línea de fondo hacia arriba y hacia abajo), TGV_2 , que afecta solo desde la línea de fondo hacia abajo, y TGV_3 , que afecta desde una profundidad ajustable desde la línea de fondo hacia abajo. En la Figura 23 se muestra un esquema explicativo del alcance de cada uno de estos 3 subparámetros. Los valores utilizados para cada uno fueron: $TGV_1 = 1$, $TGV_2 = 52$ y $TGV_3 = 0$. La velocidad de la lancha fue constante en cada tramo, pero varió de una transecta a otra entre ~2,5 y 4 nudos. Para la visualización en tiempo real de los datos se utilizó el software Hypack-2017.

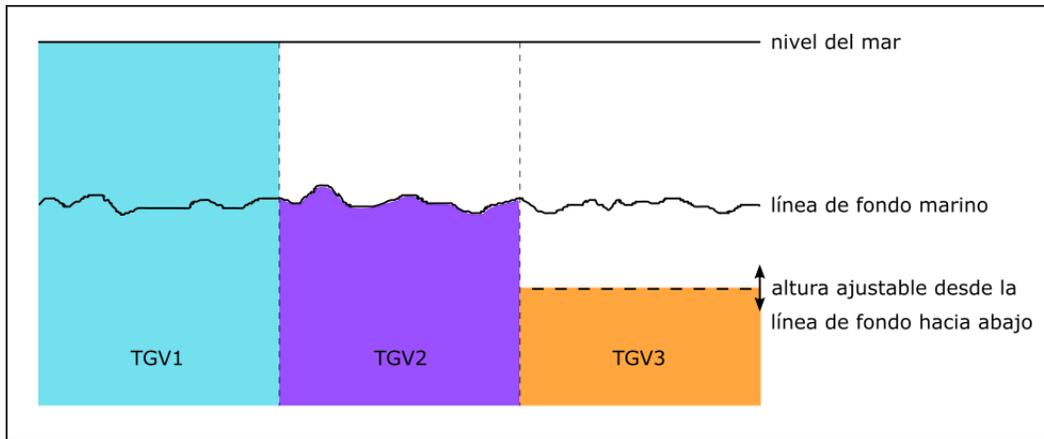


Figura 23. Esquema explicativo del alcance de cada subparámetro de la ganancia (TGV). Elaboración propia.

Durante la segunda campaña de terreno se utilizó una configuración diferente del equipo SB-424 para obtener imágenes con una mayor resolución. Se utilizó una frecuencia bimodal de 4-24 kHz, un pulso de 6 Hz, con un largo de 10 milisegundos, y se configuró la potencia al 50%. En este caso se utilizó el programa nativo de EdgeTech (Discover Sub-Bottom, versión 7.0) para la visualización inmediata de los datos, el cual cuenta con una herramienta llamada *auto TGV*, que va ajustando automáticamente el color de la imagen y no tiene las opciones de ajuste manual como el programa Hypack-2017, utilizado durante la campaña de terreno anterior. La velocidad de la lancha fue constante y equivalente a 3 nudos.

4.2.2.2. Imágenes del fondo marino

Para la obtención de las imágenes del fondo marino se utilizó un sonar de barrido lateral. El modelo específico es CM2 SideScan Sonar de la marca C-MAX (Figura 24). Gracias a estas imágenes es posible obtener información sobre el relieve, el tipo de suelo, afloramientos o estructuras sedimentarias presentes a lo largo de la bahía.

El esquema de configuración espacial fue el mismo utilizado con el SBP (Figura 22), pero en este caso el dato conocido de profundidad corresponde a la altura del sonar con respecto al fondo marino (profundidad total - I). Esta se mantuvo lo más constante posible, entre 10 y 5 m como mínimo. En cuanto a la configuración técnica del equipo, se utilizó una frecuencia alta, de 780 kHz, una velocidad constante entre 4-5 nudos y un rango de 38 m, que corresponde a la distancia de barrido abarcada hacia cada lado del sonar.



Figura 24. Imágenes del sonar de barrido lateral, su instalación en la lancha y siendo lentamente sumergido. Imágenes propias.

Se recorrió 2 veces cada transecta, en sentidos contrarios, ambas separadas por aproximadamente 20 m. Esto se hace para obtener más información ya que las transectas recorridas se solapan y se obtiene una imagen de todo el fondo. Además, las sombras se ven distintas hacia un lado o hacia el otro y se puede obtener una mejor aproximación de las estructuras y afloramientos presentes. En la Figura 25 se muestra un esquema explicativo del uso del sonar de barrido lateral.

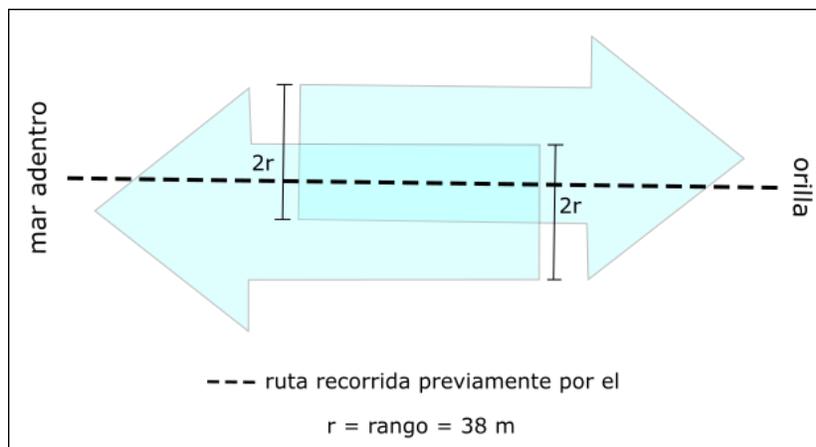


Figura 25. Esquema explicativo del uso del sonar de barrido lateral. La línea punteada representa las transectas recorridas previamente por el SBP. Las flechas de color celeste corresponden a las transectas recorridas por el sonar (una desde la orilla y la otra hacia la orilla), ambas distanciadas por aproximadamente 20 m. El ancho de las flechas corresponde al rango total o área barrida por el sonar, en este caso fueron 38 m por cada lado. La zona de color más oscuro representa el solapamiento de ambas áreas. Elaboración propia.

Es fundamental que las transectas a recorrer sean lo más rectas posibles y mantener una velocidad alta y constante para que el sonar de barrido lateral permanezca estable, ya que los cambios de dirección o velocidad muy bruscos, o incluso un oleaje con mucha energía, afectan negativamente la resolución de las imágenes que se van obteniendo.

Por otro lado, hay que tener mucha precaución con la altura del sonar con respecto al fondo marino. Es peligroso que vaya muy cerca del fondo porque puede golpearse o quedarse atrapado entre algas o rocas. Además, esta distancia debe ser entre 10-20% del rango utilizado para que se generen sombras. Esto es importante ya que con las sombras es posible estimar la altura de las estructuras, rocas o elementos en general que se encuentren en profundidad.

4.2.3. Trabajo de los datos obtenidos

4.2.3.1. Datos del sonar de barrido lateral

Para la visualización de las imágenes obtenidas por el sonar de barrido lateral se utilizó el software Hypack-2017. Este software, además de mostrar la imagen de cada transecta, cuenta con un mapa que las georreferencia para así poder identificarlas.

Antes de trabajar con las imágenes obtenidas, fue necesario hacer una corrección del fondo marino. El software Hypack-2017 tiene una opción que detecta automáticamente el fondo, pero a veces arroja algunos errores, por lo que se tuvo que hacer una corrección manual a cada imagen. Esto se hace para tener una buena referencia espacial.

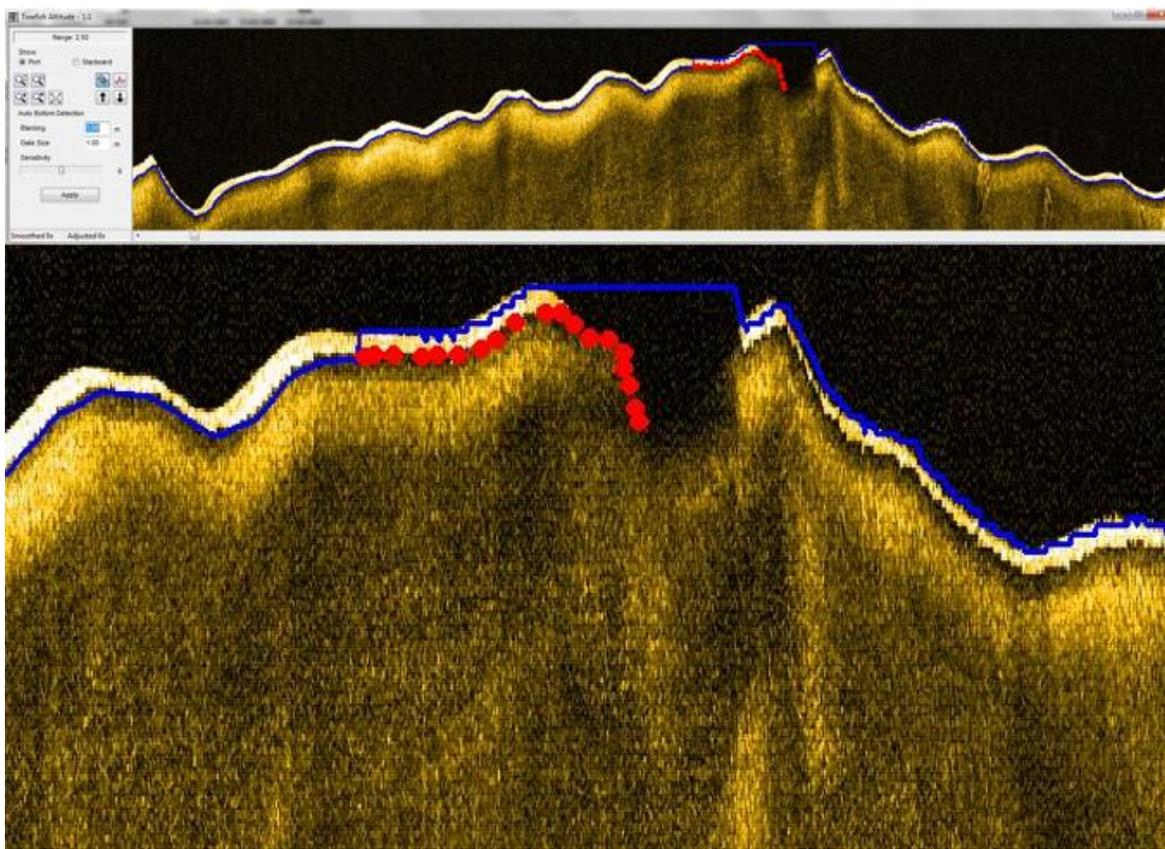


Figura 26. Corrección del fondo marino de las imágenes obtenidas por el sonar de barrido lateral utilizando el software Hypack. La línea azul representa el fondo marino, los puntos rojos corresponden al fondo corregido manualmente. Imágenes obtenidas del programa Hypack-2007.

Luego de esa corrección, se recorrió cada una de las transectas buscando características del fondo marino que llamaran la atención, tales como afloramientos de roca y estructuras sedimentarias, para poder caracterizar la zona de estudio. Una vez identificadas, se hicieron capturas de las zonas de mayor interés. Para esto se utilizó la herramienta *target* que guarda estas capturas junto con anotaciones que incluyeron las mediciones de las estructuras (ancho, largo, alto), sus coordenadas y otras características destacables. Dichas capturas se guardaron en formato *tif* para tener la georeferencia de cada una de ellas y facilitar su posterior mapeo.

El software Hypack-2017 tiene una herramienta incorporada que sirve para medir la altura de los objetos observados en profundidad en base a la distancia del fondo marino al objeto en cuestión y el largo de su sombra. Es necesario mencionar que es una altura estimada ya que depende de la profundidad a la que va el sonar, si este va una mayor profundidad la sombra se verá más larga y viceversa. Es por esto, que es importante mantener el sonar a una altura más o menos constante con respecto al fondo marino.

Una vez recopiladas todas las imágenes de las estructuras más representativas, se generaron tablas que las muestran en detalle con sus respectivos nombres, orientación y coordenadas. Finalmente, se representaron en un mapa de la zona de estudio para tener una idea general de su distribución y orientación.

4.2.3.2. Datos del perfilador sísmico (SBP)

Los datos obtenidos por el perfilador corresponden a un conjunto de trazas verticales que representan las ondas recibidas por el equipo y que componen una imagen del sustrato marino en profundidad. Para la visualización y análisis de los perfiles sísmicos se utilizó el software gratuito SeiSee, el cual cuenta con varias herramientas y parámetros ajustables que facilitan la observación de los datos y la distinción de posibles estratos y estructuras.

Luego de probar varias configuraciones, los parámetros escogidos y utilizados fueron 10 trc/cm, que corresponde al eje x de la imagen y 2.500 cm/sec, que corresponde al eje y de la imagen. Otro parámetro que se ajustó fue la ganancia (A) que se relaciona con el color de la imagen, al aumentar su valor, la imagen se torna más oscura y se pueden distinguir mejor las estructuras presentes en profundidad. En este caso se utilizó un valor igual a 0,05 en ambas componentes. Se usó también un filtro de banda trapezoidal con una frecuencia de corte inferior de 3.000 Hz y una frecuencia de corte superior igual a 10.000 Hz, para resaltar las posibles estructuras presentes en profundidad. Además, fue necesario quitar algunas trazas que correspondían a ruido y que no permitían ver los datos de una buena manera. Esto se logró utilizando la herramienta *select traces* que permite visualizar 1 de cada X trazas, en este caso 1 de cada 3. En las Figuras 27 y 28 se puede observar la diferencia de los datos con y sin filtro y con y sin ruido respectivamente.

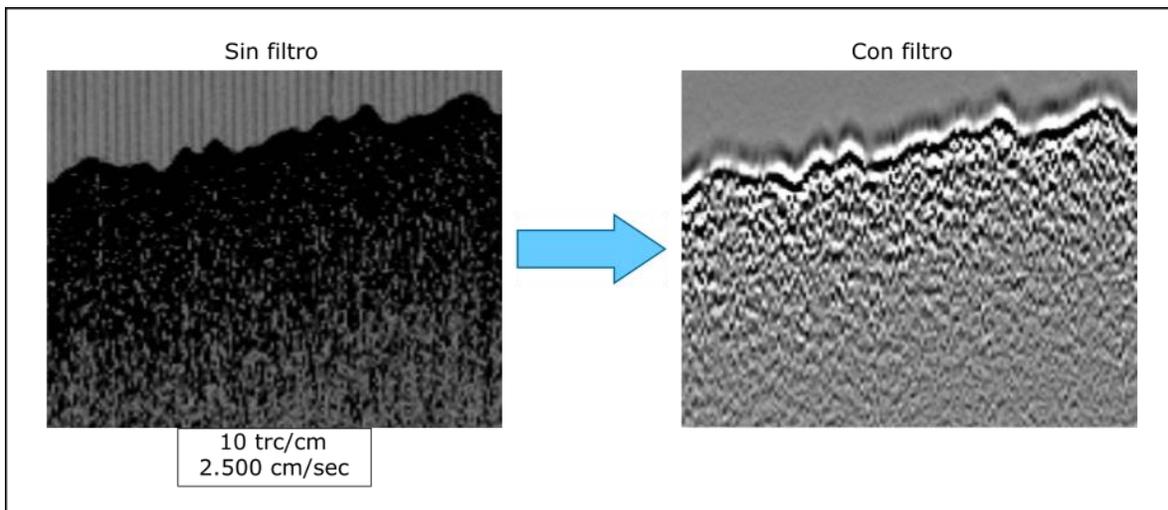


Figura 27. Comparación de datos sísmicos sin filtro y con filtro. Se puede ver como la imagen se aclara y se obtiene más información. En el recuadro se especifican los parámetros utilizados. Imágenes obtenidas del software SeiSee.

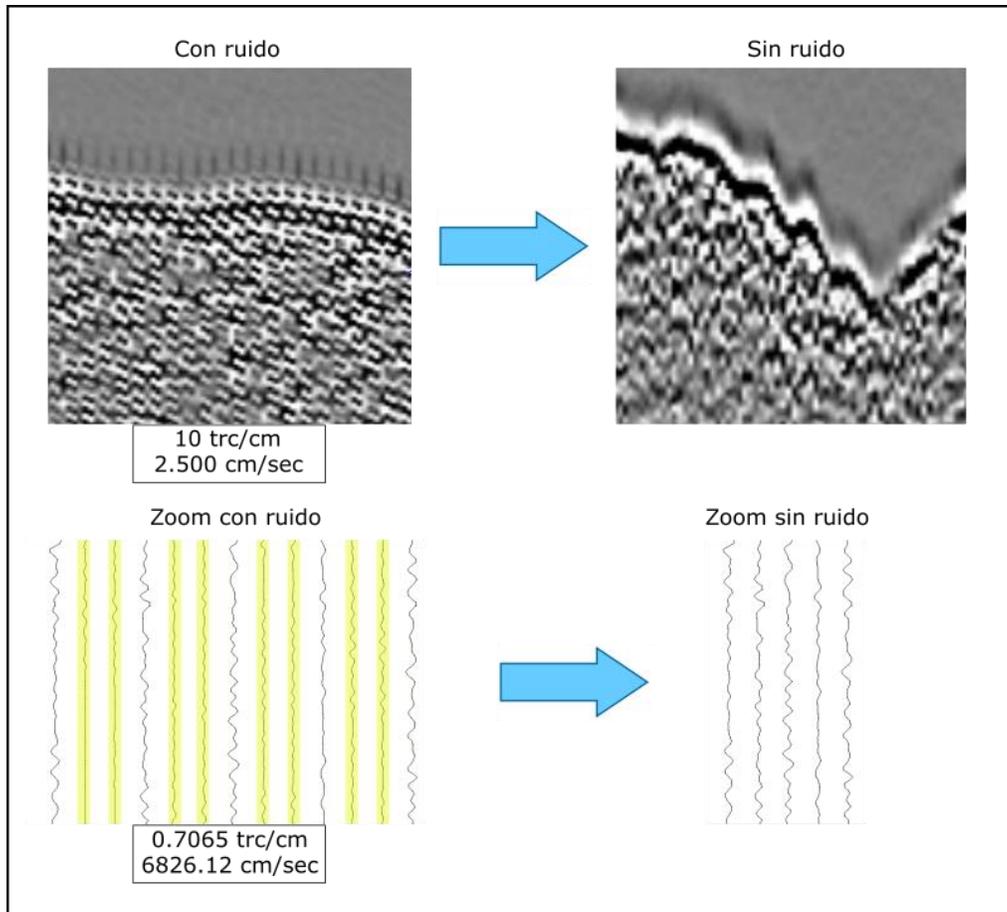


Figura 28. Comparación de datos sísmicos con ruido y sin ruido. En las imágenes con zoom se puede notar que las líneas que corresponden a ruido, destacadas en amarillo, son pares de trazas idénticas. En los recuadros se especifican los parámetros utilizados en ambos casos. Imágenes obtenidas del software SeiSee.

Una vez ajustados todos los parámetros, se revisó cada archivo buscando estructuras visibles o posibles estratos, según indicaban los reflectores más notorios y se fueron marcando. Para facilitar esto se dividió cada perfil en 3 áreas: extremo izquierdo, centro y extremo derecho. Luego se generaron imágenes de cada tipo de estructura más característico o repetitivo y se clasificaron según si pertenecían a las transectas paralelas o perpendiculares a la línea de costa, para tener una idea general de su aparición y distribución. Además, se generaron imágenes que contienen todo el perfil correspondiente a cada transecta, para poder observar estructuras a mayor escala, que abarquen toda la bahía.

El programa Seisee, a diferencia de Hypack 2017, no cuenta con un mapa incorporado que permita identificar cada archivo, por lo que fue necesario realizar un mapeo de las transectas en ArcMap a partir de las coordenadas de cada traza, para tener la referencia necesaria. Para esto se tomaron en cuenta solo los tramos rectos de la grilla (las vueltas de cada esquina se omitieron).

5. RESULTADOS

5.1. Estratigrafía y granulometría

A partir de una fotografía y una breve descripción del Testigo T5, se pudieron identificar 5 unidades estratigráficas, basándose principalmente en las variaciones de color y textura presentes, y la presencia de huesos, conchas y otros. Además, gracias a una tomografía que se obtuvo del testigo T5 se pudieron distinguir aún mejor los límites de cada unidad y sus diferencias texturales. A continuación, se describen brevemente dichas unidades de techo a base.

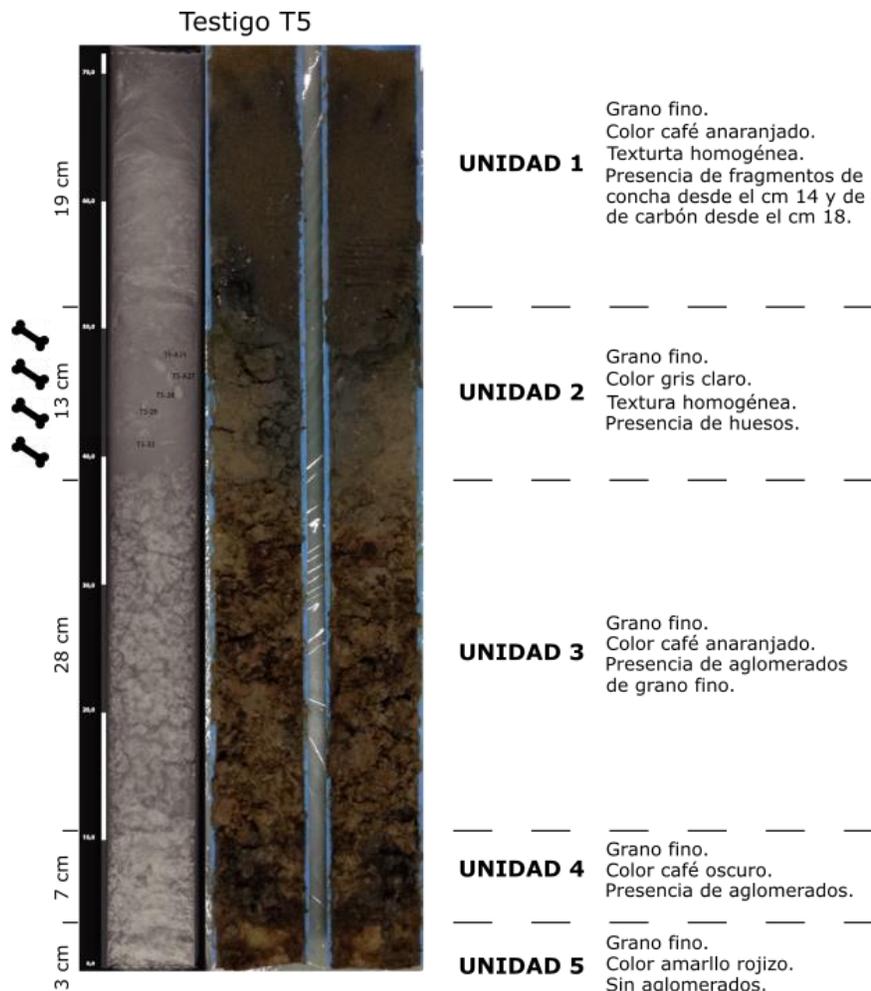


Figura 29. Imagen del testigo T5 donde se pueden distinguir 5 unidades estratigráficas. A la izquierda se muestra una tomografía del testigo, donde se notan mejor los cambios texturales. A la derecha el testigo está cortado por la mitad y abierto, y se pueden notar mejor los colores de cada unidad. Elaboración propia.

La primera unidad estratigráfica se compone de un sedimento fino de color café y textura homogénea. Tiene una potencia de 19 cm en total. A partir del cm 14 se pueden encontrar algunos fragmentos de conchas y a partir del cm 18 algunos fragmentos de carbón, lo que le otorga un color un poco más oscuro. La segunda unidad también se compone de un sedimento fino y tiene textura homogénea, pero es de color gris. Esta unidad tiene una potencia de 13 cm y se pueden encontrar restos

óseos. La tercera y cuarta unidad se caracterizan por presentar un color café y una textura rugosa irregular, conformada por aglomerados de grano fino. La unidad 3 tiene un color café más anaranjado y una potencia de 28 cm, mientras que la unidad 4 tiene un color café más oscuro y una potencia de 7 cm. La quinta y última unidad se caracteriza por tener un color amarillo rojizo y no presentar aglomerados. Tiene una potencia de solo 3 cm. El tamaño de grano aumenta levemente desde la Unidad 3 hacia la Unidad 5.

Se realizó un mapeo estratigráfico de la tomografía del testigo T5 (Figura 30), donde se puede advertir que la Unidad 1 presenta 2 subunidades. Estas se diferencian por su color, donde la subunidad 1 tiene un color más oscuro mientras que la subunidad 2 es más clara. Además, se logró apreciar con mayor detalle la textura irregular de los aglomerados presentes en las Unidades 3, 4 y 5, y también algunos fragmentos de huesos en la Unidad 2.

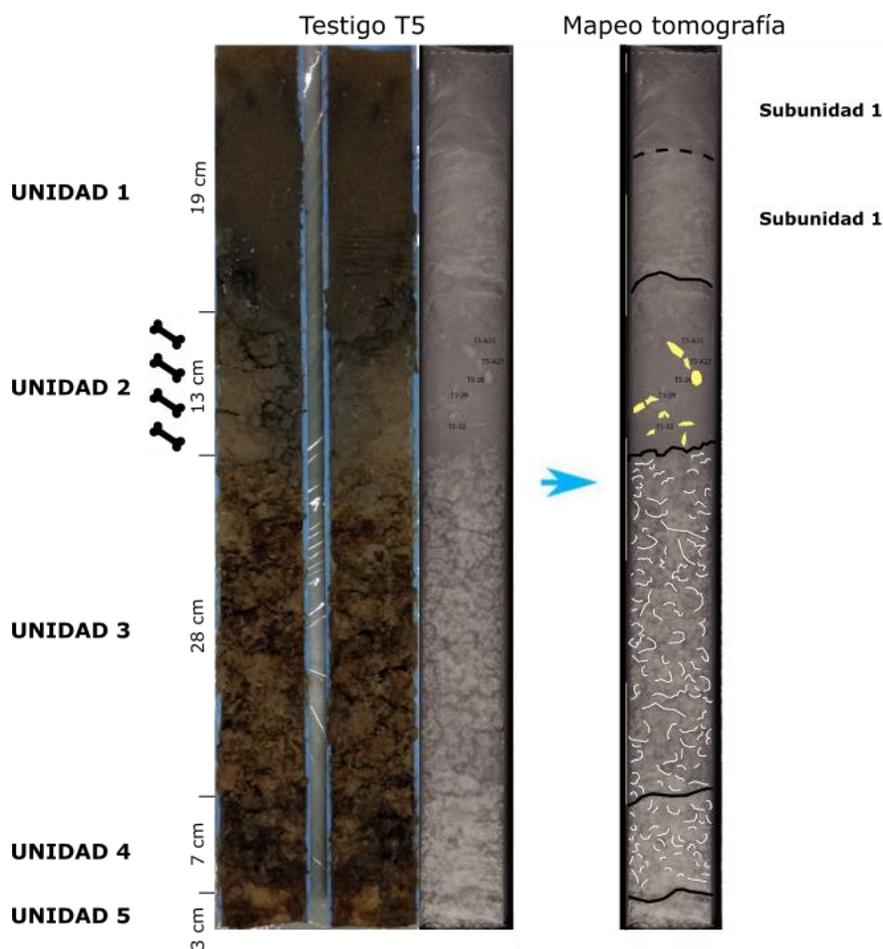


Figura 30. Mapeo estratigráfico de la tomografía del Testigo T5. Las líneas negras continuas indican los límites de las unidades. La línea negra punteada delimita las 2 subunidades dentro de la Unidad 1. Las figuras amarillas corresponden a algunos de los huesos encontrados en la Unidad 2 y las líneas blancas señalan algunas estructuras internas (aglomerados) de la unidad 3. Elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto al análisis granulométrico del testigo T5, se obtuvieron gráficos con las modas presentes y sus frecuencias para cada cm del testigo. Solo se tomaron en cuenta las modas presentes en cada cm del testigo para tener una idea de la predominancia de tamaños a lo largo de este, y así poder definir mejor las unidades y subunidades presentes. Las modas corresponden a: arcilla, limo fino, limo medio, arena fina y arena media. En la Figura 31 se muestra un gráfico que contiene los porcentajes de cada una de las modas a lo largo del testigo T5, donde el primer cm indica el techo del testigo y el cm 70 indica su base.

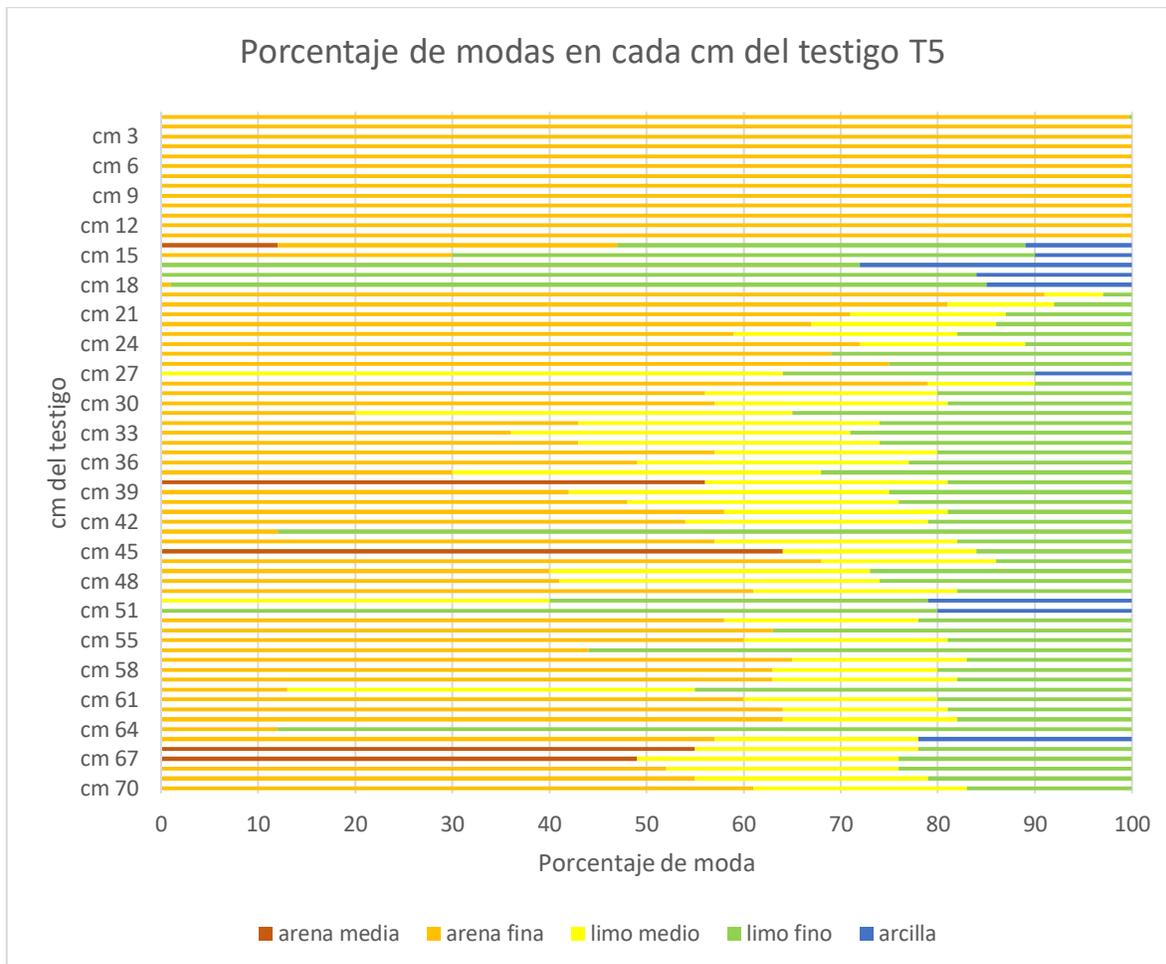


Figura 31. Gráfico que muestra el porcentaje de cada moda presente en cada cm del testigo T5. Elaboración propia.

De acuerdo al gráfico de la Figura 31, se puede observar la presencia de 3 tramos diferentes, bastante marcados. Los primeros 13 cm se caracterizan por presentar una sola moda de tamaño arena fina. Desde el cm 14 al 18 el tamaño de grano es menor, con 2 modas presentes, una de arcilla y otra de limo fino. Finalmente, desde el cm 19 al 70 se pueden notar 3 modas marcadas: limo fino, limo medio y arena fina, además de algunas zonas de transición donde el tamaño de grano disminuye a arcilla y otras donde aumenta a arena media.

A continuación, se presentan gráficos que muestran la granulometría de cada uno de los tramos antes descritos. Estos contienen la información de las frecuencias de todos los tamaños de grano presentes en cada cm del testigo T5, no solo de las modas antes mencionadas.

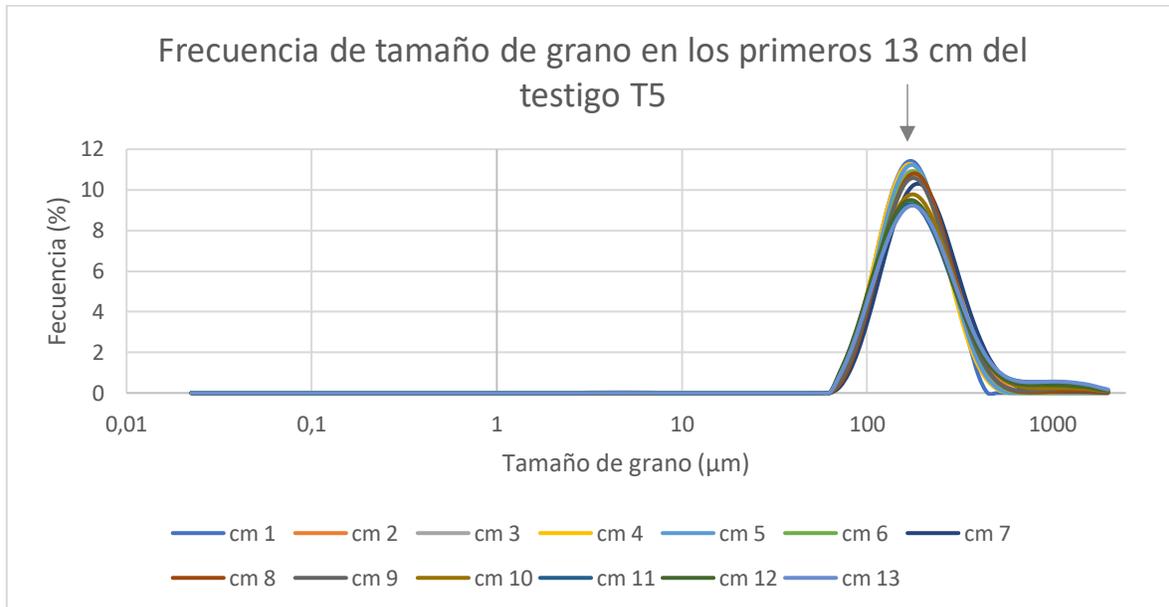


Figura 32. Gráfico de frecuencias de cada tamaño de grano presentes en el primer tramo del testigo T5 (primeros 13 cm). La flecha indica la única moda presente. Elaboración propia.

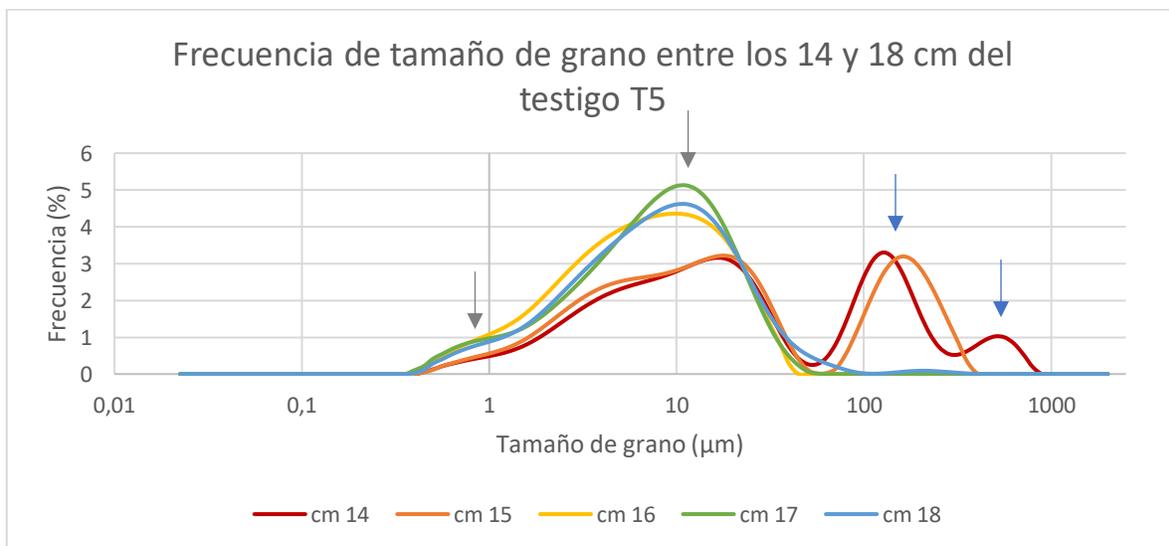


Figura 33. Gráfico de frecuencias de cada tamaño de grano presentes en el segundo tramo del testigo T5 (desde el cm 14 al 18). Las flechas grises corresponden a las modas más destacables y las azules a modas presentes solo en algunos cm del testigo T5. Elaboración propia.

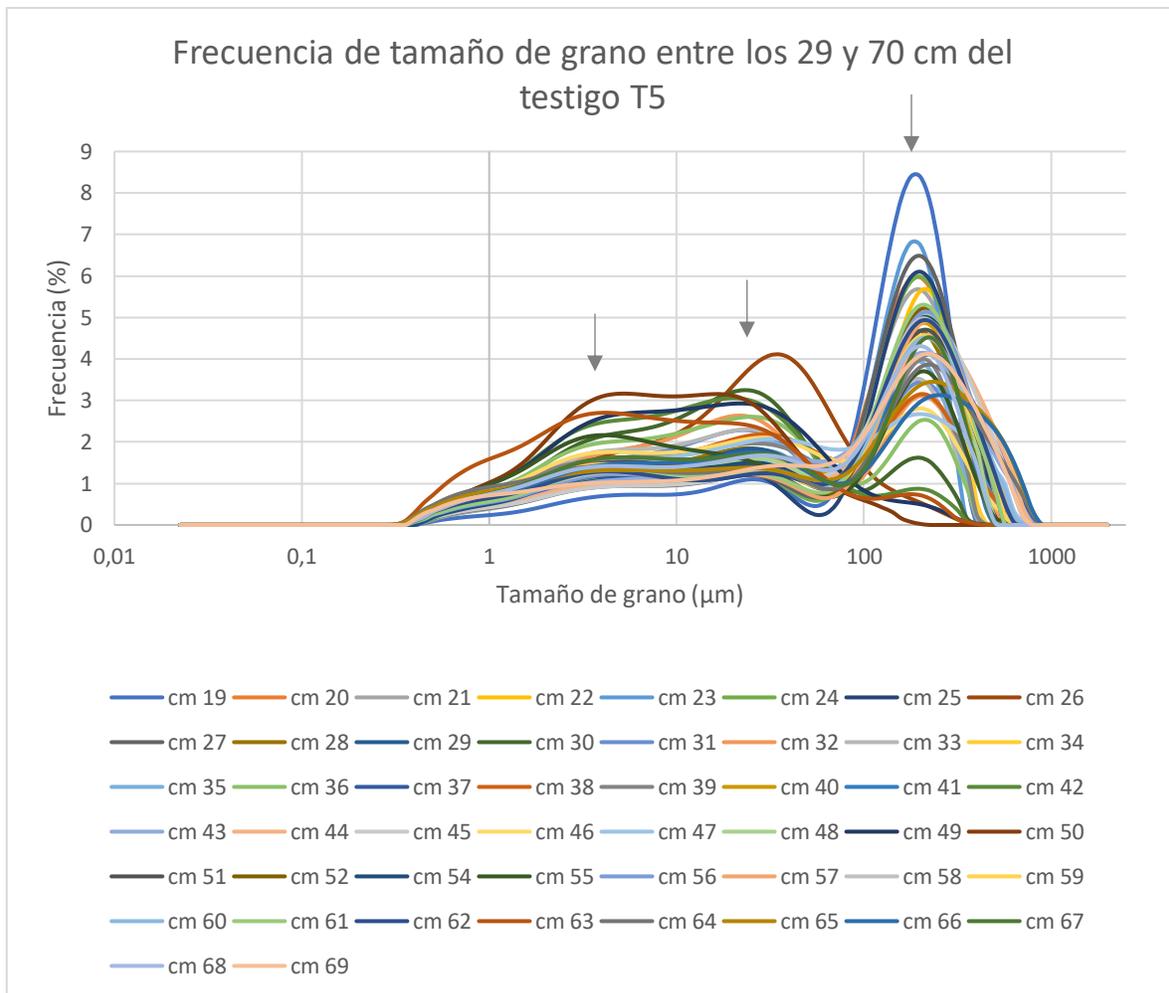


Figura 34. Gráfico de frecuencias de cada tamaño de grano presentes en el tercer tramo del testigo T5 (desde el cm 19 al 70). Las flechas indican las modas. Elaboración propia.

En la figura 32 se puede apreciar que todas las muestras coinciden bastante, presentando un solo peak a los $\sim 130 \mu\text{m}$, que corresponde a arena fina y coincide con la moda presente en el primer tramo del testigo T5. La Figura 33 es menos homogénea. Se puede notar que todas las muestras tienen 2 peaks, marcados con flechas grises, uno menor a $1 \mu\text{m}$ (arcilla) y otro alrededor de los $10 \mu\text{m}$ (limo fino), que corresponden a las modas presentes en el segundo tramo. Además, 2 muestras presentan un peak a los $\sim 130 \mu\text{m}$ (arena fina) y solo una muestra presenta un peak a los $\sim 500 \mu\text{m}$ (arena media), estos últimos marcados en azul. Por último, en la Figura 34 se puede observar que en general las muestras siguen un patrón bastante similar y se pueden notar 3 peaks, uno a los $\sim 5 \mu\text{m}$ (limo fino), otro a los $\sim 14 \mu\text{m}$ (limo medio) y el último a los $\sim 130 \mu\text{m}$ (arena fina), que corresponden a las modas presentes en el tercer tramo del testigo T5.

5.2. Sonar de barrido lateral y perfilador sísmico

5.2.1. Transectas definitivas

En las Figuras 35 y 36 se pueden observar las transectas definitivas recorridas en la primera y segunda campaña de terreno respectivamente. Las transectas propuestas originalmente (Figuras 18 y 19) se modificaron levemente debido a la presencia de algunas boyas, embarcaciones y a que el fondo no era lo suficientemente profundo como para recorrer ese lugar exacto. Además, se agregó una transecta en cada caso.

En la primera campaña de terreno se enumeraron las transectas, desde sur a norte, de L1 a L7 y se agregó una transecta (L3) que pasa justo por encima del sitio GNLQ1 para obtener una buena caracterización de este. También se agregó una transecta paralela a la línea de costa que cortaba a todas las demás, en la cota de los 5 m de profundidad aproximadamente. Sin embargo, esta última fue desechada ya que las imágenes obtenidas tenían muy mala resolución y no se podía distinguir el fondo ni sus estructuras de buena manera, por lo que no aparece en la Figura 35. La mala resolución de las imágenes probablemente se debía a que la profundidad del sonar en esa transecta era muy somera. Otra posibilidad es que la orientación de la transecta no permitiera ver las estructuras en profundidad.

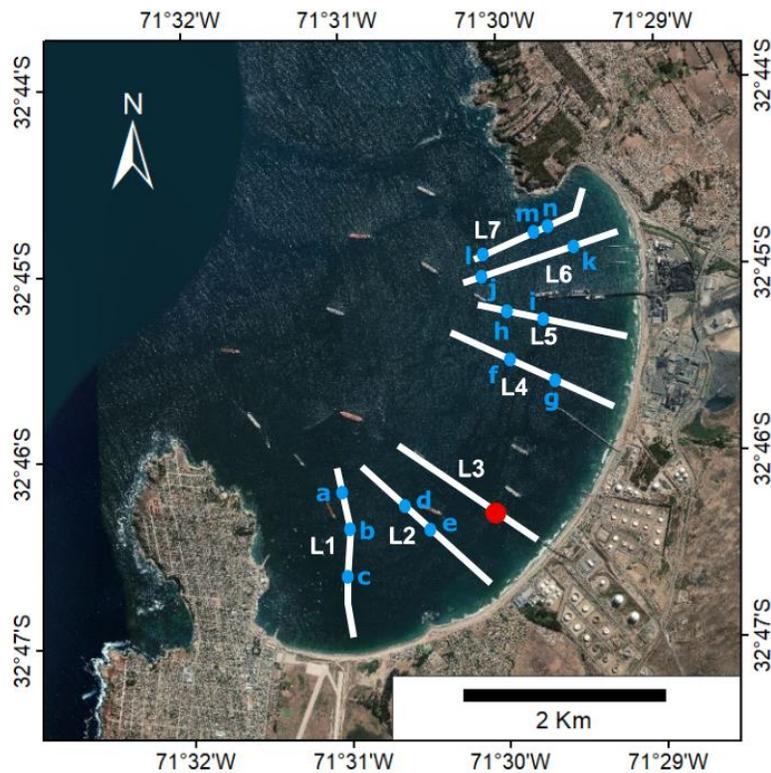


Figura 35. Las líneas blancas representan las transectas recorridas por el sonar de barrido lateral, nombradas de L1 a L7. El punto rojo representa la ubicación del sitio GNLQ1. Los puntos azules corresponden a las ubicaciones aproximadas de las imágenes de las estructuras más representativas encontradas a lo largo de cada transecta (las que se detallan en las Figuras 37 a 42). Imagen satelital Landsat. Escala 1:40.000. Elaboración propia.

En la segunda campaña de terreno se agregó una transecta (B5) paralela a la costa sobre la cota ~8-10 m de profundidad, ya que al pasar con el SBP por esa zona se notó la presencia de un estrato bastante marcado a lo largo de toda la bahía. Además, se dividió la grilla en 9 transectas separadas para facilitar el análisis de cada una. Las transectas perpendiculares a la orilla se enumeraron de A1 a A4, mientras que las paralelas a la orilla se enumeraron de B1 a B5.

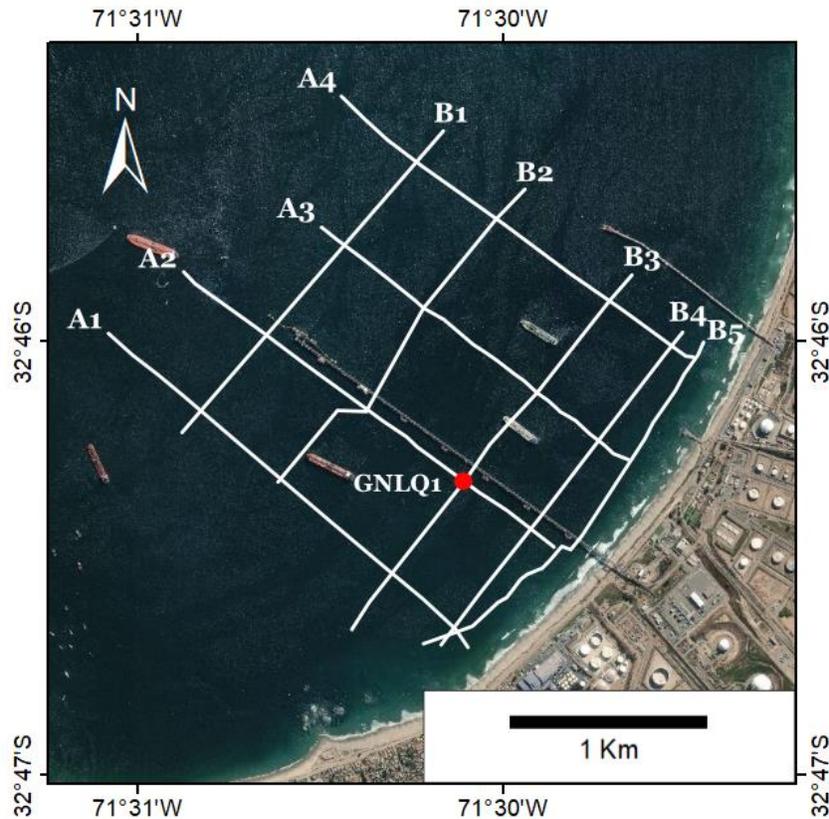


Figura 36. Las líneas blancas representan las transectas recorridas por el SBP durante la segunda campaña de terreno. El punto rojo representa la ubicación del sitio GNLQ1. Imagen satelital Landsat. Escala 1:25.000. Elaboración propia.

Todas las transectas perpendiculares a la orilla, tanto las recorridas con el sonar de barrido lateral (L1-L7) como las recorridas con el SBP (B1-B5), se ubican entre las cotas ~5 a ~30 m de profundidad.

5.2.2. Sonar de barrido lateral

A continuación, se describen las estructuras y características presentes a lo largo de cada una de las transectas recorridas con el sonar de barrido lateral (Figura 35), junto con imágenes de las más representativas, sus coordenadas y profundidad aproximadas.

Transecta L1:

A lo largo de la transecta L1 se observaron algunas estructuras sedimentarias como óndulas de diversos tamaños, con longitudes de onda entre 2.5 y 5 m. La orientación de sus crestas es NW-SE. Estas se encuentran tanto en zonas cercanas a la orilla (~7-10 m de profundidad) como en zonas más profundas (~25 m de profundidad). Además, se pudo identificar un gran afloramiento rocoso con dimensiones mínimas de 80 m de ancho y 110 m de largo aproximadamente. Su altura máxima se estima en unos 1.7 m y se encuentra a ~18 m de profundidad. En algunos sectores se observó también la presencia de rocas dispersas de menor tamaño, de hasta unos 0.5 m de altura.

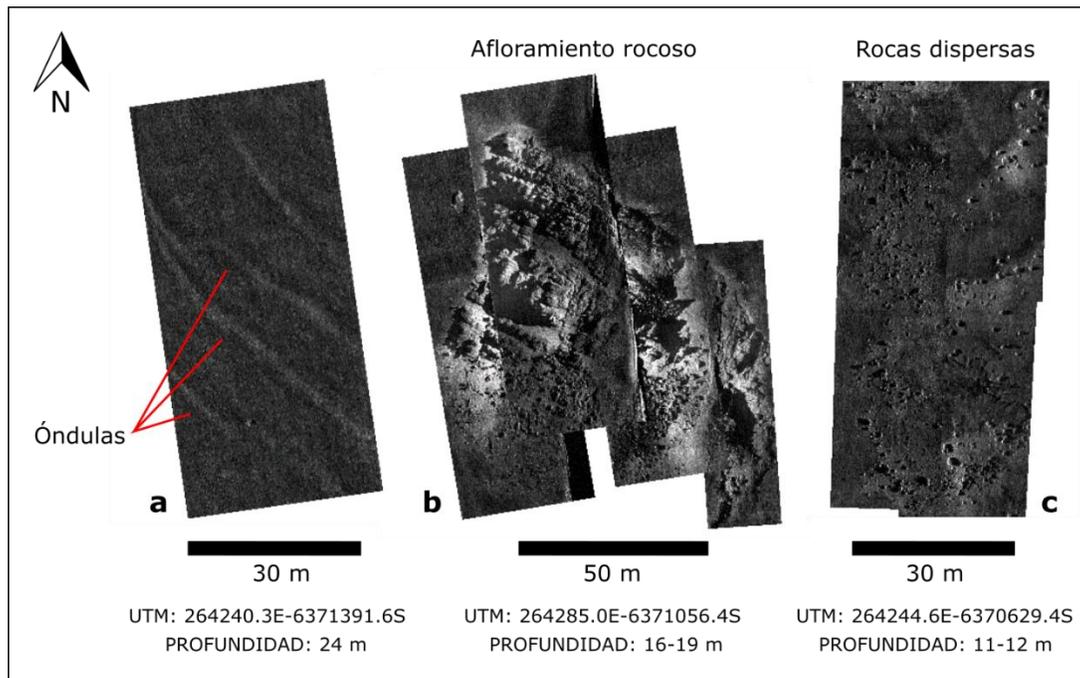


Figura 37. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L1.

Transecta L2:

A lo largo de la transecta L2 se pudieron observar estructuras sedimentarias como ondulitas en 2 zonas principalmente, alrededor de los 13 y 26 m profundidad. Sus longitudes de onda varían entre 0.3-0.7 m y sus crestas tienen orientación NW-SE y casi N-S en algunos sectores. También se encontraron un par de afloramientos rocosos, uno cercano a la orilla, a alrededor de 6 m de profundidad y otro más alejado, a unos 16 m de profundidad. Este último tiene una dimensión de 17 m de largo y 13 m de ancho aproximadamente y su altura máxima se estima en 1.3 m. Además, se observaron algunas rocas pequeñas, cercanas a los afloramientos mencionados anteriormente, de unos 0.3 hasta 2 m de altura aproximadamente.

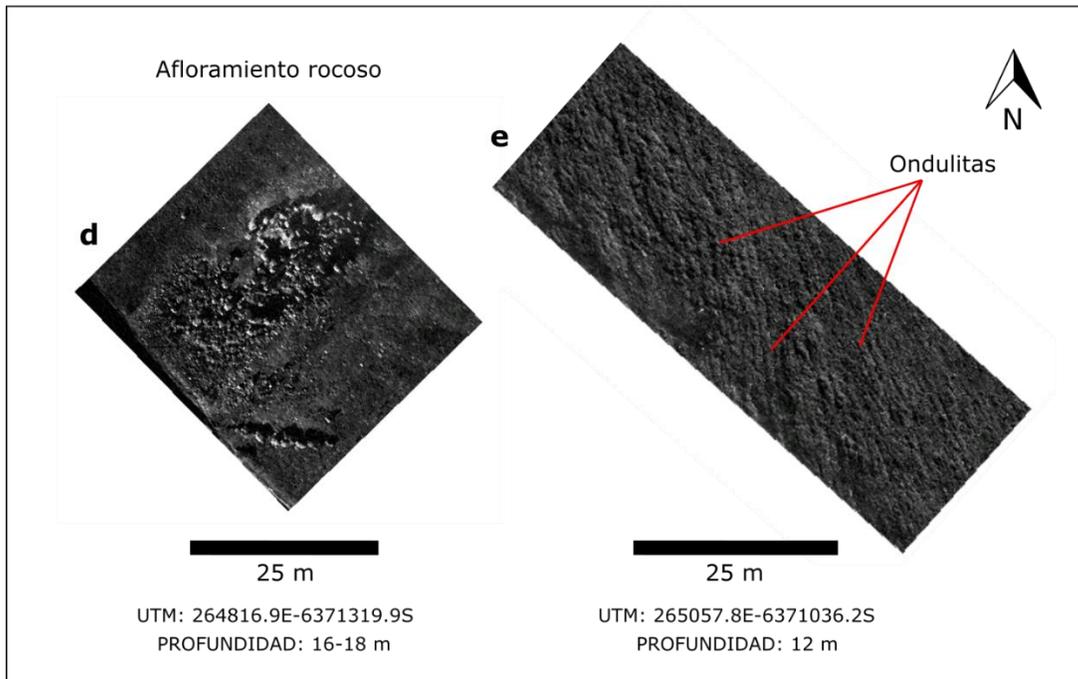


Figura 38. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L2.

Transecta L3:

Se recorrió la transecta L3, que es la que pasa justo sobre el sitio GNLQ-1, pero no se observaron estructuras ni afloramientos de interés, solo algunas rocas dispersas a los 10-13 y 20 m de profundidad aproximadamente, de entre 1 y 2.5 m de largo y ~0.3 m de altura.

Transecta L4:

Al recorrer la transecta L4 se encontraron estructuras sedimentarias como ondulitas en el sector más profundo (~19-27 m de profundidad) y óndulas en un área más cercana a la orilla (~13-17 m de profundidad) con una orientación de sus crestas NW-SE en general, aunque en algunos sectores es difícil interpretar una orientación preferencial para las ondulitas. La longitud de onda de las ondulitas es de ~0.4 m mientras que la de las óndulas varía entre 1-3 m. Por otro lado, se observaron algunas rocas dispersas de hasta ~1 m de altura a los 17 m de profundidad aproximadamente.

Transecta L5:

A lo largo de toda la transecta L5 se encontraron estructuras sedimentarias como ondulitas con longitudes de onda variables entre 0.2 y 0.5 m y algunas óndulas con longitudes de onda entre 0.6 y 1.7 m. Las ondulitas abarcan pequeñas áreas acotadas y pueden encontrarse a lo largo de casi toda la transecta, entre los 13 y 21 m de profundidad aproximadamente, mientras que las óndulas se ubican solo en zonas un poco más profundas (20-22 m de profundidad). En cuanto a la orientación de sus crestas, la de las ondulitas es casi NS, en cambio la de las óndulas es variable

entre NW-SE, casi EW, NE-SW y en algunas zonas se curvan. Además, se observaron algunas rocas en la parte central de la transecta, a ~18 m de profundidad, con alturas estimadas entre 0.4 y 1.4 m.

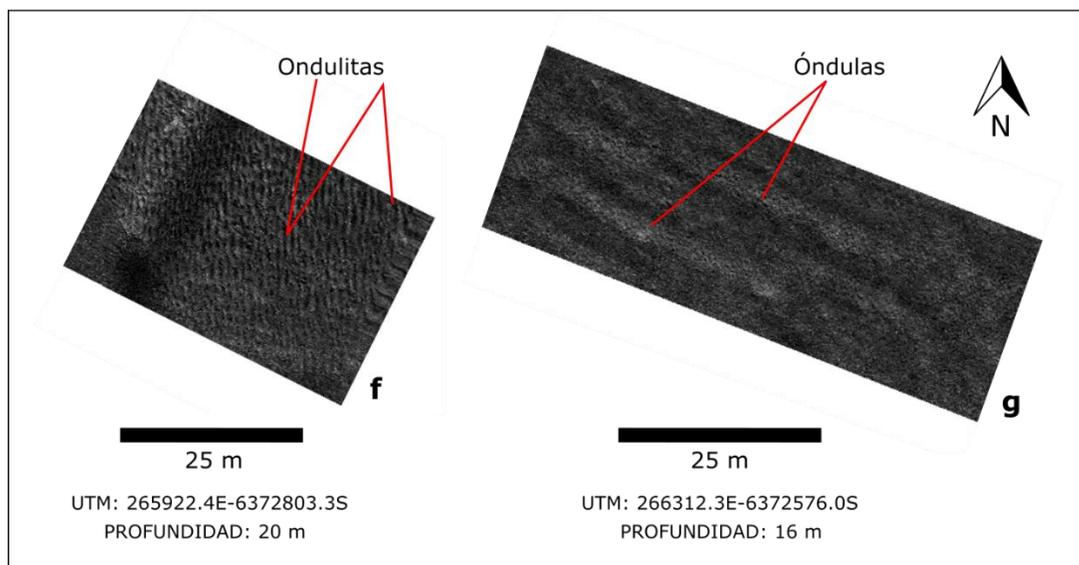


Figura 39. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L4.

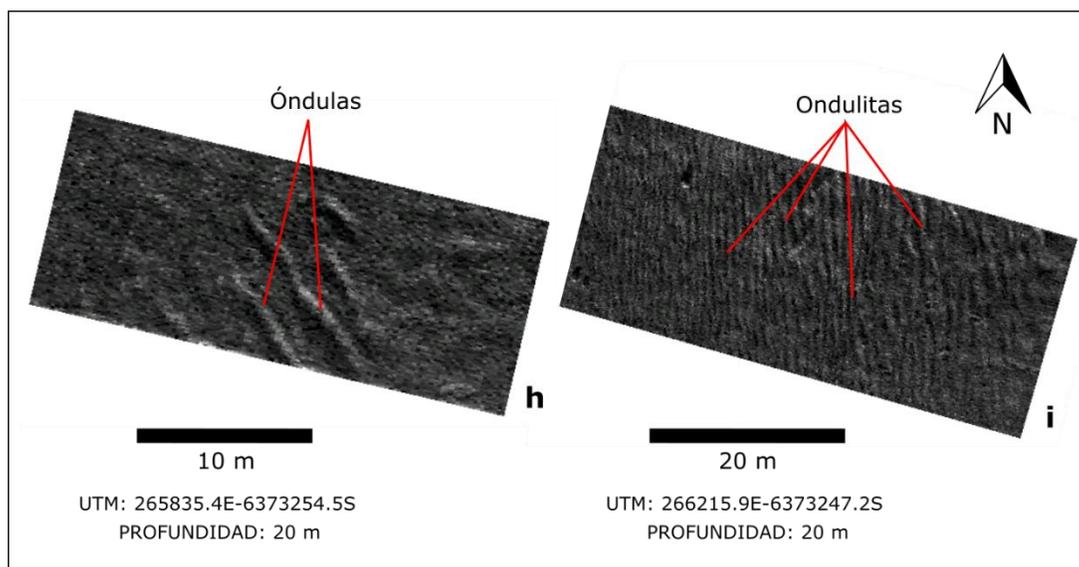


Figura 40. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L5.

Transecta L6:

Al recorrer la transecta L6 se encontraron principalmente rocas dispersas desde la orilla hasta los 20 m de profundidad aproximadamente, algunas alcanzando hasta ~1 m de altura. También se observaron algunas ondulitas en la zona central y más profunda de la transecta (entre ~17 y 27 m de profundidad). La orientación de sus crestas es casi NS con una leve inclinación NE-SW y sus longitudes de onda varían entre los 0.3 y 0.8 m.

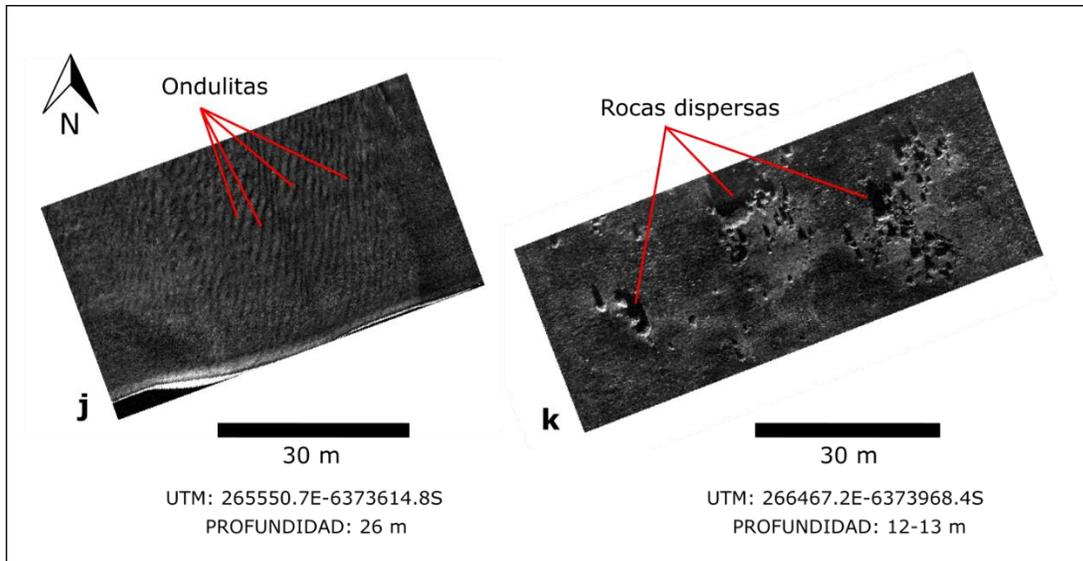


Figura 41. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L6.

Transecta L7:

A lo largo de la transecta L7 se observaron muchos afloramientos rocosos, especialmente en su parte central, cercanos a la zona más norte de la bahía. Abarcan un área mínima de 160 x 70 m aproximadamente, y se ubican entre los ~14 y 20 m de profundidad. Además, se observaron rocas más pequeñas dispersas en las cercanías de los afloramientos antes mencionados.

En cuanto a estructuras sedimentarias, se observaron ondulitas en diversas zonas de la transecta, cerca de la orilla, al centro y en áreas más profundas (a los ~10, 14 y 23 m de profundidad, respectivamente). La orientación de sus crestas es casi NS, pero con una leve inclinación variable entre NW-SE y NE-SW, y sus longitudes de onda varían entre ~0.2 y 0.5 m. También se distinguieron algunas óndulas cerca de la orilla (~14 m de profundidad) con orientación de sus crestas casi NS, con una leve inclinación NW-SE, y otras en zonas más profundas (~25 m de profundidad) con orientación NE-SW. Sus longitudes de onda varían de 1.3 a 1.5 m aproximadamente.

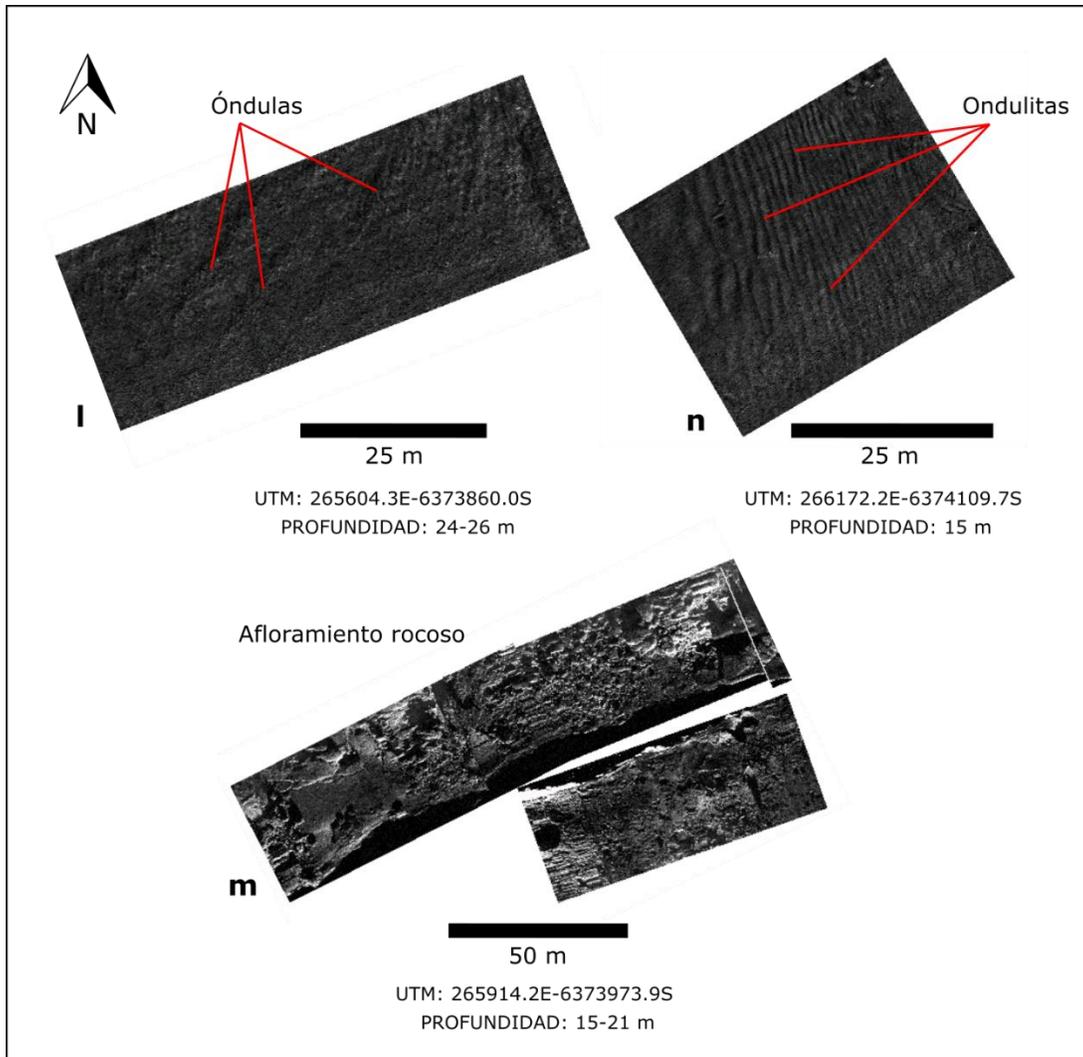


Figura 42. Estructuras observadas a lo largo de la transecta L7.

En la Figura 43 se presentan las estructuras y características antes mencionadas en un mapa de la zona de estudio, para resumir la información recopilada y facilitar la visualización con respecto a la distribución y orientación de éstas. Se puede ver que la zona sur de la bahía se caracteriza por la presencia de óndulas hacia el oeste y ondulitas más hacia el este. La orientación general de las crestas de todas estas estructuras es NW-SW y parecen estar alineadas en 2 sectores bien definidos. También se observan varios afloramientos rocosos en el área más cerrada de la bahía. En la zona central no se observaron estructuras ni afloramientos, solo algunas rocas pequeñas dispersas. En cuanto a la zona norte, esta se caracteriza por presentar óndulas y ondulitas con orientaciones bastante variables. Estas no parecen tener zonas preferentes, sino que se están dispersas desde los 10 hasta los 25 m de profundidad aproximadamente. Además, se observa la presencia de afloramientos rocosos en la punta más norte y gran cantidad de rocas dispersas de menor tamaño. La orientación de las crestas de las estructuras y la leve curvatura que presentan las óndulas en general, podrían indicar el sentido de las olas y las corrientes que las generaron.

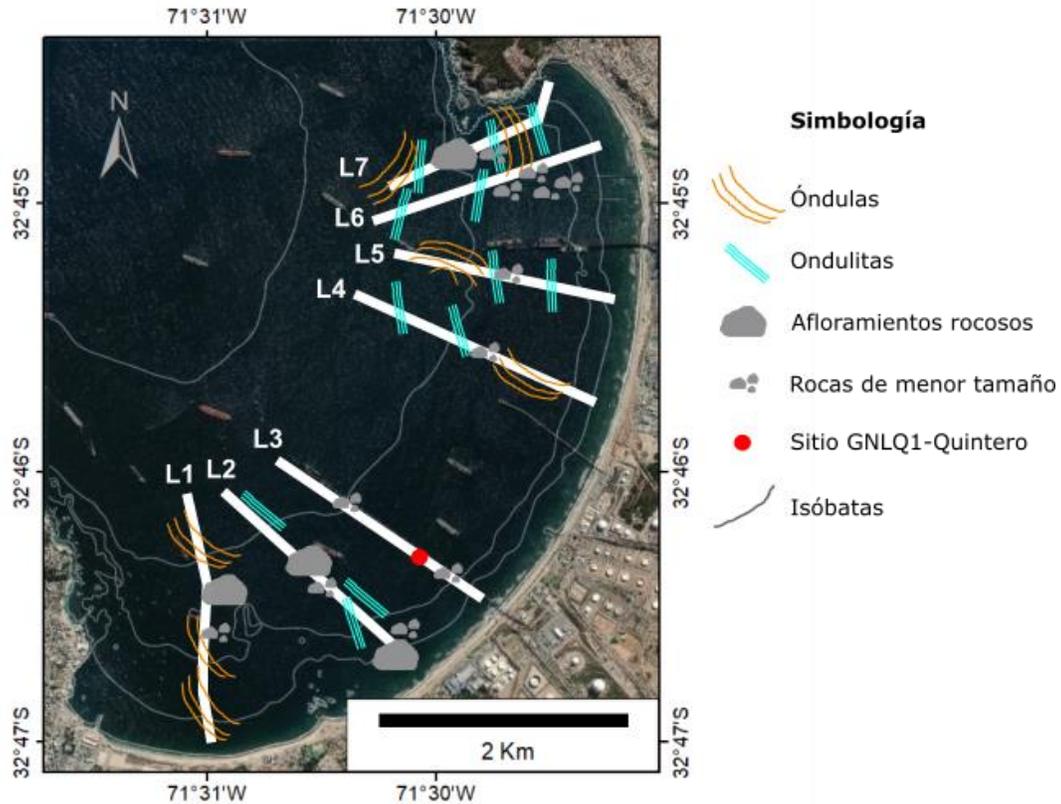


Figura 43. Mapa de la zona de estudio que muestra la ubicación aproximada de las estructuras y características antes mencionadas. Las líneas blancas representan cada una de las transectas recorridas. (Las isóbatas corresponden a los 5, 10, 20 y 50 m de profundidad respectivamente, desde la orilla hacia lo más profundo). Imagen satelital Landsat. Escala 1:35.000. Elaboración propia.

5.2.3. Perfilador sísmico (SBP)

Primero se muestran las imágenes obtenidas a gran escala de todas las transectas recorridas, divididas en 2 grupos: las perpendiculares (A1-A4) y las paralelas (B1-B5) a la línea de costa. En cada uno de los perfiles se distingue solo el relieve del fondo marino, esto para poder identificar posibles morfologías que abarquen toda la bahía o al menos gran parte de ella.

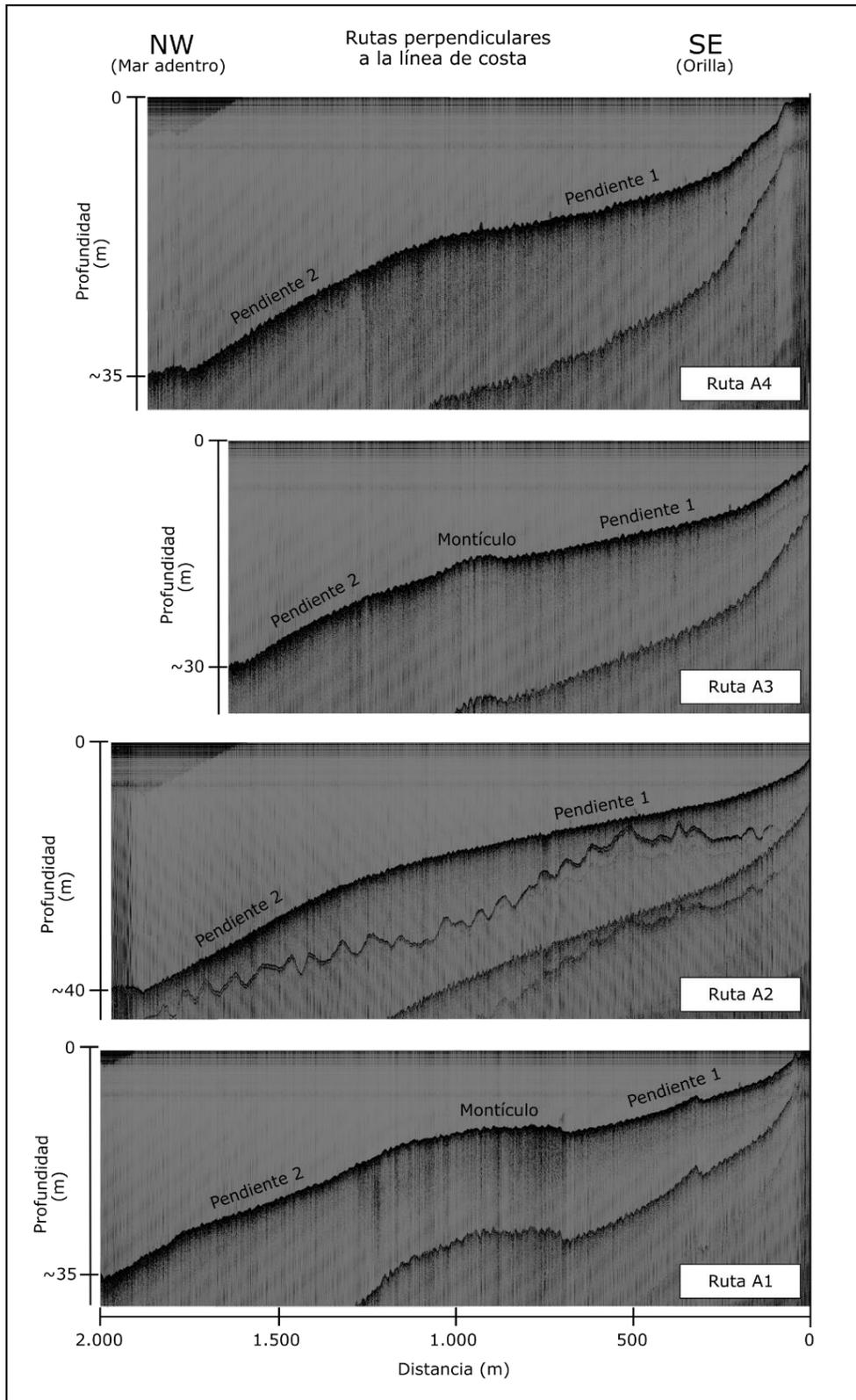


Figura 44. Perfiles del fondo marino. Transectas perpendiculares a la línea de costa (A1-A4).

Como se puede observar en la Figura 44, la característica más notoria de las transectas perpendiculares a la orilla es la aparición de 2 pendientes marcadas. El cambio de pendiente de las transectas A2 y A4 es menos pronunciado, mientras que en las transectas A1 y A3 se pueden notar ligeros montículos en las zonas donde la pendiente varía. Hay que destacar que las escalas vertical y horizontal son muy distintas (el eje horizontal es ~18 veces menor de lo que corresponde) por lo que las pendientes se ven mucho más pronunciadas de lo que realmente son.

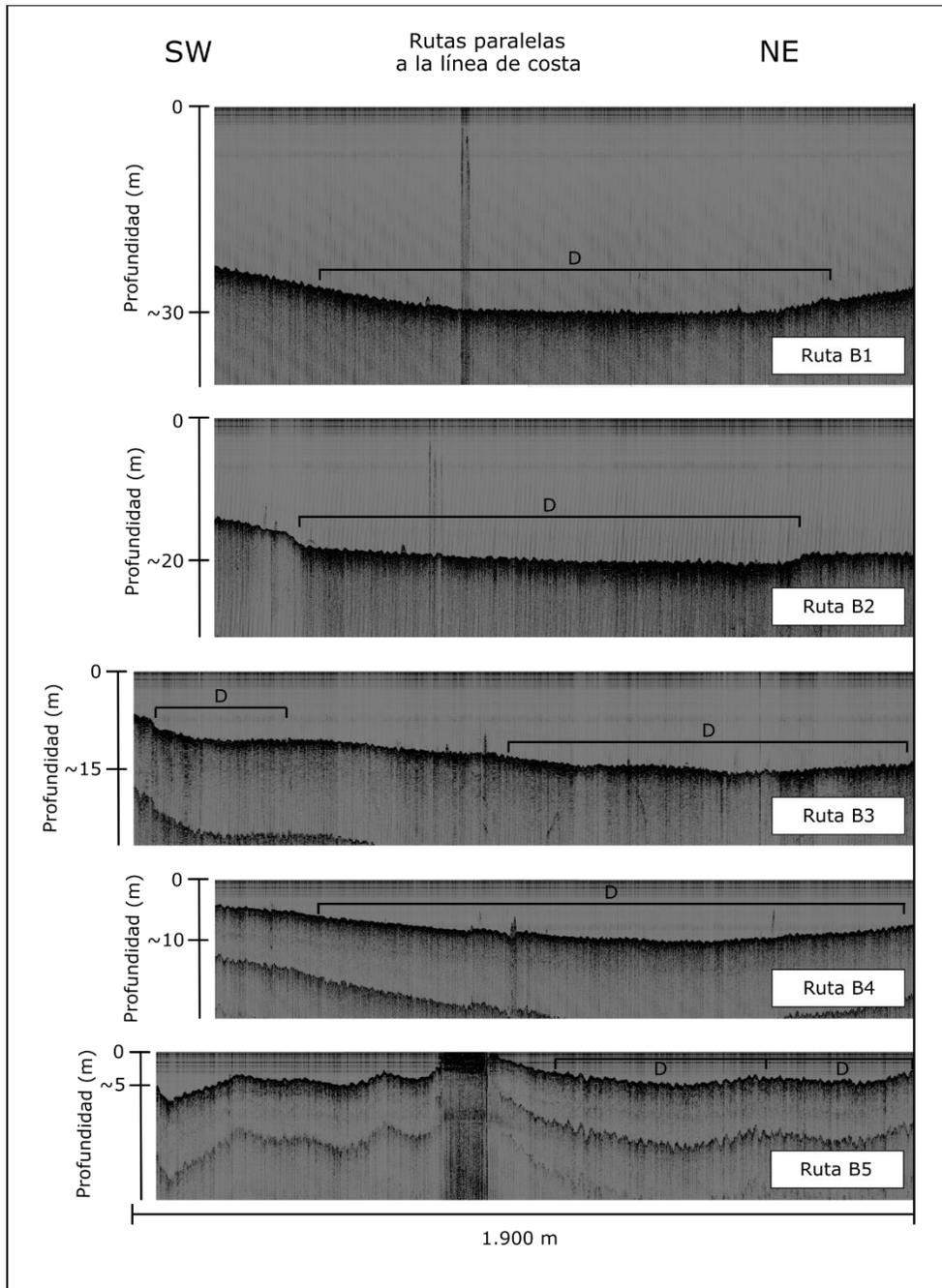


Figura 45. Perfiles del fondo marino. Transectas paralelas a la línea de costa (B1-B5). Las D indican la presencia de leves depresiones a lo largo de cada perfil.

Por otro lado, en la Figura 45 se presentan las imágenes de las transectas paralelas a la costa, donde el eje horizontal se muestra ~15 veces menor de lo que en realidad corresponde. En las transectas B1 y B2 se observa una leve depresión justo en la zona central. En la transecta B2 se pueden notar altos topográficos que la delimitan, mientras que en la transecta B1 el cambio de profundidad es gradual mediante ligeras pendientes. Cada una abarca alrededor de 1 km de distancia. El relieve de la transecta B3 es en general bastante plano, aunque logran notarse 2 leves depresiones, una más pequeña (~250 m) hacia el SW y otra más grande (~850 m) en la zona más central-NE. En la transecta B4 también se observa una leve depresión que se ubica desde la zona central hacia el NE, y abarca alrededor de 700 m de largo. Por último, la transecta B5 presenta un relieve más irregular, aunque se vuelve más plano hacia el NE, donde pueden notarse también 2 leves depresiones, con una extensión de unos 300 m cada una. Cada una de las depresiones mencionadas fue marcada con una D (Figura 45).

En cuanto a un análisis a menor escala de los perfiles, se observa que el fondo marino presenta un relieve bastante irregular y anguloso. Además, la sismoestratigrafía en todas las transectas indica la presencia de 3 reflectores en profundidad. El primero, marcado en celeste, aparece a unos 20-30 cm, el segundo, marcado en amarillo a unos 50 m y el tercero, marcado en rojo, a unos 80 cm de profundidad desde el fondo marino. Estas mediciones varían un poco a lo largo de todos los perfiles. Todos los reflectores son subhorizontales aunque ligeramente sinuosos y en algunas zonas se ven bastante angulosos, y pese a que aparecen intermitentemente, se puede apreciar cierta continuidad lateral basada en la profundidad (desde el fondo marino) a la que aparece cada uno. Todo esto se puede ver en las Figuras 46 a 54, presentadas más adelante.

Poniendo énfasis en las cercanías del sitio GNLQ1, en las transectas A2 y B3 (Figuras 47 y 52, respectivamente) se puede notar que el primer reflector aparece a una profundidad, desde el fondo marino, variable entre 20 y 30 cm, el segundo a una profundidad variable de 40 a 60 cm y el tercero a una profundidad entre 60 y 70 cm, llegando a alcanzar hasta 1 m en algunas zonas. Todos son levemente sinuosos, subparalelos al fondo y abarcan totalmente a ambos testigos.

Es necesario detallar que solo se utilizaron los datos sísmicos adquiridos durante la segunda campaña de terreno, ya que, por problemas de configuración del equipo, las imágenes obtenidas durante el primer terreno no tenían una resolución óptima, por lo que no fueron tomadas en cuenta para la identificación de posibles estratos y estructuras en la zona de estudio.

A continuación, se muestran en detalle los reflectores encontrados a lo largo de cada una de las transectas.

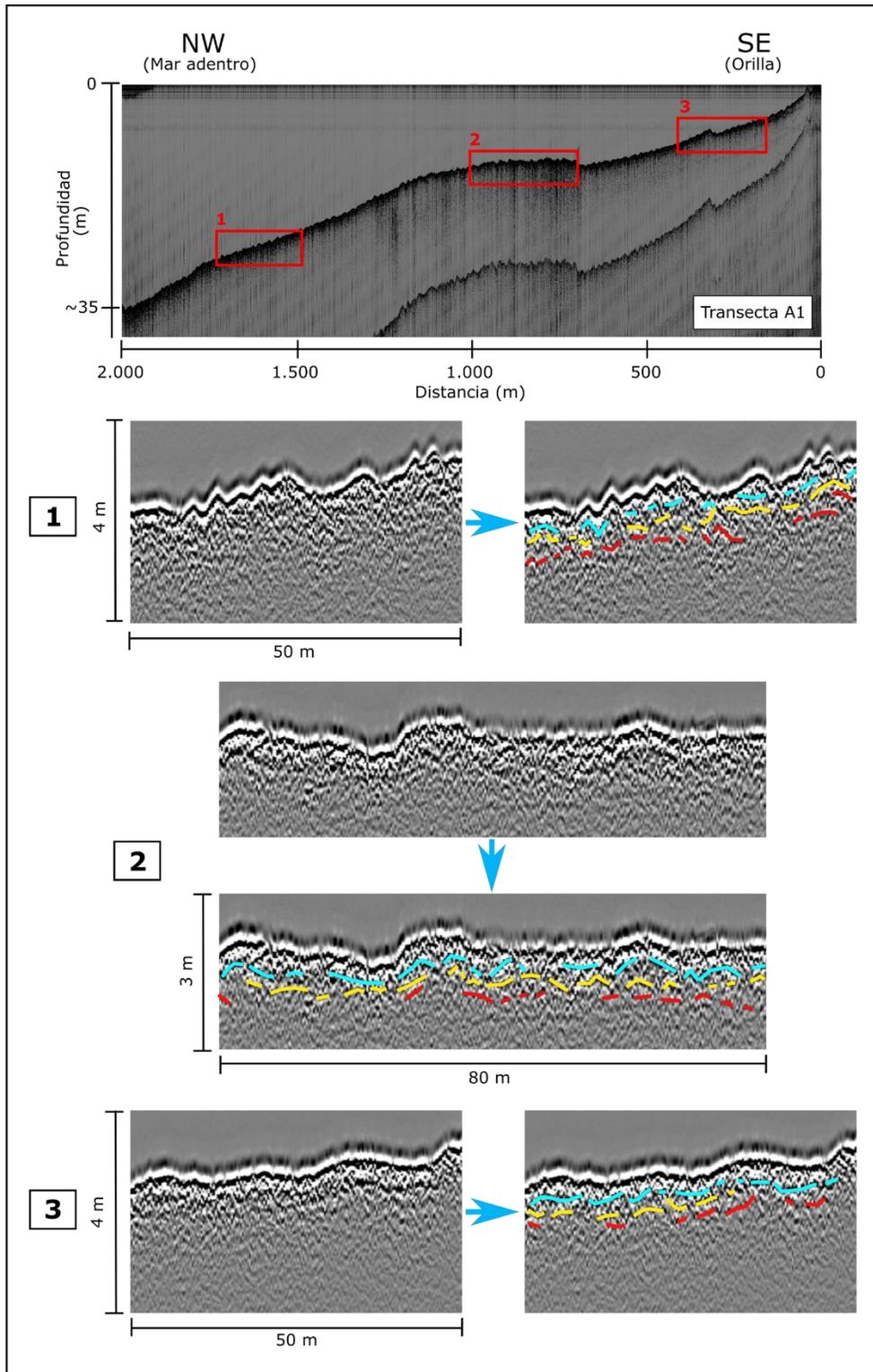


Figura 46. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A1. Los recuadros rojos representan las zonas donde se ubican. Las líneas amarillas, rojas y celestes representan los reflectores 1, 2 y 3 respectivamente.

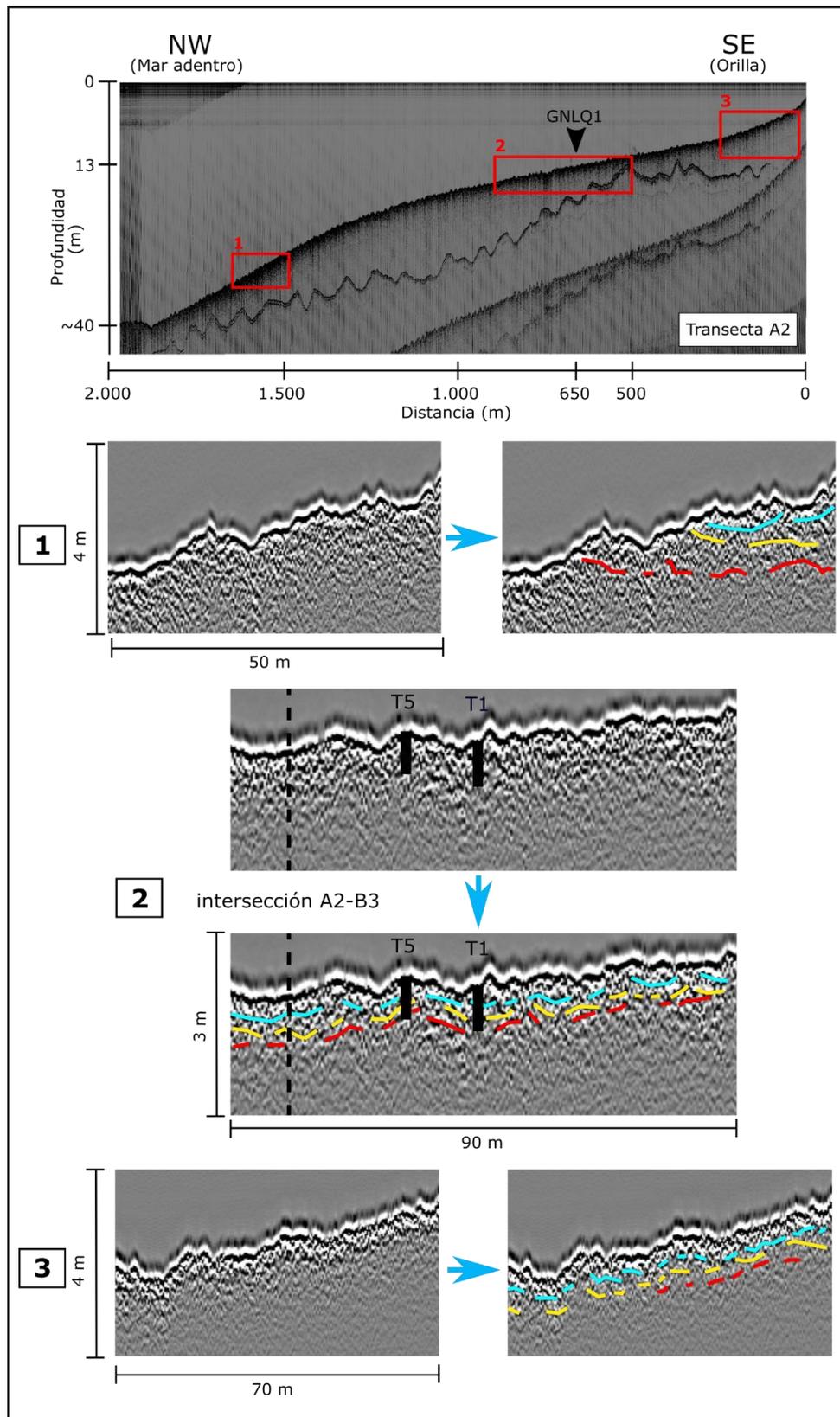


Figura 47. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A2. La flecha negra indica la ubicación aproximada del sitio de interés GNLQ1. Las marcas verticales negras representan la ubicación y longitud de los testigos T1 y T5. La línea punteada señala el lugar de intersección de la transecta A2 con la B3.

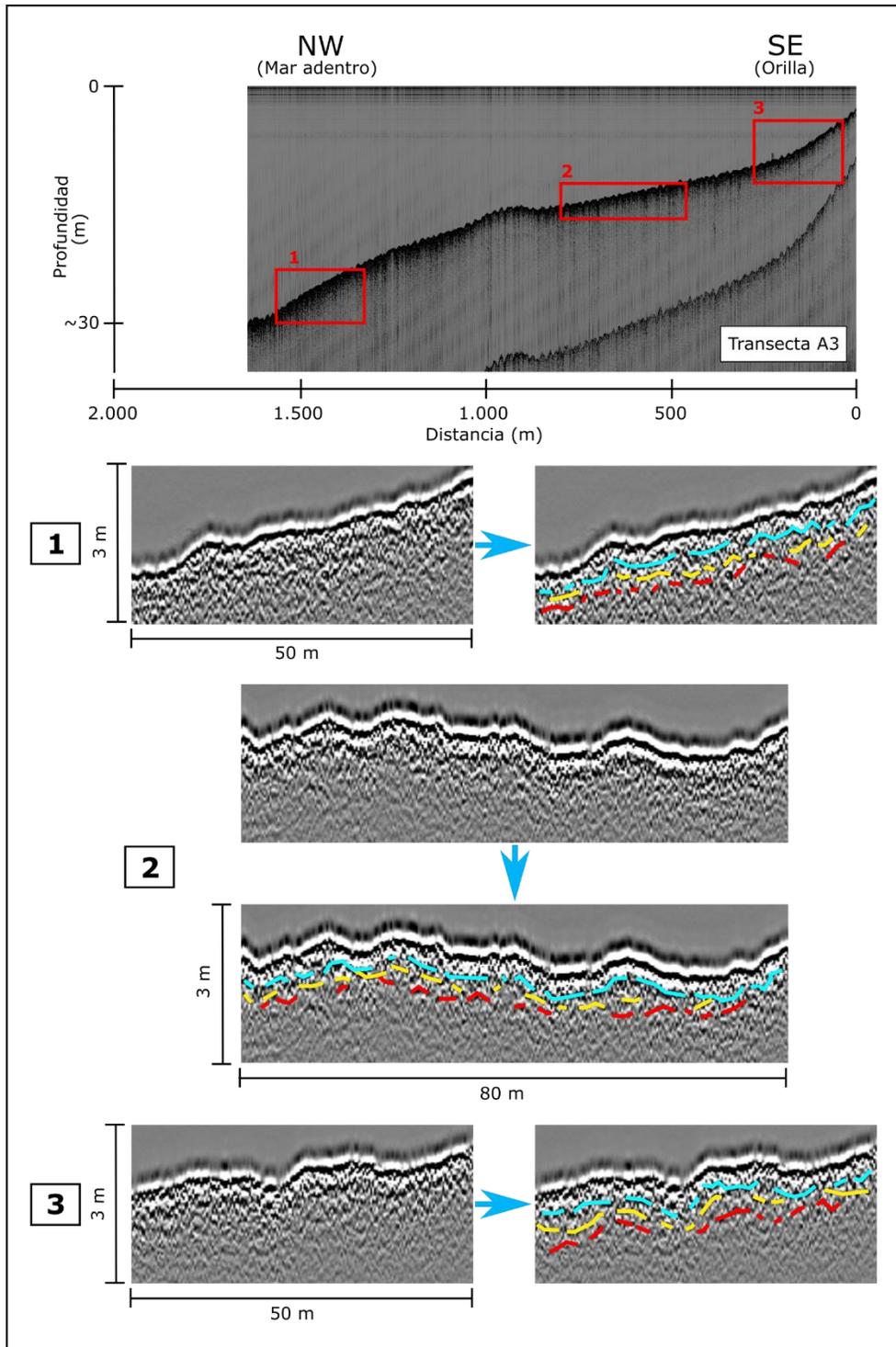


Figura 48. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A3.

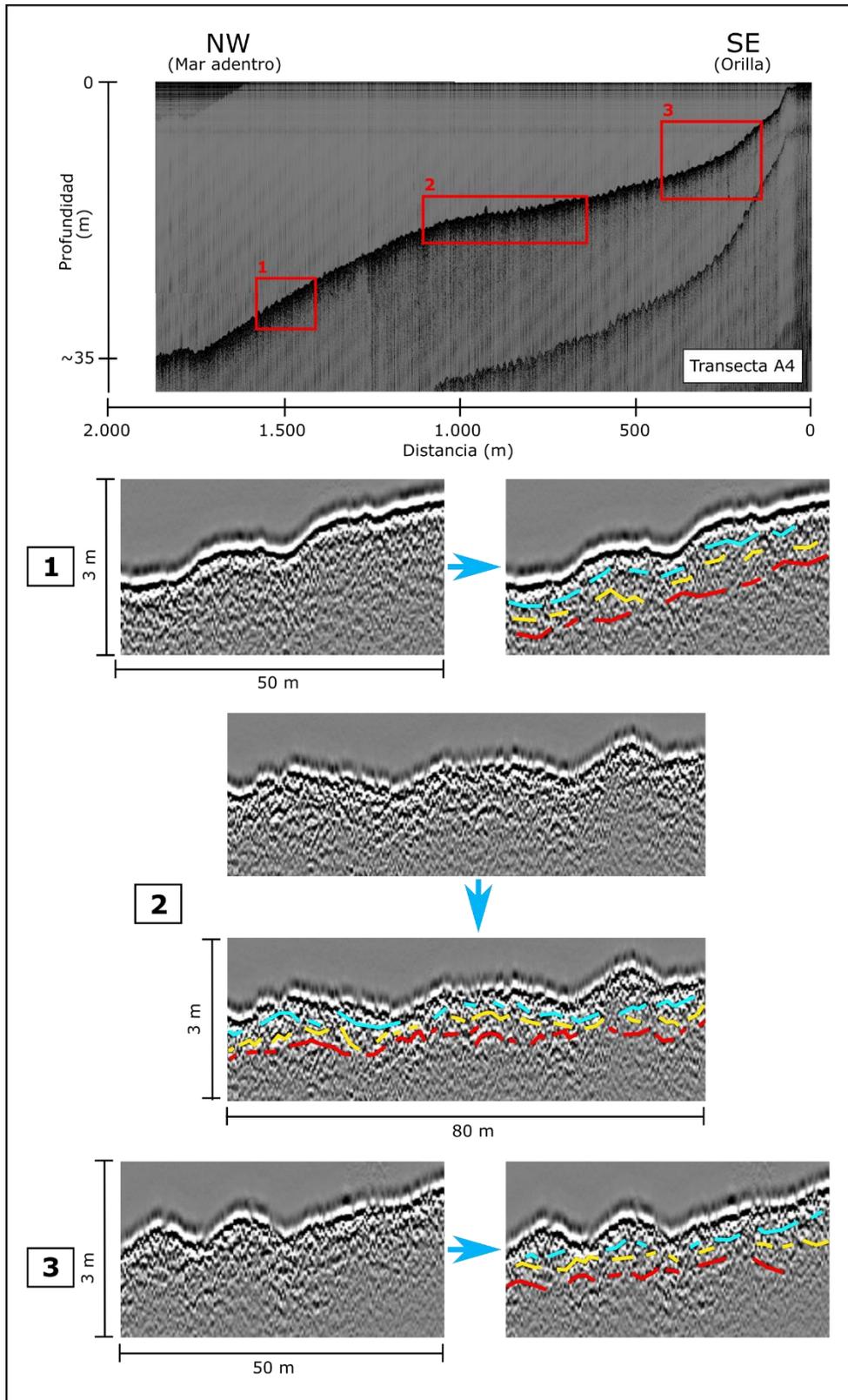


Figura 49. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta A4.

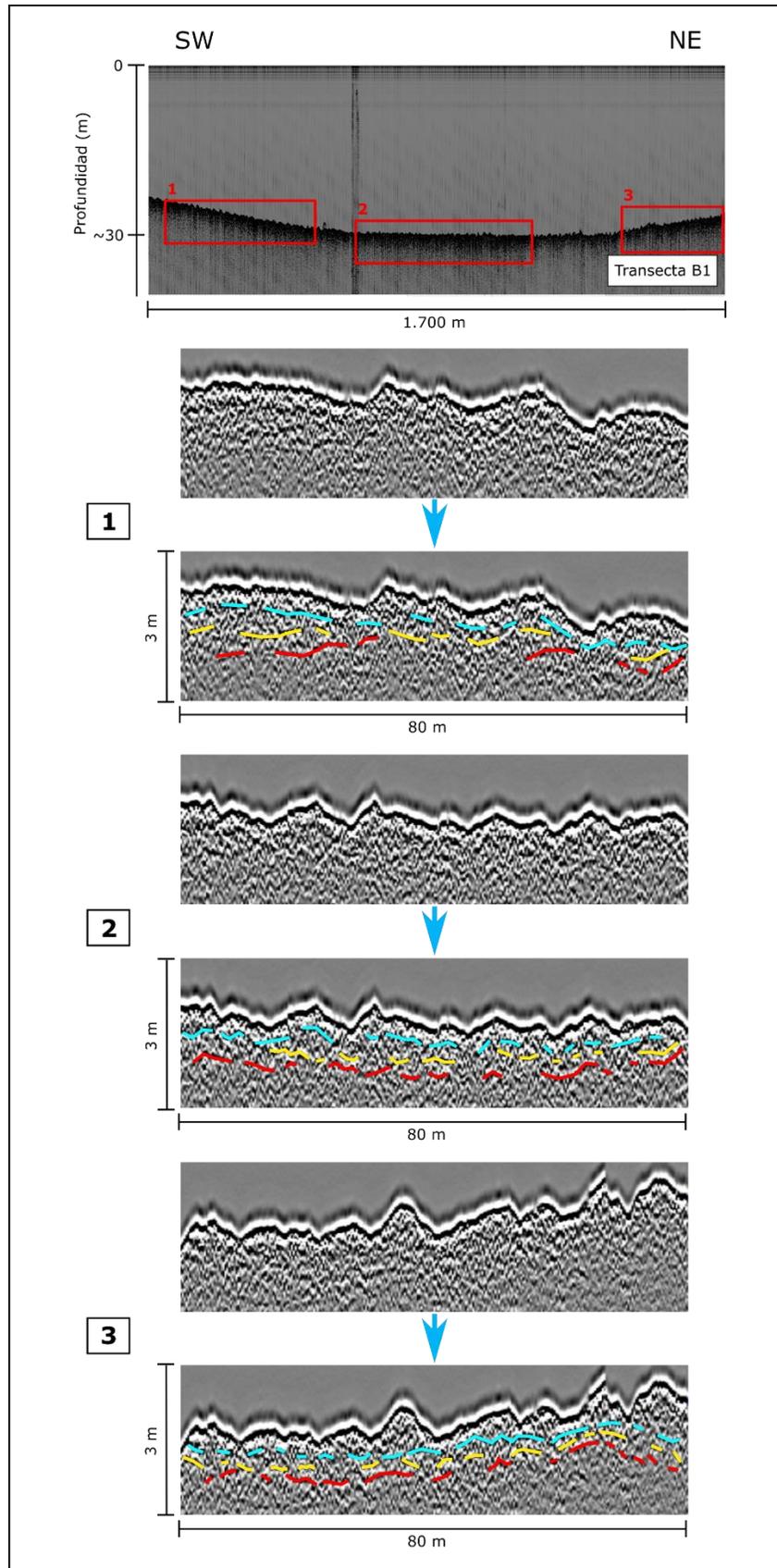


Figura 50. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B1.

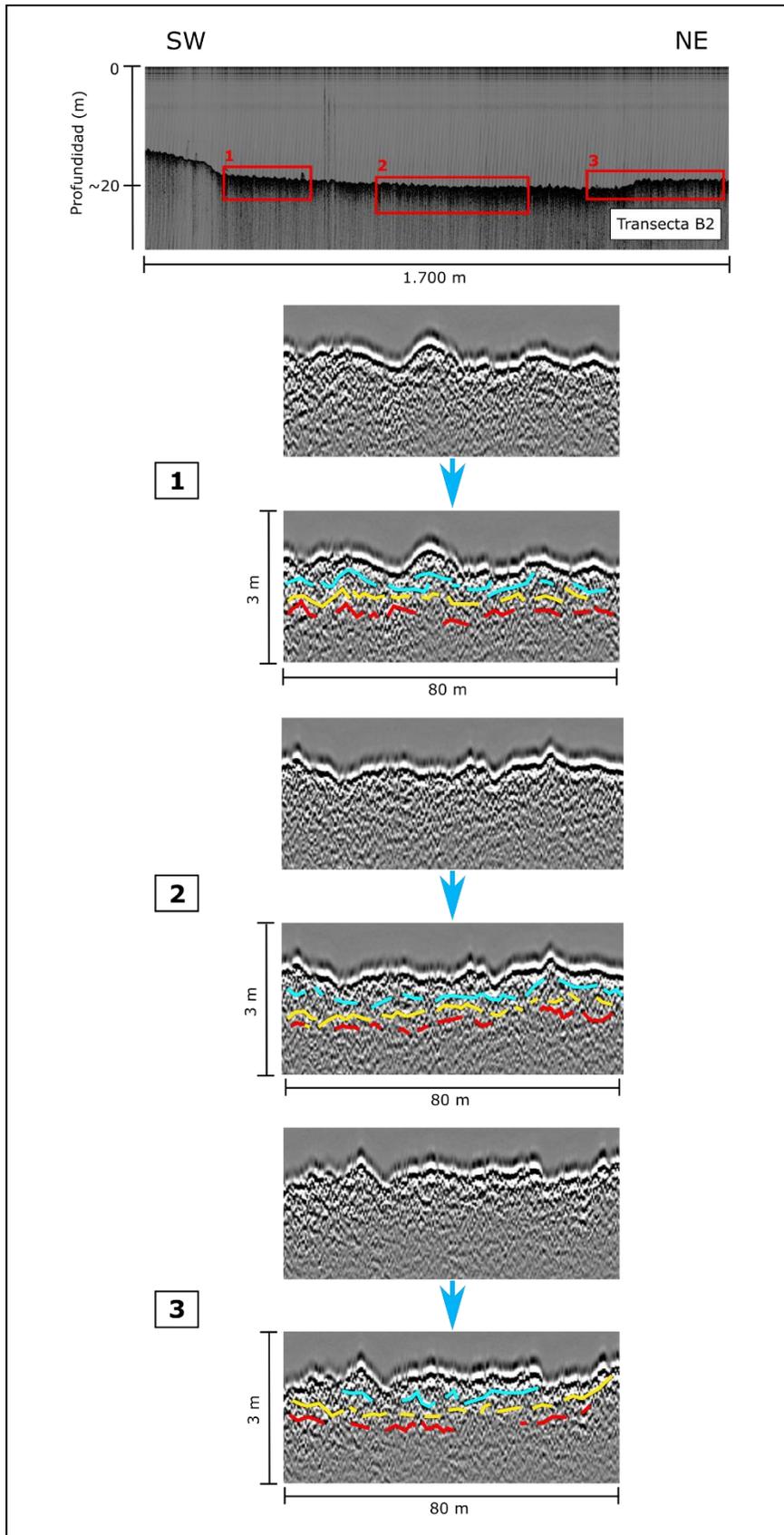


Figura 51. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B2.

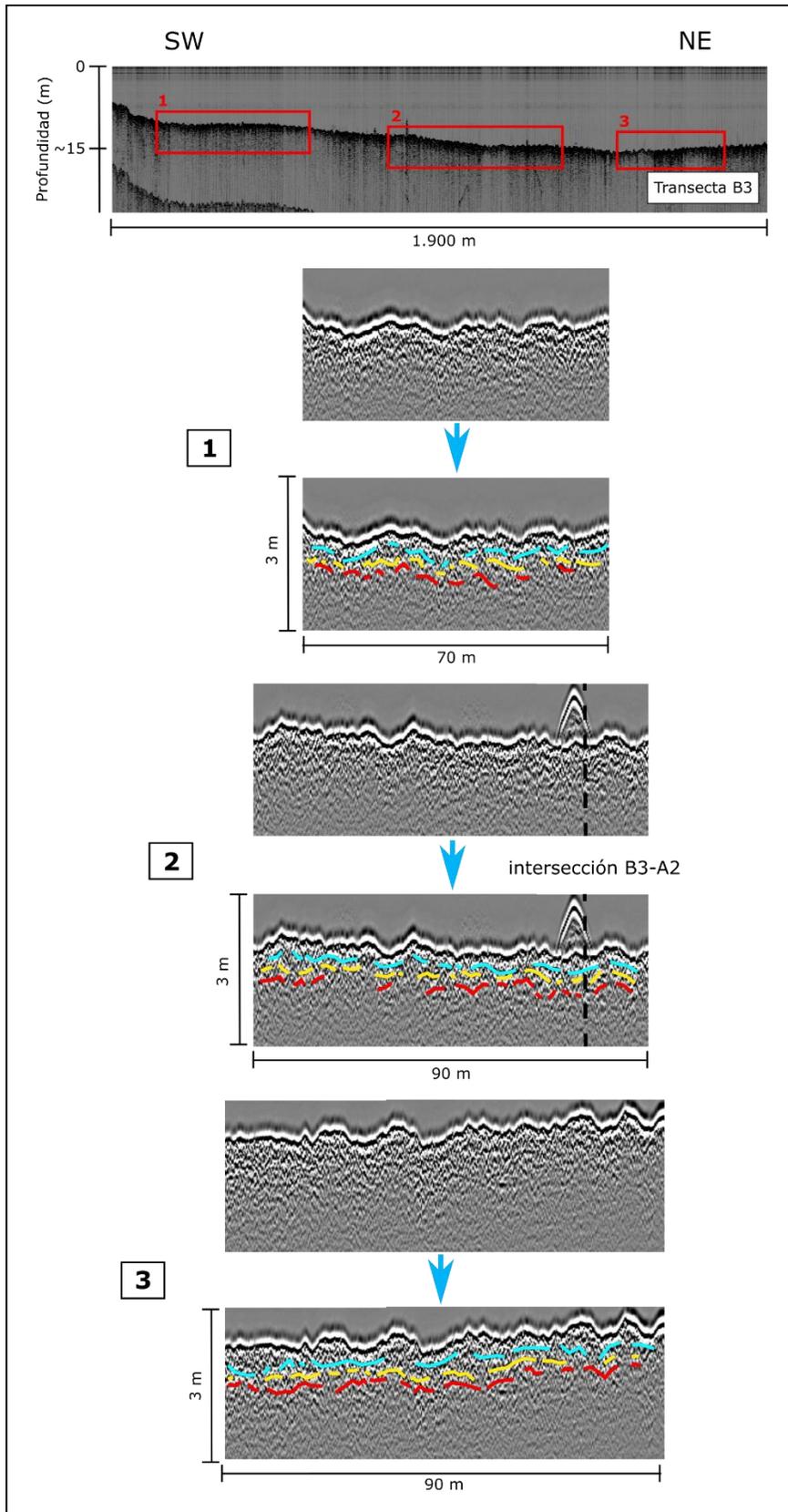


Figura 52. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B3. La línea punteada señala el lugar de intersección de la transecta B3 con la A2.

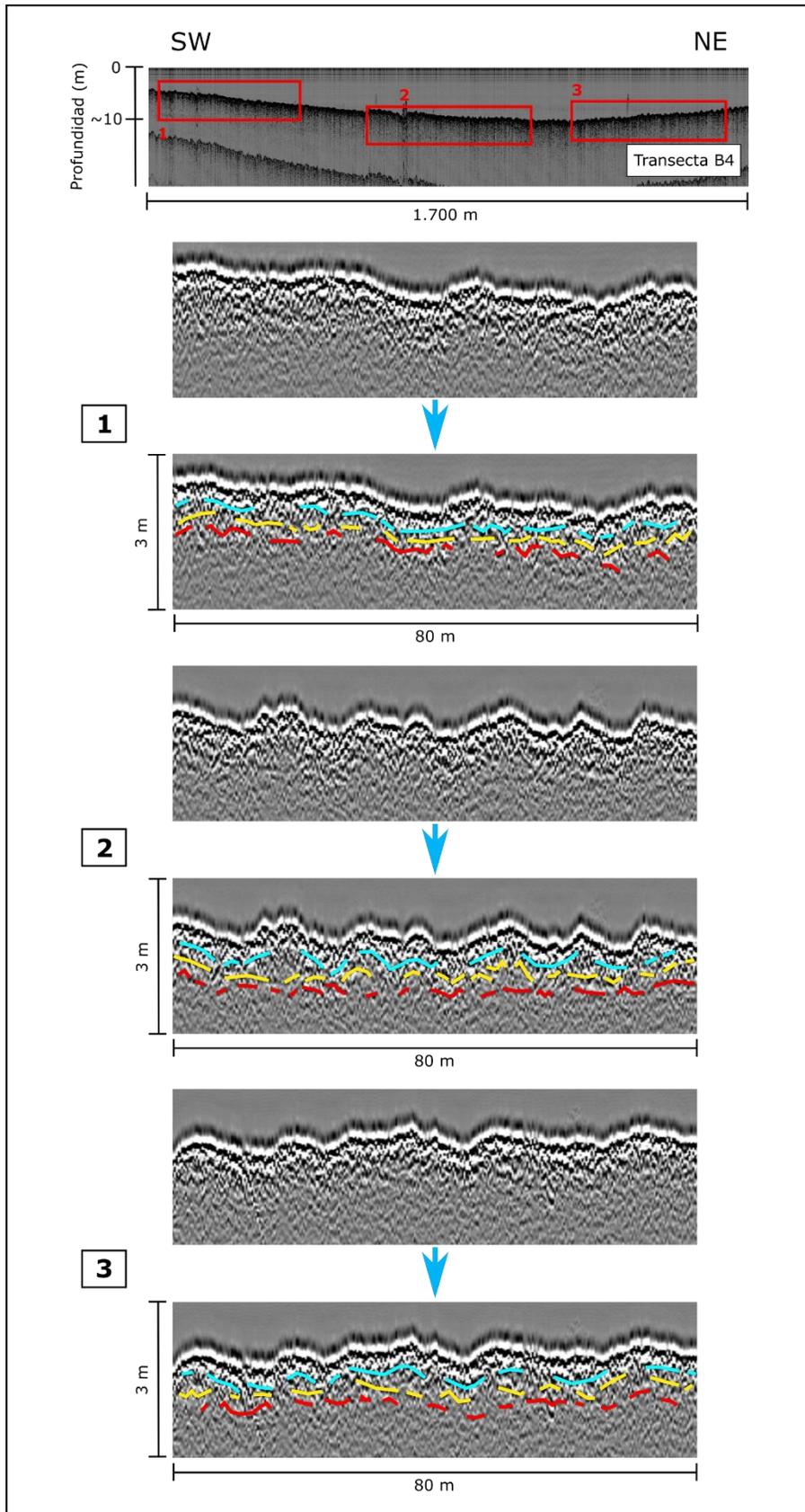


Figura 53. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B4.

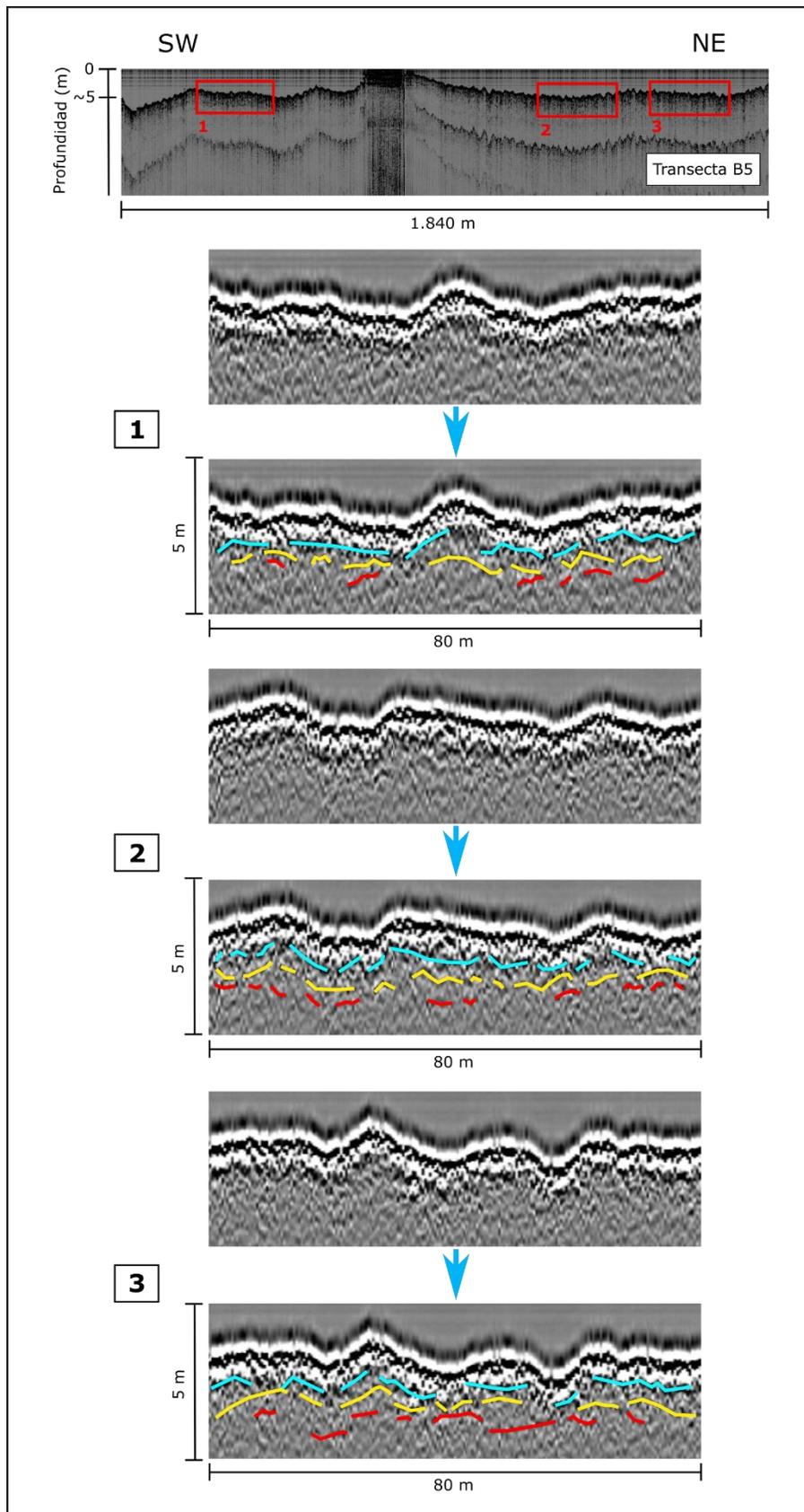


Figura 54. Interpretación de reflectores encontrados a lo largo de la transecta B5.

6. DISCUSIONES

6.1. Unidades estratigráficas

En un principio, Vargas y Ortega (2008) definieron 3 unidades para el testigo T1 (Figura 17), pero luego del estudio granulométrico y estratigráfico del testigo T5, se obtuvo información más completa para poder redefinir las unidades que caracterizan la zona de estudio. Integrando esta nueva información y tomando en cuenta las unidades inicialmente descritas para el testigo T1, se propone una nueva definición para ambos testigos. Estas nuevas unidades (y subunidades) se detallan a continuación, de techo a base.

La Unidad 1 coincide con la primera unidad estratigráfica del testigo T5. Tiene unos 19 cm de espesor total y se compone principalmente de sedimento tamaño arena fina de color café y textura homogénea. Se divide en 2 subunidades. La primera subunidad, ubicada en el techo, tiene una potencia de 13 cm y se caracteriza por presentar un gran porcentaje de arena fina (~72%). La subunidad 2 se caracteriza por tener un tamaño de grano menor (arcilla y limo fino) y presenta fragmentos de conchas y algunos fragmentos líticos y de carbón en su base, lo que le otorga un color un poco más oscuro. Su potencia es de unos 5 cm. Esta unidad se corresponde con la Unidad 1 definida para el testigo T1, donde tiene una potencia de solo 5 cm.

La Unidad 2 concuerda con la segunda unidad estratigráfica del testigo T5. Tiene un espesor de 13 cm y también se compone de sedimento fino (limo y arena fina) con textura homogénea, pero de color gris. Esta unidad se caracteriza por la presencia de restos óseos. A partir del análisis de bioapatita en colágeno para los restos óseos y de ^{14}C para el sedimento que los contiene, se ha podido estimar que ambos pertenecen al Pleistoceno tardío (López et al., 2015 y Carabias et al., 2014). Esta unidad está apenas presente en el testigo T1 (unos pocos mm). Antes de tener información sobre el testigo T5 estaba definida como el techo de la Unidad 2 del testigo T1, pero ahora se sabe que pertenece a una unidad individual. En la Figura 55 se ilustra esta nueva definición estratigráfica.

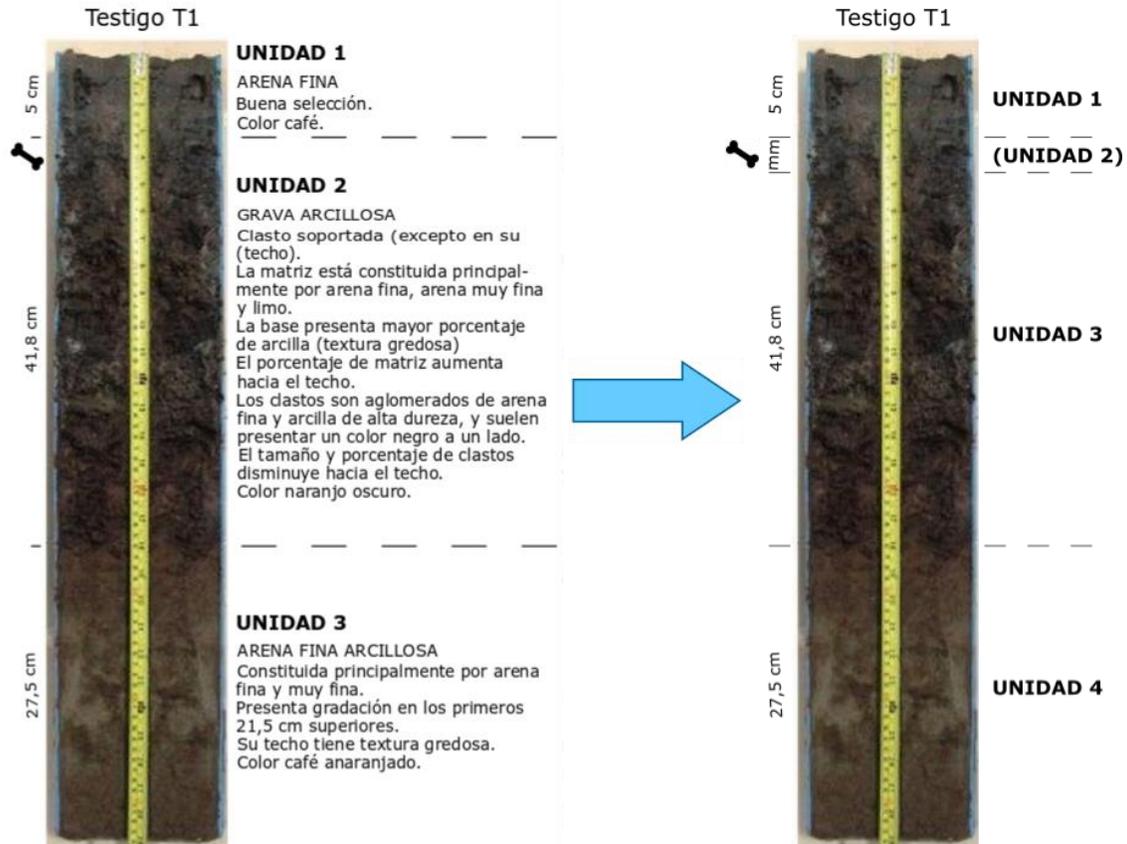


Figura 55. Unidades sedimentológicas definitivas para el testigo T1. Se define una nueva Unidad 2. Las antiguas unidades 2 y 3 pasan a llamarse 3 y 4 respectivamente (solo cambian sus nombres). Modificado de Vargas y Ortega (2008).

La Unidad 3 está compuesta por las unidades estratigráficas 3, 4 y 5, donde cada una de ellas corresponde a una subunidad. Esta unidad se caracteriza por presentar aglomerados de arcilla y limo en una matriz de arena fina. El tamaño de grano aumenta levemente hacia la base y tiene una potencia total de 38 cm, siendo la más extensa de todas. La subunidad 1 tiene un color café más anaranjado y una potencia de 28 cm, la subunidad 2 es de color café más oscuro y tiene una potencia de 7 cm, y la subunidad 3 se caracteriza por tener un color amarillo rojizo y una potencia de solo 3 cm. Esta última no presenta aglomerados y puede considerarse parte de la transición a la Unidad 4. Esta unidad concuerda con la Unidad 2 definida anteriormente para el testigo T1, donde tiene una potencia de 41,8 cm.

Finalmente llamaremos Unidad 4 a la que inicialmente era la Unidad 3 del testigo T1. Está constituida por arena fina arcillosa de color café anaranjado y presenta gradación normal con un mayor porcentaje de arcillas en el techo. Aunque esta unidad no alcanza a observarse en el testigo T5, en el testigo T1 tiene una potencia de 27,5 cm.

Testigo T5

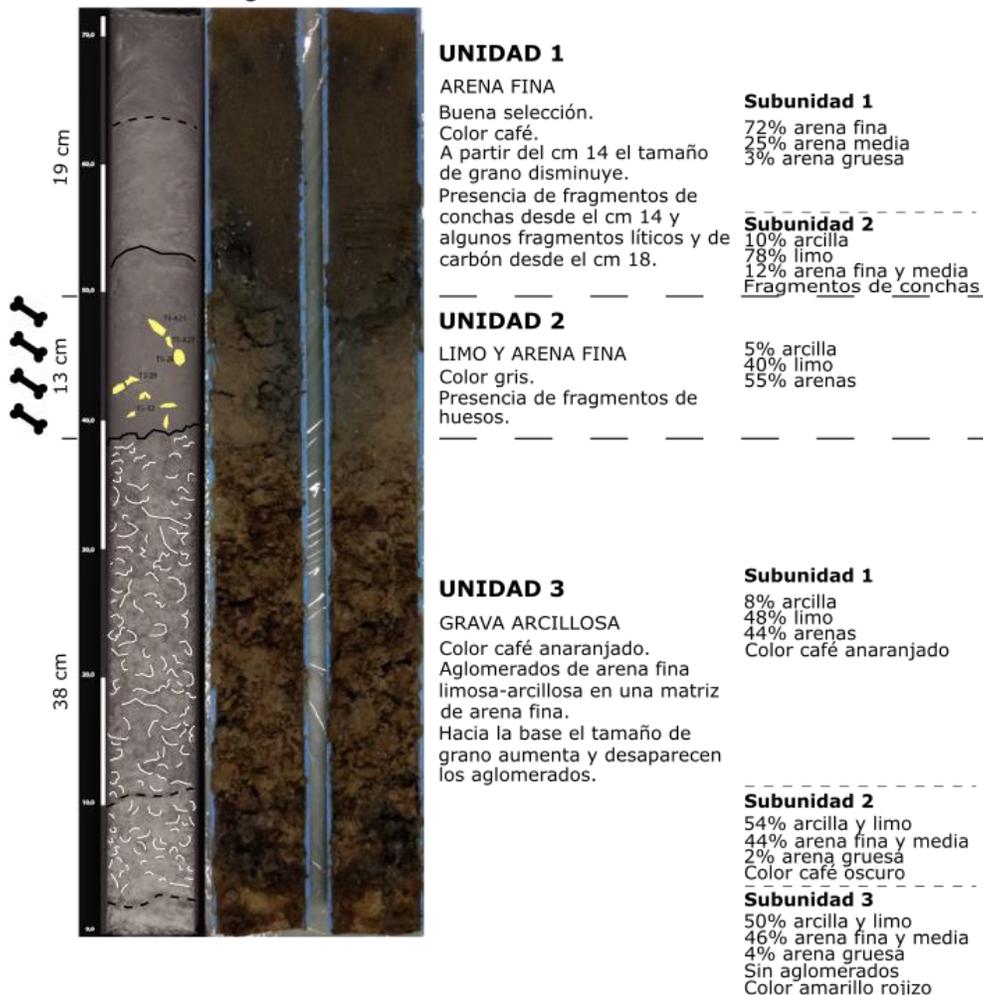


Figura 56. Unidades estratigráficas definitivas para el testigo T5 con sus respectivas subunidades. Sobre la tomografía (a la izquierda) se observa el mapeo estratigráfico antes detallado. Elaboración propia.

Si se comparan ambos testigos, se puede notar que, en general, las unidades se correlacionan bastante, aunque la magnitud de sus espesores varía un poco. Esto es esperable ya que se encuentran a aproximadamente 10 m de distancia. En la Figura 57 se puede apreciar que ambos testigos están desplazados verticalmente, y su diferencia más notoria es que en el testigo T1 la Unidad 2 tiene una potencia casi nula, de solo unos mm, mientras que en el testigo T5 tiene una potencia de 13 cm. Además, en el testigo T1 aparece la Unidad 4 mientras que en el testigo T5 no alcanza a observarse. Si se hubiese tomado una muestra más profunda es muy probable que esta pudiera apreciarse.

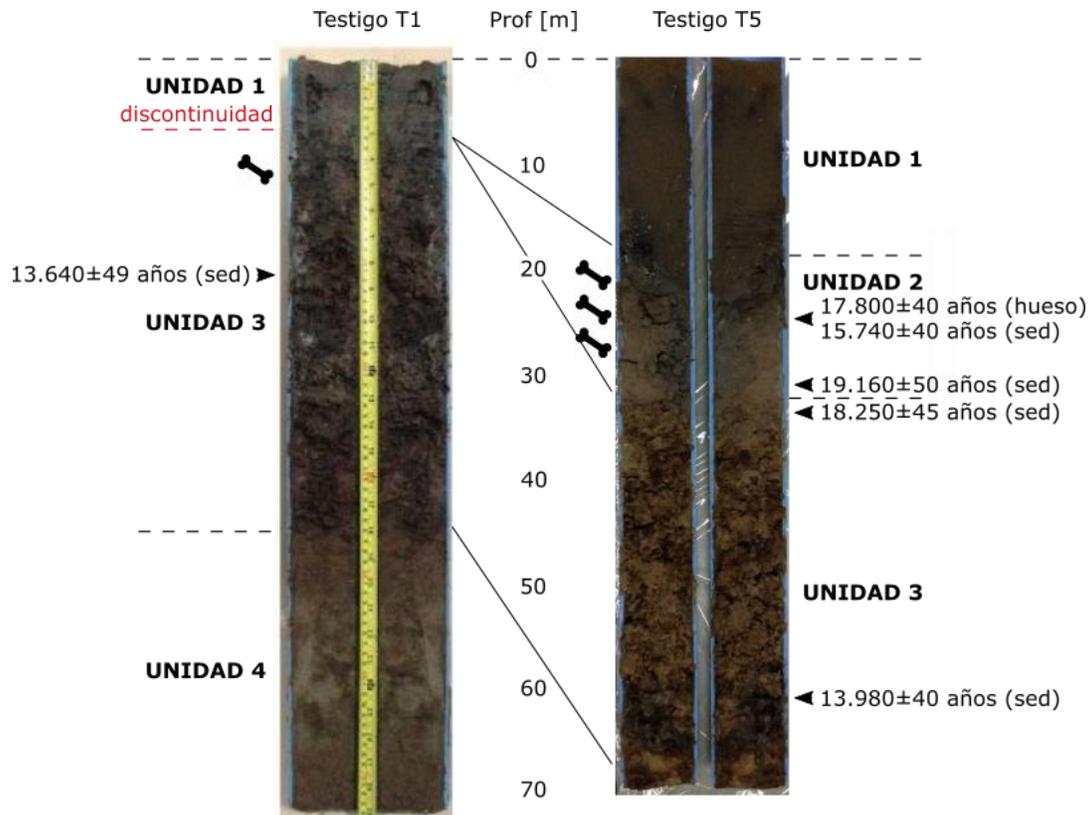


Figura 57. Correlación de testigos T1 y T5. Elaboración propia.

Tomando en cuenta que las nuevas unidades definidas para el testigo T5 coinciden con las descritas en trabajos anteriores para el testigo T1, y si se consideran las correcciones de numeración detalladas en la Figura 55, cada una de estas unidades puede asociarse a un ambiente deposicional distinto definido anteriormente por Vargas y Ortega (2008) y Flores y Ortega (2014), y detalladas en el Capítulo 3.4 de este trabajo.

El color anaranjado que se observa en la Unidad 4 y en la base de la Unidad 3, indica cierto grado de oxidación, sugiriendo que los sedimentos experimentaron una transición de ambiente deposicional subaéreo a uno subacuático. En ese sentido la Unidad 4 podría corresponder a un ambiente más bien fluvial, que luego se inundó progresivamente. Esto calza con el contexto geomorfológico actual, que indica que el ambiente de deposición correspondería a un ambiente fluvial, particularmente una llanura de inundación somera con desarrollo de humedales formada en un clima semiárido (Flores y Ortega, 2014).

Una primera hipótesis en relación a las propiedades de los aglomerados que caracterizan a la Unidad 3, compuestos principalmente de arcilla y arena fina, sugiere que fueron causados por obliteración, por ejemplo, por pisoteo animal, de un sedimento de tipo estuarial-lagunar somero (Vargas y Ortega, 2008). Es común que los ambientes de tipo estuarial o lagunar estén asociados a depósitos de fango a su alrededor, caracterizados por su alta cohesividad, y es posible que éstos hayan actuado como trampas para animales que se acercaban al sector en busca de comida

o agua, dejando evidencia de sus pisadas y formando los aglomerados. De todas maneras, se requiere de otro tipo de análisis para confirmar esta hipótesis.

Otra posibilidad es que sean evidencia de floculación. La floculación es un fenómeno mediante el cual es posible la sedimentación del material más fino transportado en suspensión (limos y arcillas) por corrientes fluviales, en tanto se produzcan las condiciones propicias para ello. Éstas se presentan normalmente en las desembocaduras de los ríos en el mar (estuarios) (Mangini et al. 2003), donde se produce mezcla de agua dulce y salada, que a su vez provoca un efecto de turbidez máxima del agua. En agua dulce la floculación no tiene lugar porque las partículas de arcilla tienen cargas electrostáticas negativas y cuando están próximas, lejos de actuar las fuerzas de Van der Waals, se repelen por ser del mismo signo. En cambio, en presencia de agua de mar, las sales presentes introducen un factor clave para facilitar los procesos electroquímicos que conducen a la floculación. El agua salada, al tener cationes libres, propicia que estos interaccionen con las cargas negativas de las partículas de arcilla, neutralizándolas y pudiendo entonces actuar las fuerzas de Van der Waals si las partículas están lo suficientemente próximas y formar flóculos o aglomerados (Escalona, 2014). Por lo tanto, la presencia de estos aglomerados podría indicar que la Unidad 3 se asocia con un ambiente de tipo estuarial.

Las características de la Unidad 2 coinciden con un ambiente de baja energía, debido al tamaño fino de grano. El origen continental de los restos óseos y su distribución horizontal sugieren un ambiente subaéreo o de agua somera, posiblemente de tipo estuarial o lagunar (humedal). Normalmente los estuarios se asocian a la desembocadura de los ríos y las lagunas costeras a cuerpos de agua aislados asociados a llanuras costeras con aportes menores o estacionales de agua dulce (Stuardo y Valdovinos, 1989). Estos tipos de ambiente suelen ser bastante dinámicos y varían dependiendo de la existencia de barreras de arena (dunas), que a su vez dependen de la tasa de deposición y la cantidad de material disponible. Estas barreras interrumpen la interacción entre las aguas continentales y oceánicas y pueden llegar a generar lagunas cerradas, que luego, producto de la entrada de agua de mar y efecto de las mareas, pueden abrirse nuevamente y convertirse en estuarios con mayor aporte de mareas y leve aporte fluvial. La buena preservación de los restos óseos puede deberse a la baja energía del ambiente y a la cohesividad del sedimento (matriz fina) que los envuelve y mantiene unidos.

Por último, debido a sus características, la Unidad 1 se asocia a un ambiente de anteplaya superior. La subunidad 1 muy probablemente corresponde a arenas modernas que cubren a las demás unidades. Los fragmentos de conchas encontrados en la Subunidad 2 pueden pertenecer a organismos que viven en aguas más someras, mientras que los fragmentos líticos y de carbón pueden tener un origen continental, y haber sido transportados desde las quebradas que rodean la bahía.

En resumen, la historia evolutiva de la zona de estudio podría reflejar el paso de un ambiente de tipo fluvial, con posible desarrollo de llanura de inundación, a uno progresivamente inundado por el mar (transgresión marina), pasando por un

ambiente de tipo estuarial-lagunar, para finalmente convertirse en uno de tipo anteplaya superior, que es el ambiente que se observa actualmente.

En cuanto a la datación de cada unidad, nuevos análisis de ^{14}C en sedimento total en el testigo T5 (V. Flores, comunicación personal, 2019) determinaron una edad de 13.980 ± 40 y 18.250 ± 45 años para la Unidad 3 (Subunidad 2 y 1 respectivamente). Para la Unidad 2 se hicieron 2 dataciones en sedimento, una en la base, que arrojó una edad de 19.160 ± 50 años, y una en el techo, de 15.740 ± 40 años, además, una datación en huesos, ubicados a una profundidad de ~ 25 cm desde el techo del T5, equivalente a 17.800 ± 40 años. La Unidad 1 no ha sido datada, pero se cree que es reciente y pertenece al Holoceno. Usando la misma técnica de datación, se determinó una edad de 13.640 ± 49 años para la Unidad 3 (Subunidad 2) en el testigo T1.

La deposición de las unidades 4, 3 y 2 parece ser bastante continua, mientras que entre la Unidad 2 y 1 existe una diferencia de edad bastante amplia, donde la Unidad 2 pertenece al Pleistoceno tardío, mientras que la Unidad 1 corresponde a arenas modernas depositadas durante los últimos años. Una posible causa puede tener relación con una baja tasa de deposición de sedimento durante ese tiempo, o, por el contrario, puede deberse a una alta tasa de erosión probablemente producida por el mismo oleaje o transgresión marina. Esta segunda suposición es más probable ya que una transgresión marina implica erosión, entonces, de no haber sedimento sobre el sitio es muy probable que este hubiese desaparecido. Por otro lado, las incongruencias de edad, sobre todo de la Subunidad 2 de la Unidad 3, que debería ser la más antigua según el orden de deposición, puede deberse a rejuvenecimiento de la muestra debido a transporte de materia orgánica desde capas superiores. Además, las edades no reflejan el momento de la deposición de las unidades, el sedimento que las compone puede haber sido transportado desde otras áreas, por lo que su edad puede ser más antigua que la de su deposición.

Conforme al modelo de evolución de la línea de costa en la bahía, propuesto por Carabias et al. (2014) (Figura 15), hace ~ 16.000 años el nivel del mar estaba ubicado a unos 7 km hacia el NW de la línea de costa actual, y fue avanzado gradualmente hacia el continente hasta sumergir por completo el sitio GNLQ1 hace ~ 11.000 años. Esto, en conjunto con las edades obtenidas para la Unidad 2 (19.160 ± 50 años para el sedimento en la base, 17.800 ± 40 años para los restos óseos y 15.740 ± 40 años para el sedimento en el techo), sugerirían que esta unidad se depositó en un ambiente continental. Una posibilidad es que el sitio, luego de ser depositado, haya estado expuesto por ~ 5.000 años antes de ser cubierto por aguas marinas. Otra hipótesis es que el ambiente deposicional de la Unidad 2 corresponda a uno de tipo lagunar o de llanura de inundación, con aporte de agua y sedimentos desde las quebradas que rodean la bahía, los cuales cubrieron el sitio y facilitaron su conservación. Esto podría explicar el hecho de que la Unidad 2 sea más antigua que la Unidad 3, ya que los sedimentos que la componen habrían sido transportados desde otras áreas, probablemente más antiguas. También puede corresponder a un ambiente de tipo estuarial. Los estuarios pueden llegar a medir varios kilómetros de largo y es posible que el agua marina haya influenciado el sitio antes de ser

totalmente cubierto. Por otro lado, hay que considerar que el modelo de evolución de la línea de costa propuesto puede no ser totalmente correcto, ya que es difícil predecir el comportamiento del mar luego de la desglaciación y es necesario tomar en cuenta muchas variables, por lo que es posible que el sitio haya sido inundado antes.

6.2. Caracterización del fondo marino

La orientación de las estructuras sedimentarias encontradas (óndulas y ondulitas) depende de la dirección del oleaje, que a su vez depende del viento. Las crestas de las óndulas y ondulitas se forman de manera perpendicular a la dirección de las olas que las generan y que son impulsadas por vientos con el mismo rumbo. Sin embargo, estas olas también pueden verse afectadas por efectos como la refracción y difracción, causadas por cambios en la profundidad y la presencia de obstáculos (afloramientos rocosos, islas, muelles), respectivamente, y que provocan un cambio en la dirección del oleaje. Así, la orientación de las estructuras entrega información sobre la dirección de las corrientes que se producen por estos dos efectos y que no dependen directamente de la dirección de los vientos del sector. Además, gracias a la curvatura que presentan las óndulas se puede conocer el sentido de circulación del agua en la bahía (Figura 58).

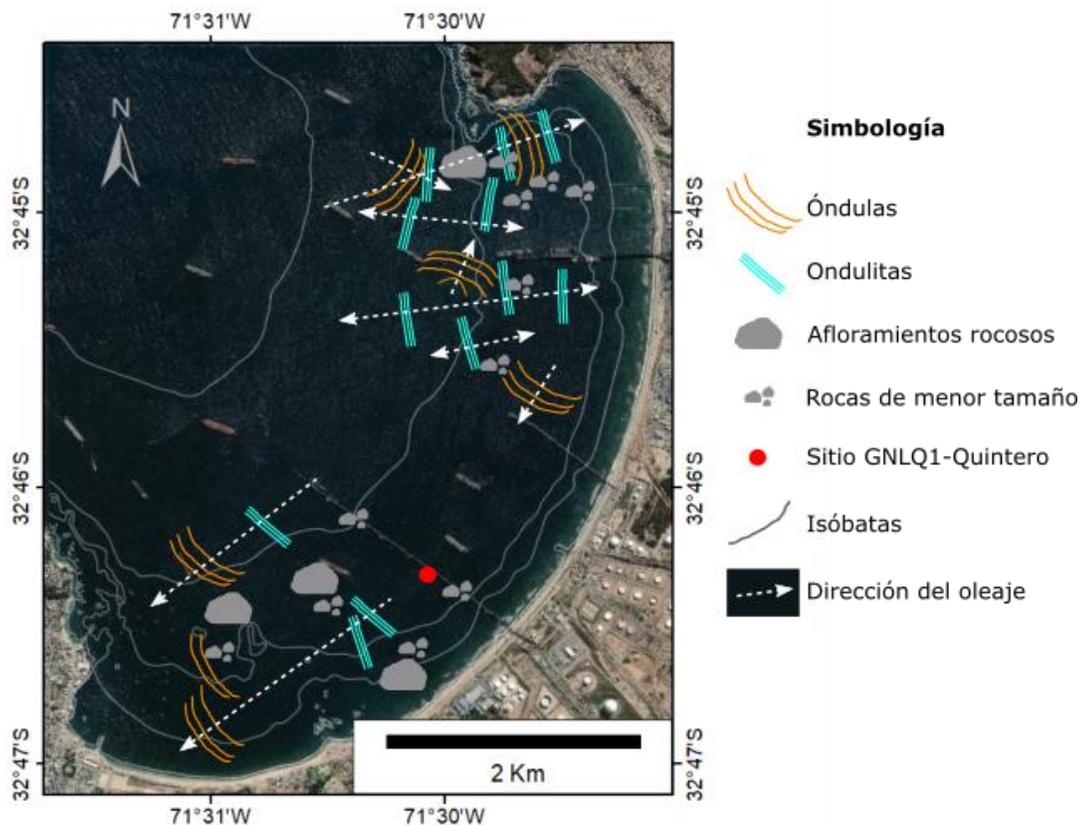


Figura 58. Mapa de las estructuras sedimentarias y afloramientos encontrados en la zona de estudio. Se agregaron flechas que indican la dirección del oleaje, según la orientación de las óndulas y ondulitas. Escala 1:35.000. Elaboración propia.

En el sector norte, las crestas de las estructuras presentan distintas orientaciones (NW-SE, NE-SW y casi N-S) que sugieren un movimiento circular del agua. La curvatura de las óndulas sugiere que este movimiento es en sentido horario en la punta más cerrada y que además se forma una corriente hacia el SW en la zona un poco más alejada y cercana a la orilla. En el sector sur, las estructuras presentan una sola orientación preferencial (NW-SE) y la curvatura de las óndulas indica una dirección de movimiento hacia el SW. Esta configuración coincide con los modelos de corrientes presentados por Escobar et al. (1971) y Malet y Andrade (1991) (Figuras 11 y 12.b), donde destaca una corriente general que abarca toda la bahía en sentido horario y una corriente cerrada que circula en la punta norte, también en sentido horario. Se sabe que los vientos de la zona provienen del SW y actúan sobre el agua generando olas (swell). Estas entran a la bahía por la punta norte, donde, debido a factores como el cambio en la batimetría (disminución de la profundidad), la presencia de afloramientos rocosos y la morfología redondeada de la bahía, se refractan y difractan generando las corrientes antes mencionadas. La nula presencia de estructuras sedimentarias en las cercanías del sitio (transecta L3) puede deberse a que en ese sector las olas y las corrientes no generan un impacto tan fuerte, lo que puede estar relacionado también a su buena conservación.

Por otro lado, el tamaño y la distribución de las estructuras a lo largo de la bahía puede explicarse debido a diferencias de energía de las olas en las dos zonas donde se concentran. Las ondulitas están asociadas a una menor energía, mientras que las óndulas a una mayor energía del oleaje. Esto sugiere que, en la zona sur de la bahía, la energía de las olas es menor en el lado este y aumenta a medida que se mueven hacia la parte más oeste. En la zona norte en cambio, los dos tipos de estructuras se superponen y no tienen zonas preferenciales. Esto puede indicar que existen frentes de olas de alta y baja energía que conviven y se mezclan generando estructuras de ambos tipos. Además, el tamaño de estas estructuras está relacionado a la profundidad donde se generan. Las ondulitas suelen ser más someras mientras que las óndulas se asocian a profundidades mayores.

Hay que destacar que los datos obtenidos solo representan las estructuras encontradas a lo largo de las transectas trazadas y es muy probable que existan más estructuras y/o afloramientos en las zonas que no se recorrieron, como por ejemplo la zona central de la bahía y el borde cercano a la orilla. Una solución para tener una mejor caracterización de la parte central de la bahía sería agregar una transecta entre las transectas L3 y L4, ya que se encuentran a una distancia muy grande. En cuanto a la orilla, se recorrió una transecta que abarcaba esa área, pero la mala resolución de las imágenes obtenidas, debido a la poca profundidad en ese sector, hizo imposible la distinción de estructuras o afloramientos. Lo esperado sería encontrar ondulitas paralelas a la línea de costa, estructuras muy comunes en la orilla de las playas.

En relación a los afloramientos rocosos encontrados en ambas puntas de la bahía, estos pueden estar asociados a una menor profundidad o a una mayor tasa de erosión del sedimento marino debido a la alta energía de las olas en esos sectores, lo que provoca que queden expuestos. También puede asociarse a un bajo aporte de

sedimentos de quebradas cercanas debido a la escasez de agua de estas. Por otro lado, los afloramientos de la punta norte de la bahía podrían relacionarse con la Formación Horcón, compuesta por rocas estratificadas marinas del Plioceno tardío. Aunque en las imágenes obtenidas con el sonar de barrido lateral no se puede distinguir estratificación en los afloramientos, es posible asociarlos con esta Formación debido a su ubicación, ya que esta aflora en ese sector (un poco más hacia el norte), pese a que en la hoja Quillota Portillo (Rivano et al., 1993) aparece cubierta por paleodunas y sedimentos eólicos y litorales recientes (Figura 16). Se propone obtener una muestra para corroborar esta suposición.

6.3. Caracterización sismoestratigráfica

En los perfiles a gran escala de las transectas perpendiculares a la línea de costa (Figura 44), se puede notar la morfología típica de zonas costeras, donde destaca una pendiente general que corresponde a la plataforma continental. Además de eso no se observa ningún otro tipo de morfología a gran escala.

Por otro lado, en la mayoría de las transectas paralelas a la orilla, el relieve del fondo marino es bastante plano y regular. La única transecta que presenta un relieve más irregular es la B5. En la Figura 54 se puede notar la aparición de varios montículos, seguramente debido a un mayor movimiento del oleaje, y por lo tanto del sedimento marino, en esa zona cercana a la orilla. La elevación que se observa en la parte central se debe a la acumulación de sedimento en torno a uno de los pilares de un muelle ubicado justo en ese lugar (zona más oscura del perfil).

A pesar de que el suelo marino parece ser bastante plano en las demás transectas, se pueden observar varias depresiones que abarcan desde ~250 m a ~1 km de longitud, y que se ubican en diferentes zonas de la bahía. Estas depresiones pueden corresponder a la continuación de alguna de las quebradas que rodean la bahía y ser evidencia de actividad fluvial en el pasado. Su forma bastante plana indicaría que fueron rellenadas posteriormente por sedimento marino. Según esto, esas morfologías se podrían relacionar a un paleoambiente fluvial o de estuario que luego fue inundado por el mar, lo que coincide con la información sedimentológica detallada anteriormente.

Además, si se observan imágenes satelitales tomando en cuenta un área mucho mayor, a unos 15-20 km hacia el oeste de la zona de estudio se puede notar la presencia de cañones y valles submarinos. Estos necesariamente se comunicaban con el continente a través de antiguos sistemas fluviales, lo cual respaldaría la idea de un ambiente fluvial en la zona de estudio en algún tiempo pasado, probablemente antes de la deposición de los huesos de la Unidad 2. De todos modos, es necesario un estudio a mayor escala para poder verificar esa idea.

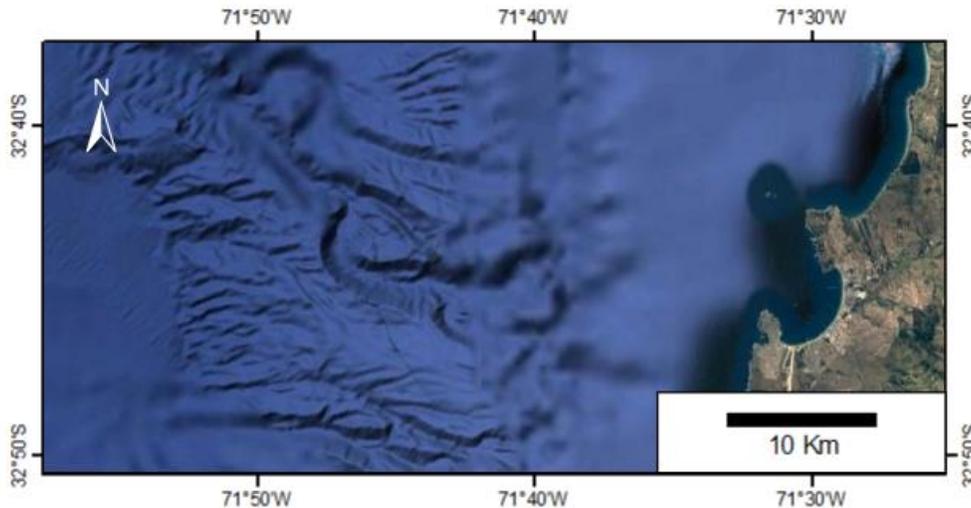


Figura 59. Imagen que abarca una zona mayor al área de estudio. A la izquierda se puede notar la presencia de valles y cañones submarinos. (Tierra: imagen satelital multiespectral Landsat, océano: combinación de modelo gravimétrico y medidas de sonares de fondo). Escala 1:400.000. Elaboración propia.

Las depresiones antes mencionadas también pueden ser evidencia de la existencia de una o más lagunas en el sector, asociadas a algún río cercano que por alguna razón sufrió un entrampamiento, posiblemente por barras de arena como las encontradas cerca de la orilla de la bahía, y poco a poco fue inundándose hasta formar una laguna. Esto tiene sentido ya que muy cerca de la bahía se ubica el actual humedal Puchuncaví (o Campiche) que años atrás, según la carta náutica presentada por Pomar en el año 1876 (Figura 13), conformaba una laguna navegable de unos 2 km de largo, por lo que es probable que existieran también otras lagunas en la zona.

En relación al análisis sismoestratigráfico, en un principio fue difícil interpretar los perfiles obtenidos ya que antes de utilizar los filtros detallados anteriormente solo se podía notar el fondo muy marcado y algunas líneas muy tenues en profundidad. Esto se debe a que la arena que cubre el fondo marino, al ser un material no consolidado y de alta porosidad, absorbe gran parte de la frecuencia emitida por el equipo SBP, lo que produce que esa zona superficial se vea más oscura. Esto a su vez causa que la frecuencia emitida pierda fuerza y no pueda seguir penetrando el sustrato marino de una buena manera. Utilizando filtros y ajustando el valor de la ganancia se pudieron balancear los colores de la imagen, aclarando las zonas más oscuras y resaltando las sutiles líneas más profundas que podrían entregar información útil.

A pesar de lo mencionado antes, si se pudieron identificar algunas estructuras en profundidad. En ambos sets de perfiles (A y B) se observaron reflectores bastante horizontales, aunque sinuosos y discontinuos, que sugieren la presencia de estratos. A lo largo de todos los perfiles se observaron 3 conjuntos de reflectores que aparecen a ciertas profundidades (desde el fondo marino) bastante regulares. A partir de estos se definieron 3 unidades sísmicas delimitadas por cada uno de los reflectores. La primera unidad sísmica se define desde la superficie del fondo marino hasta el primer reflector y tiene una potencia promedio de unos 20 cm, aunque en algunos

sectores es menor (~10 cm) y en otros alcanza hasta ~40 cm. La segunda unidad sísmica se encuentra entre los reflectores 1 y 2, y tiene una potencia variable entre 10 y 30 cm, alcanzando hasta 50 cm en algunas zonas. Esta unidad presenta leves acuñamientos a lo largo de los perfiles. Por último, la tercera unidad sísmica se ubica entre los reflectores 2 y 3, y tiene una potencia variable entre 10 y 30 cm, alcanzando hasta 40 cm en algunos sectores. Estas 3 unidades se disponen de forma subparalela al relieve del fondo marino y se caracterizan por sus formas sinuosas y por tener una continuidad lateral bastante amplia, con tramos coherentes y otros más caóticos. En los perfiles perpendiculares a la línea de costa (A1-A4), se ubican entre las cotas ~8 a 25 m de profundidad.

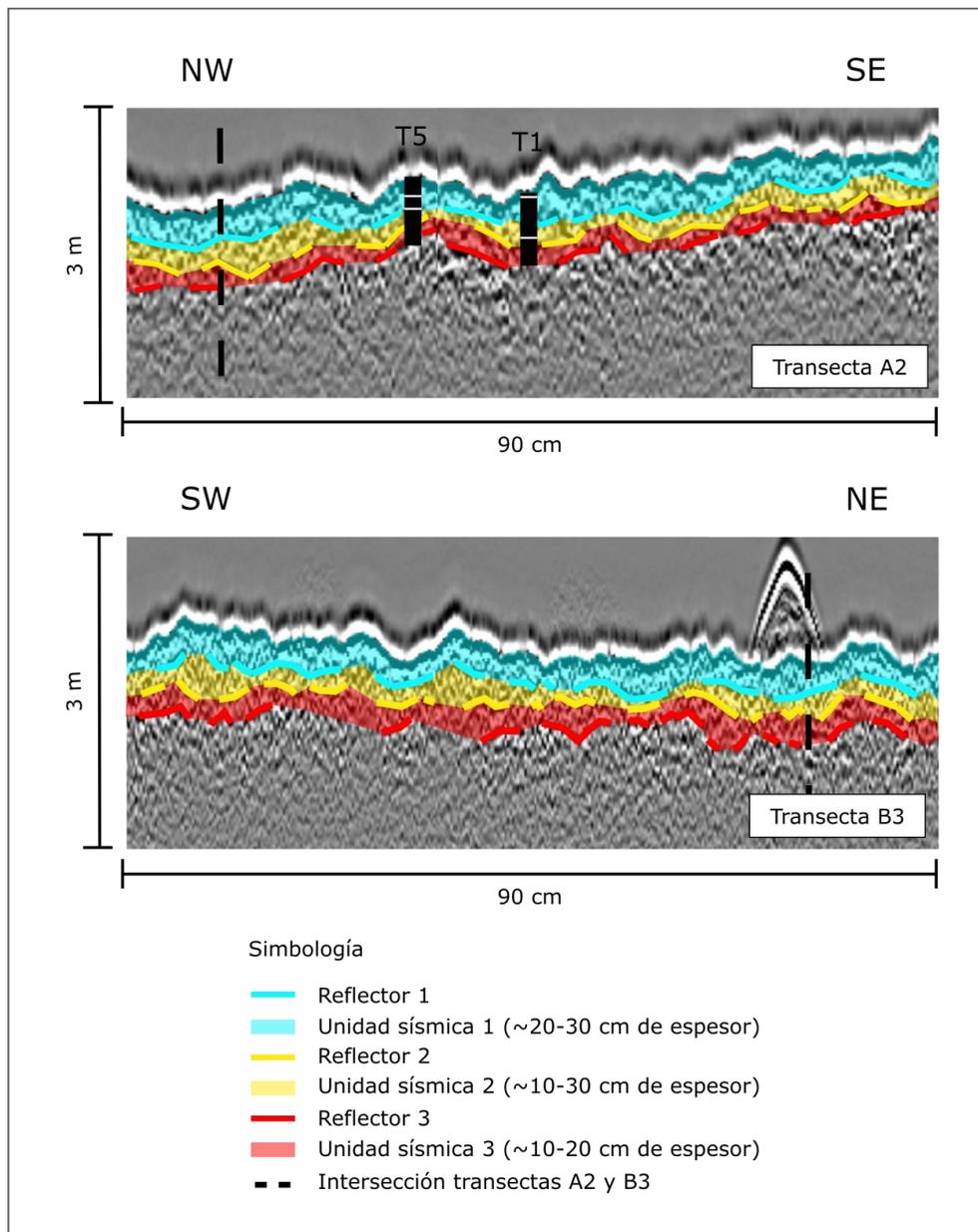


Figura 60. Reflectores y unidades sísmicas presentes en las cercanías del sitio GNLQ1. Los rectángulos negros representan los testigos T1 y T5. Las marcas blancas en cada testigo indican los límites de las unidades estratigráficas presentes en cada uno. Elaboración propia.

En un principio se podría asociar cada una de las unidades sísmicas a las 3 primeras unidades estratigráficas ya definida, pero, como se puede ver en la Figura 60, donde se muestran las unidades sísmicas presentes en las cercanías del sitio GNLQ1 (transectas A2 y B3), en general las potencias de estas no coinciden, sobre todo para el testigo T1.

La Unidad sísmica 1 tiene una potencia de 30 cm, mientras que la Unidad estratigráfica 1 tiene una potencia de 19 cm en el testigo T5 y de solo 5 cm en el testigo T1. Esta diferencia puede deberse a que los datos sísmicos y estratigráficos no se obtuvieron simultáneamente (los datos sísmicos se obtuvieron después) y es posible que se haya acumulado sedimento (arena) en la capa superior y que por ende su potencia haya aumentado, por lo que no se descarta totalmente que la Unidad sísmica 1 coincida con la Unidad estratigráfica 1.

La Unidad estratigráfica 2 tiene una potencia de 13 cm en el testigo T5, lo que coincide bastante con la potencia de ~10 cm que presenta la Unidad sísmica 2 en ese punto. Sin embargo, la potencia de la Unidad estratigráfica 2 en el testigo T1 es de solo unos mm, por lo tanto, si ambas coincidieran se esperaría que la Unidad sísmica 2 presentara acuñamiento hacia el SE, cosa que no ocurre. Esto sugiere que ambas unidades no se corresponden, aunque también es posible que la resolución de los perfiles sísmicos no sea óptima para distinguir estratos tan finos (unos pocos cm) y posibles acuñamientos de estos.

La Unidad sísmica 3 tiene una potencia de unos 10-20 cm, mientras que la Unidad estratigráfica 3 alcanza cerca de 40 cm de potencia en ambos testigos. En este caso también es posible que la interpretación de los reflectores no sea tan acertada debido a la resolución de los perfiles, por lo que no se descarta que ambas coincidan.

Con respecto a la concordancia lateral de las unidades sísmicas en ambas direcciones abarcadas por los sets de perfiles (transectas A: NW-SE, transectas B: SW-NE), en la Figura 60 se puede notar que las potencias de las unidades presentes a lo largo de las transectas A2 y B3, al menos en las cercanías del sitio, coinciden bastante. Se observa que, en el punto exacto de la intersección de ambas transectas, las potencias de las unidades sísmicas coinciden exactamente: la Unidad sísmica 1 tiene una potencia de 30 cm y las Unidades sísmicas 2 y 3 tienen una potencia de 20 cm cada una. Esta equivalencia respalda la idea de que las unidades sísmicas podrían corresponder a estratos que abarcan esa zona, y que posiblemente se extienden también hacia áreas más alejadas.

En resumen, tomando en cuenta solo la estratigrafía del testigo T5, se podría decir que las unidades sísmicas coinciden bastante con las unidades estratigráficas, al menos en ese punto, presentando leves diferencias en las potencias. No ocurre lo mismo con el testigo T1, las potencias de las unidades sísmicas en ese punto no concuerdan con lo esperado según la información estratigráfica. Esto sugiere que la interpretación de los reflectores como unidades continuas puede no ser tan acertada, aún cuando se observó que las potencias de las unidades sísmicas concuerdan

exactamente en el punto de intersección de las transectas que cruzan el sitio. Es posible que los reflectores no indiquen la existencia de estratos reales, sino que se traten de reflejos del mismo fondo marino acentuados por los filtros utilizados. Esta idea explicaría también el hecho de que están presentes a lo largo de todos los perfiles de una forma muy continua y que en general imitan casi a la perfección el relieve del fondo marino. Esto se puede observar claramente en el perfil de la transecta B5 (Figura 54), donde el primer reflector aparece muy marcado y de un color más claro, abarcando continuamente todo el perfil. Se propone obtener más datos sedimentológicos (testigos) en las diferentes zonas de la bahía para tener información más concreta y poder determinar si realmente las unidades sísmicas se relacionan con las unidades estratigráficas y conocer sus extensiones reales.

En cuanto al estrato de interés (Unidad estratigráfica 2) es probable que en realidad sea acotado y que presente acuñaamiento hacia el continente, característica que generalmente exhiben los estratos producto de su deposición sobre una pendiente (Flores y Ortega, 2014). De todas formas, es posible que abarque un área mayor a la que se ha identificado hasta ahora, siendo los lugares menos expuestos de la bahía (zona central y sur) los principales candidatos, donde es posible que el estrato de interés se encuentre cubierto por sedimento marino. En cambio, en zonas más expuestas es más probable que haya sido completamente erosionado o que incluso nunca haya alcanzado tales dimensiones.

6.4. Preservación del sitio GNLQ1

Durante la última transgresión marina, muchos sitios arqueológicos ubicados en la plataforma continental han sido afectados por procesos costeros. La preservación de estos sitios sumergidos, encontrados en distintas partes del mundo, depende en gran medida de si la transgresión se produce por inundación del lugar o por la retirada de la costa, siendo más probable que se conserven si se produce una inundación (Waters, 1992), como lo que ocurre en este caso. Además, depende de la velocidad con la que el nivel del mar aumenta, si el proceso es rápido se produce menos erosión, y viceversa. Otro factor importante es la topografía de la zona antes de la transgresión marina, donde los bajos topográficos ofrecen una protección óptima que evitará que el depósito sea erosionado durante la transgresión (Waters, 1992). Pearson et al. (1986) y Krait et al. (1983) (en Waters, 1992), señalan que los valles fluviales que inciden en el continente durante los períodos en que el nivel del mar era menor u otros ambientes con características similares (como estuarios o lagunas costeras), proporcionan los lugares más probables donde se pueden preservar sedimentos y sitios relictos, ya que los sitios son enterrados o sumergidos debajo de la superficie de impacto de la erosión de la costa. Esto es justo lo que sucede con el sitio GNLQ1, que fue depositado en un bajo topográfico según lo que se puede ver en la mayoría de los perfiles paralelos a la línea de costa (Figuras 50 a 53), y que, como se dijo antes, probablemente está relacionado a un río o estuario que inundaba la zona antes de la transgresión.

De acuerdo a Waters (1992), otros factores que influyen son (1) la energía de los procesos costeros y la profundidad de base de la ola (profundidad a la que ocurre

la erosión del sedimento marino), (2) la cohesión de los sedimentos que comprenden la matriz del sitio, (3) la cantidad de subsidencia antes de la transgresión, (4) la pendiente de la plataforma continental, (5) la influencia de las mareas y (6) la entrada y salida de sedimento. Además, debido a que las costas son generalmente ambientes de alta energía caracterizados por olas y procesos de marea, la preservación o destrucción de sitios depende de su posición en relación con los procesos costeros.

Al observar la Figura 58 se puede notar que en las cercanías del sitio predominan estructuras sedimentarias de baja energía (ondulitas) o incluso no aparecen estructuras (transecta L3). Esto puede indicar que las corrientes marinas afectan muy poco esa zona, haciendo posible la preservación del sitio en el tiempo. En cuanto a las mareas, la diferencia de altura entre la marea más alta y la más baja es de ~1 a 1,5 m aproximadamente, lo que Davies (1964) clasifica como micromareal (menor a 2 m) y que implica una baja influencia en el sector. Además, según el Sistema de Alerta de Marejadas (SAM) las marejadas dentro de la bahía son bastante suaves, alcanzando un máximo de ~1 m en las cercanías del sitio. Con respecto a la profundidad de base de la ola (closure depth) en ese punto, no se conoce con exactitud, pero se esperaría que fuera menor a 13 m, que es la profundidad a la que se ubica el sitio.

Por otro lado, según el estudio estratigráfico, la unidad que contiene los restos óseos, compuesta de una matriz fina, posee una alta cohesividad, lo que también contribuye a su buena preservación. En cuanto a la cantidad de subsidencia antes de la transgresión, no se conoce, de hecho, se considera que en la zona ha habido un alzamiento tectónico, con una tasa mínima de 0.4 m/ka (Encinas et al., 2006). Del perfil batimétrico de la bahía (Carabias et al., 2014) presentado en la Figura 14, se obtiene que la pendiente de la plataforma continental en el sector es baja ($0,86^\circ$), característica que también fomenta la formación y conservación del sitio.

Por último, con respecto al punto (6), es probable que actualmente el transporte de sedimentos hacia la bahía desde las quebradas cercanas (estero de Puchuncaví) sea bastante bajo. El río más importante que circula por la región de Valparaíso corresponde al río Aconcagua, y aunque desemboca al mar un poco más hacia el sur de la bahía de Quintero, es muy probable que tenga una influencia en la zona de estudio, siendo el principal medio de transporte de sedimentos desde el continente hacia la costa. Es muy posible que antiguamente este río tuviera una influencia mayor en la bahía, pero, debido a que durante las últimas décadas su caudal ha disminuido bastante, principalmente a causa de la extracción de agua para regadío y la escasez de lluvias en la región, solo cauces menores llegan a la zona de estudio, implicando un bajo aporte de material.

7. CONCLUSIONES

Del estudio granulométrico y estratigráfico de los testigos T1 y T5 se puede concluir que en el área de estudio existen 4 Unidades estratigráficas que reflejan una transición desde un ambiente continental a uno marino somero, caracterizada por una inundación progresiva de la zona provocada por una transgresión marina post desglaciación.

La Unidad 4, ubicada en la base del testigo T1, se compone de arenas de tamaño medio y está asociada a un ambiente de tipo fluvial, probablemente relacionada con las quebradas que rodean y desembocan en la bahía, y que actuaron como vías de transporte de sedimento y agua. Además, según los perfiles sísmicos a mayor escala se pueden ver algunas depresiones que podrían relacionarse a cauces de ríos o incluso a la existencia de lagunas o humedales en la zona de estudio, y que podrían indicar un ambiente de tipo fluvial o lagunar. Su forma bastante plana indicaría que han sido rellenadas por sedimento más moderno. Por otro lado, a unos 20 km hacia el oeste de la zona de estudio, según imágenes satelitales obtenidas de Google Earth, se observó la presencia de valles y cañones submarinos, los cuales necesariamente se conectaban con el continente a través de sistemas fluviales, que probablemente abarcaron la zona de estudio en algún momento. De todas maneras, es necesario un estudio a mayor escala para corroborar esta idea y poder determinar en qué momento del tiempo la zona de estudio estuvo dominada por sistemas fluviales.

La Unidad 3 se caracteriza por presentar aglomerados de arcilla y limo fino en una matriz de arena fina, y se asocia a un ambiente de tipo lagunar somero o estuarial. El origen de estos aglomerados aún no se conoce con certeza, pero una primera hipótesis propone que son producto de obliteración por pisoteo animal, ya que es posible que animales de diversos tipos circularan por el área y se acercaran en busca de alimento y agua, dejando evidencia de sus pisadas en el sedimento. Una segunda hipótesis sugiere que los aglomerados fueron causados por floculación, proceso bastante común que ocurre al interior de los estuarios, producido por la mezcla de agua dulce y salada. Por otro lado, análisis de ^{14}C en sedimento total en el testigo T5 han arrojado edades de 13.980 ± 40 y 18.250 ± 45 años en la base y el techo de esta unidad respectivamente, y una edad de 13.640 ± 49 años en el testigo T1. Las incongruencias de edad (en la base los sedimentos son más jóvenes según estas dataciones) puede deberse a rejuvenecimiento de la muestra debido a transporte de materia orgánica desde capas superiores. Además, las edades no necesariamente reflejan el momento de la deposición de las unidades, el sedimento que las compone puede haber sido transportado desde otras áreas, por lo que su edad puede ser más antigua que la de su deposición.

La Unidad 2 se caracteriza por la presencia de restos óseos de fauna continental del Pleistoceno tardío. Está compuesta principalmente por limo y arena fina, por lo que se asocia a un ambiente de baja energía, probablemente de tipo estuarial. La baja energía del ambiente junto con las características cohesivas del sedimento (matriz fina) que los envuelve y mantiene unidos, propician la buena

preservación de los fragmentos de hueso. En cuanto a la datación de esta unidad, nuevos análisis de ^{14}C en sedimento han determinado una edad de 19.160 ± 50 años en la base y 15.740 ± 40 años en el techo, además de una edad equivalente a 17.800 ± 40 años para los fragmentos de hueso ubicados a una profundidad de ~ 25 cm desde el techo del testigo T5.

Por último, la Unidad 1, la más joven, se compone de arenas finas y se asocia a un ambiente de anteplaya que coincide con el paisaje actual. Esta unidad no ha sido datada, pero se cree que es reciente y que pertenece al Holoceno.

Según las dataciones antes mencionadas, se puede decir que la deposición de las unidades 4, 3 y 2 es bastante continua, mientras que entre la Unidad 2, perteneciente al Pleistoceno, y la Unidad 1, correspondiente al Holoceno, existe una diferencia de edad bastante amplia. Una posible causa de esto puede tener relación con una baja tasa de deposición de sedimento durante ese tiempo, o, por el contrario, puede deberse a una alta tasa de erosión probablemente producida por el mismo oleaje o transgresión marina. Esta segunda suposición es más probable ya que una transgresión marina implica erosión, entonces, de no haber sedimento sobre el sitio es muy probable que este hubiese desaparecido completamente.

Por otro lado, conforme al modelo de evolución de la línea de costa en la bahía propuesto por Carabias et al. (2014), hace ~ 16.000 años el mar estaba bastante alejado de la zona (unos 7 km hacia el NW de la línea de costa actual), y fue avanzado gradualmente hacia el continente hasta sumergir por completo el sitio GNLQ1 hace ~ 11.000 años. Esto, en conjunto con las edades obtenidas para la Unidad 2 (~ 19.000 - 15.000 años) y la Unidad 3 (~ 18.000 - 13.000 años) sugerirían que estas se depositaron en un ambiente continental. Una posibilidad es que el sitio, luego de ser depositado, haya estado expuesto por ~ 5.000 años antes de ser cubierto por aguas marinas. Otra hipótesis es que el ambiente deposicional de la Unidad 2 corresponda a uno de tipo lagunar, con aporte de agua y sedimentos desde las quebradas que rodean la bahía, los cuales cubrieron el sitio y facilitaron su conservación. Es posible que, gracias a la acumulación de sedimento debido a una alta tasa de deposición, se hayan formado barreras que entramparon los ríos que corrían por las quebradas cercanas, generando una o más lagunas en la zona. Esto a su vez podría explicar el hecho de que la Unidad 2 sea más antigua que la Unidad 3, ya que los sedimentos que la componen habrían sido transportados desde otras áreas, probablemente más antiguas. Por otro lado, la posibilidad de que las Unidades 3 y 2 correspondan a un ambiente de tipo estuarial no se descarta del todo, ya que un estuario puede llegar a medir varios km de largo. En ese sentido es posible que el agua marina haya influenciado la zona mucho antes de que el sitio fuera totalmente cubierto por el mar, formando un estuario que abarcaba gran parte del área que ahora conforma la bahía. De todos modos, hay que considerar que el modelo de evolución de la línea de costa propuesto puede no ser totalmente correcto, por lo que es posible que el sitio haya sido inundado antes.

En resumen, según la estratigrafía y granulometría de los testigos T1 y T5, la historia evolutiva de la zona de estudio podría reflejar el paso de un ambiente de tipo

fluvial, a uno progresivamente inundado por el mar producto de una transgresión marina debido a la desglaciación, pasando por un ambiente de tipo estuarial-lagunar, para finalmente convertirse en uno de tipo anteplaya superior, que es el ambiente que se observa actualmente.

En relación a la caracterización del fondo marino, a través de las imágenes de sonar no fue posible establecer en que zonas afloraba o no el estrato de interés ya que no se pudo distinguir entre un tipo de sedimento y otro según tamaño de grano. Según lo visto, todo el fondo marino parece estar cubierto por una capa de arena moderna que posiblemente varía según las estaciones o épocas de mayor o menor deposición. Para lograr apreciar cambios de tamaño de grano del sedimento puede ser útil trabajar con frecuencias más altas que logren una mejor resolución de las imágenes.

Sin embargo, lo que se pudo distinguir fueron estructuras sedimentarias como óndulas y ondulitas en algunas zonas de la bahía. Gracias a las características de esas estructuras, sus tamaños, ubicaciones, orientaciones y curvatura en el caso de las óndulas, se obtuvo información con respecto a la dinámica de las olas en la zona, destacando dos corrientes en sentido horario, una que abarca toda la bahía y otra que circula solo en la punta norte, lo cual coincide con los modelos propuestos por Escobar et al. (1971) y Malet y Andrade (1991). Estas corrientes se generan gracias a la refracción y difracción de las olas que entran por la punta norte de la bahía, empujadas por los vientos provenientes del SW, que son los que predominan en la zona. También se obtuvo información respecto a zonas de mayor y menor energía del oleaje, que implicarían un mayor grado de erosión y deposición respectivamente. Esto último sirve para determinar posibles lugares donde el estrato de interés y las demás unidades podrían estar presentes. Así, las áreas donde las olas tienen una menor influencia, por ejemplo, hacia el SW del sitio GNLQ1 (transecta L2), donde predomina la aparición de ondulitas (asociadas a una menor energía del oleaje), son más propensas a una buena preservación del sedimento y por lo tanto son sectores donde podría estar presente el estrato de interés. Igualmente es posible que este alcance zonas más profundas de la bahía, donde la influencia de las olas también es menor.

A partir del análisis sismoestratigráfico se definieron 3 unidades sísmicas que abarcan gran parte de la bahía. Estas se ubican de manera subparalela al relieve del fondo marino, entre las cotas ~8 a 25 m de profundidad (en ambos sentidos, NE-SW y NW-SE) y presentan formas sinuosas. En las cercanías del sitio GNLQ1, coinciden bastante con las unidades estratigráficas definidas para el testigo T5, pero no ocurre lo mismo para el testigo T1, ubicado a ~10 m del testigo T5. Esta situación sugiere que quizás la interpretación de los perfiles no es correcta y que los reflectores no indican la presencia de estratos reales, sino que son reflejos del mismo relieve del fondo marino. También es posible que la resolución de los perfiles no sea la óptima para poder distinguir estratos tan finos (de unos pocos cm) correspondientes a las unidades estratigráficas. Se propone obtener más información estratigráfica (testigos) en las distintas zonas de la bahía para verificar la aparición y continuidad de las unidades estratigráficas y la posible relación de estas con las unidades sísmicas

definidas, ya que la estratigrafía entrega información concreta, mientras que la interpretación sísmica depende mucho de la calidad de las imágenes y los filtros utilizados.

Con respecto al equipo utilizado, es necesario recalcar que trabajar sobre arena con un perfilador sísmico es bastante difícil, ya que al tratarse de un sedimento no consolidado provoca que las frecuencias sean absorbidas y no alcancen a llegar a profundidades mayores, dificultando la distinción de posibles estructuras. Si bien el uso de filtros para una mejor visualización de los perfiles sísmicos entrega más información en profundidad, también hace que se distorsione la superficie, por lo que hay que tener cuidado con su interpretación. Es posible que estos equipos funcionen mejor en zonas más profundas y/o sobre otro tipo de suelo (más consolidado).

Por último, en relación a la preservación del sitio GNLQ1, se puede decir que este cumple con varias características que lo hacen propenso a una buena conservación. Entre ellos destacan su ubicación en un bajo topográfico, la baja pendiente de la plataforma continental en el sector, el hecho de que la transgresión se produjo por inundación de la zona y el tipo de sedimento fino y de alta cohesividad que envuelve los restos óseos. Además, según la caracterización del fondo marino, se puede decir que en el sector donde se encontró el sitio GNLQ1 existe una baja influencia de las corrientes y el oleaje en general. Finalmente, es posible que el estrato que contiene el sitio se extienda hacia zonas más profundas, donde las olas no generan tanta erosión, y que esté cubierto y protegido por una capa más potente de sedimento marino.

BIBLIOGRAFÍA

- Araya-Vergara, J. F. (1982). *Análisis de la localización de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile: Observación Preliminar*. Revista Informaciones Geográficas, N°29, pp. 35-55. Universidad de Chile, Santiago.
- Baković & Balić. (1984). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica de alcantarillado litoral norte*. Informe final y anexos. Secretaría de Planificación, V región.
- Batjes, J.A. (1974). *Surf similarity*. 14th International Conference on Coastal Engineering. Copenhagen, Denmark, p. 466-480.
- Benedet, L., Klein A. & Hsu, J. R-C. (1999). *Practical Insights and Applicability of Empirical Bay Shape Equations*. Coastal Planning & Engineering Inc., Delf University of Tecnology, The Netherlands.
- Boak, E.H. & I.L. Turner. (2005). *Shoreline Definition and Detection: A Review*. Journal of Coastal Research, 21 (4), p. 688–703.
- Carabias, D., Cartajena, I., Simonetti, R., López, P., Morales, C. & Ortega, C. (2014). *Submerged Paleolandscapes: Site GNL Quintero 1 (GNLQ1) and the First Evidences from the Pacific Coast of South America*. Springer, Science+Business Media, New York.
- Cartajena, I., López, P., Carabias, D., Morales, C., Vargas, G. & Ortega, C. (2013). *First evidence of an underwater Final Pleistocene terrestrial extinct faunal bone assemblage from Central Chile (South America): Taxonomic and taphonomic analyses*. Elsevier Ltd and INQUA, Quaternary International xxx, p. 1-11
- Castro, C. & Morales, E. (2006). *La Zona Costera. Medio Natural y Ordenación Integrada*. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica. Serie Geolibros.
- Cuevas, R. (2017). *Análisis de los depósitos sedimentarios terciarios-cuaternarios en el área de Quintero-Placilla (~33°S) y sus implicancias paleogeográficas*. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Davies, J.L. (1964). *A morphogenic approach to world shorelines*. Zeitschrift für Geomorphologie, N° 8, p. 27 – 42.
- Díaz-Naveas, J. & Frutos, J. (2010). *Geología Marina de Chile*. Comité Oceanográfico Nacional de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. Capítulo 2, p. 14-17.

- Encinas, A., Hervé, F., Villa-Martínez, R., Nielsen, S., Finger, K. L., & Peterson, D. E. (2006). *Finding of a Holocene marine layer in Algarrobo (33°22' S), Central Chile. Implications for coastal uplift*. Revista Geológica de Chile, n°33, p. 339–345.
- Escalona, F. (2014). *Procesos químicos en estuarios*. [Diapositivas de PowerPoint]. Recuperado Febrero, 2020, de <https://slideplayer.es/slide/21525/>.
- Escobar, L., Barros, P., Butenko, J., Domínguez, F. J., Karzulovic, J. & Poblete, J. A. (1971). *Estudio de facilidades portuarias para ENAMI en bahía Quintero*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 242 p.
- Espiñeira, D. (1989). *Geología del Complejo Plutónico Papudo-Quintero. Aspectos cronológicos y geoquímicos*. Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.
- ESVAL S.A. (2003). *Estudio de Impacto Ambiental: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas y Emisario Submarino en Quintero*. Disponible en <http://seia.sea.gob.cl>
- Flores, V. & Ortega, C. (2014). *Contexto geológico de la bahía de Quintero y el sitio sumergido GNL Quintero 1 (GNLQ1)*. Informe Final Proyecto Terminal GNL Quintero, en ARKA 2014: Investigación interdisciplinaria del sitio paleontológico sumergido GNL Quintero 1. Comuna de Quintero, V Región.
- Giménez, D. (2012). *Caracterización de la estructura geomorfológica y dinámica costera de las ensenadas de La Ligua, Horcón y Quintay. Región de Valparaíso*. Memoria para optar al grado de geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.
- Hasler, K. (2007). *Petrogénesis del magmatismo bimodal y metamorfismo de muy bajo grado del Cretácico inferior de la Cordillera de la Costa, Chile central (33°20'-34°00'S)*. Tesis para optar al grado de magister en ciencias mención geología. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Hattersley, R.T. & Foster, D.N. (1968). *Problems of beach erosion and some solutions*. Australian Civil Engineering. Vol 9.
- Ibarra, D. & Belmonte, F. (2017). *Comprendiendo el litoral: Dinámica y procesos*. Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones. Capítulo 1, p. 5-32.
- Instituto de Fomento Pesquero. (2016). *Determinación de los impactos en los recursos hidrobiológicos y en los ecosistemas marinos presentes en el área de influencia del derrame de hidrocarburos de Bahía Quintero, V Región*.

Informe Final, División de investigación pesquera, Línea de investigación n° 2: Oceanografía, p. 155-297. Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.

Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. Segunda Edición, PrenticeHall, Englewood Cliffs, NJ, p. 544.

Lambeck, K., Esat, T. M. & Potter, E. K. (2002). *Links Between climate and sea levels for the past three million years*. Nature, Vol. 419, p. 199-206.

Leonard, E. M. & Wehniller, J. F. Leonard, E. M., & Wehmiller, J. F. (1991). *Geochronology of marine terraces at Caleta Michilla, Northern Chile; Implications for late Pleistocene and Holocene uplift*. Revista Geológica de Chile, n°18 (1), p. 81-86.

López, N. (2016). *Patrimonio Geológico de la comuna de Puchuncaví, para la creación del Geoparque Puchuncaví, V Región de Valparaíso*. Memoria para optar al título de geólogo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

López, P., Cartajena, I., Carabias, D., Morales, C., Letelier, D. & Flores, V. (2015). *Terrestrial and maritime taphonomy: differential effects on spatial distribution of a Late Pleistocene continental drowned faunal bone assemblage from the Pacific coast of Chile*. Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg.

López, P., Cartajena, I., Carabias, D., Prevosti, F.J., Maldonado, A. & Flores, V. (2016). *Reconstructing drowned terrestrial landscapes. Isotopic paleoecology of a late Pleistocene extinct faunal assemblage: Site GNL Quintero 1 (GNLQ1) (32° S, Central Chile)*. Elsevier Ltd and INQUA, Quaternary International xxx, p. 1-8.

Malet, E. & Andrade, H. (1991). *Estudio del sistema de circulación en la bahía de Quintero (32°45'S; 71°30'W) utilizando derivadores lagrangianos con sistemas electromecánicos*. Resúmenes XI Jornadas de Ciencias del Mar, Viña del Mar, 46 p.

Mangini, S., Prendes, H., Amsler, M. & Huespe, J. (2003). *Importancia de la floculación en la sedimentación de la carga de lavado del río Paraná, Argentina*. Universidad Nacional del Litoral, Argentina. Ingeniería Hidráulica en México, Vol 3, N°3, p. 55-69.

Masselink, G. & Hughes, M. G. (2003). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Edward Arnold, London, 354 p.

Merlotto, A. & Bértola, G.R. (2009). *Evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina*. Ciencias Marinas, 35 (3), p. 271-286.

Michaud, F., Ratzov, G., Sallarès, V., Collot, J.Y., Pazmiño, N., & de la Torre, G. (2009). *Métodos e Instrumentación acústica para la exploración en*

Geofísica Marina. Geología y Geofísica Marina y Terrestre Del Ecuador, PSE-001-2009.

Ota, Y. & Paskoff, R. (1993). *Holocene deposits on the coast of north-central Chile: Radiocarbon ages and implications for coastal changes*. Revista Geológica de Chile, n°20 (1), p. 25–32.

Oxiquim. (2013). *Estudio de Impacto Ambiental Terminal Multipropósito Oxiquim, Bahía de Quintero*. Disponible en <http://seia.sea.gob.cl>

Paskoff, R. (1999). *Contribuciones recientes al conocimiento del Cuaternario marino del centro y del norte de Chile*. Revista de Geografía Norte Grande, n°26 (4).

Pérez-Alberti, A., Pirés A., Freitas, L. & Chamine, H. (2013). *Shoreline change mapping along the coast of Galicia, Spain*. Proceedings of the ICE-Maritime Engineering, 166 (3), p. 125-144.

Rivano, S., Sepúlveda, P., Hervé, M. & Puig, A. (1985). *Geocronología K-Al de las rocas intrusivas entre los 31°-32° latitud sur, Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10465, Santiago. Revista Geológica de Chile n° 24, p. 63-74.

Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R. & Espiñeira, D. (1993). *Geología de la Hoja Quillota-Portillo, V Región, escala 1:250.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

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)*. Université de Toulouse, Ph.D thesis.

Saillard, M., Hall, SR., Audin, L., Farber, DL., Hérail, G., Martinod, J., Regard, V., Finkel, RC. & Bondoux, F. (2009). *Non-steady long-term uplift rates and Pleistocenemarine terrace development along the Andean margin of Chile (31° S) inferred from ^{10}Be dating*. Earth Planet Sci Lett 277 (1–2).

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 peninsulabay system, Chile*. J S Am Earth Sci 40, p. 77–84.

Soto, M.V. (2005). *Aspectos morfodinámicos de ensenadas desalineadas del litoral de Chile central, Pichilemu y Caleta Los Piures*. Revista de Geografía Norte Grande, N° 33, p. 73-87. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

- Spada, G., & Stocchi, P. (2007). *SELEN: a fortran 90 program for solving the “Sea-Level Equation”*. Computers and Geosciences, Vol. 33 (4), p. 538–562.
- Stuardo, J., & Valdovinos, C. (1989). *Estuarios y lagunas costeras: ecosistemas importantes del Chile central*. Departamento de Oceanología, Universidad de Concepción. Ambiente y Desarrollo, Vol. V, N° 1, p. 107-115.
- Sturt, F., Flemming, N.C., Carabias, D., Jöns, H. & Adams, J. (2018). *The next frontiers in research on submerged prehistoric sites and landscapes on the continental shelf*. Elsevier Ltd, The Geologists' Association, 129, p. 654–683.
- Sweers, K. B. (1999). *Equilibrium Bays. A numerical study after the behaviour of equilibrium bays*. Subfaculty of Civil Engineering Hydraulic Engineering Section.
- Tavera, J. (1960). *El Plioceno de Bahía Horcón en la provincia de Valparaíso*. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- 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.
- Vargas, G. & Ortega, C. (2008). *Contexto geomorfológico y análisis sedimentológico preliminar de muestras de la Bahía Quintero, V Región*. Informe Proyecto Terminal GNL Quintero, en ARKA 2008: Evaluación arqueológica subacuática del sitio GNL Quintero 1. Septiembre, 2008.
- Villagrán, C. P. (2007). *Dinámica costera en el sistema de bahías comprendidas entre Ensenada Los Choros y Bahía Tongoy, Región de Coquimbo*. Memoria para optar al título de geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía, Universidad de Chile, p. 9-20.
- Waters, M. R. (1992). *Principles of Geoarchaeology: a North American perspective*. The University of Arizona Press, United States of America, Chapter 6, p. 249-290.
- Zanuttigh, B. & Van der Meer, J.W. (2006). *Wave reflection from coastal structures*. 30th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, San Diego, USA, p. 4-8.