



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y QUÍMICA DE ARENAS FERROSAS EN YACIMIENTO TIPO PLACER, VEGAS DE ITATA, COMUNA DE COELEMU, REGIÓN DEL ÑUBLE.

Memoria para optar al Título de Geólogo

Andrés Alexander Parra Ramírez

Profesor Patrocinante : Dr. Osvaldo Miguel Rabbia Dalmaso
Profesores Comisión : Dr. Germán Enrique Velásquez Acosta
MSc. Abraham Elías Gonzáles Martínez

Concepción, 2024



*El desarrollo profesional de este trabajo es dedicado
a Eduardo Montoya Apablaza (Q.E.P.D);
empresario, minero, poeta y un soñador de la vida.
Un gran hombre cuyo legado seguirá presente en
sus familiares y cercanos.*

*El desarrollo personal de este trabajo es
dedicado a mis abuelos maternos: Marcos
Ramírez y Sylvia Carrillo; y a mi madre, Sylvia
Ramírez. Donde quiera que se encuentren,
espero estén felices y en paz. Yo los llevo por
siempre en mi corazón.*



ÍNDICE

RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS	2
1.3. TRABAJOS ANTERIORES.....	4
1.4. AGRADECIMIENTOS	7
2. FISIOGRAFÍA	8
2.1. GEOMORFOLOGÍA.....	8
2.1.1. Geomorfología regional	8
2.1.2. Geomorfología local	10
2.1.2.1. Cordón Montañoso.....	10
2.1.2.2. Valle Fluvial.....	10
2.1.2.3. Terraza Fluvial	10
2.1.2.4. Planicie litoral, playa y campo dunar.....	10
2.1.2.5. Humedal	11
2.1.2.6. Barras de arena y Flecha litoral.....	11
2.1.3. Morfología y dinámica de una playa	11
2.2. HIDROGRAFIA	15
3. MARCO GEOLÓGICO	18
3.1. GENERALIDADES	18
3.2. ROCAS METAMÓRFICAS	20
3.2.1. Basamento Metamórfico	20
3.3. ROCAS INTRUSIVAS.....	20
3.3.1. Cordillera de la Costa	20
3.3.1.1. Batolito Costero del Sur.....	20
3.3.1.2. Intrusivos Jurásicos	21
3.3.2. Cordillera de los Andes	21
3.3.2.1. Batolito Santa Gertrudis-Bullileo.....	21
3.3.2.2. Stock Granito-Diorita.....	22
3.3.2.3. Pórfido Dacítico	22
3.4. ROCAS ESTRATIFICADAS	22
3.4.1. Estratos de Pocillas-Coronel del Maule-Quirihue.....	22
3.4.2. Formación Cura-Mallín.....	23
3.4.3. Formación Trapa-Trapa.....	24
3.4.4. Formación Cola de Zorro	24
3.4.5. Formación Mininco	25
3.4.6. Formación La Montaña	25
3.4.7. Volcanes y lavas	26

3.4.7.1. Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh)	26
3.4.7.2. Volcán Antuco	27
3.5. DEPÓSITOS RECIENTES	28
3.5.1. Depósitos piroclásticos	28
3.5.2. Depósitos de Arenas del Cono del río Laja	28
3.5.3. Depósitos glaciares	28
3.5.4. Depósitos fluvio-aluviales antiguos	28
3.5.5. Depósitos coluviales.....	29
3.5.6. Depósitos litorales.....	29
3.5.7. Depósitos fluvio-aluviales actuales.....	29
4. MARCO METALOGÉNICO	30
4.1. ANTECEDENTES	30
4.2. DEPÓSITOS TIPO PLACER	30
4.2.1. Generalidades	30
4.2.2. Clasificación	32
4.2.2.1. Placer fluvial	32
4.2.2.2. Placer litoral	33
4.2.2.3. Placer eólico.....	34
4.2.2.4. Paleo-placer	35
4.3. HIERRO	35
4.3.1. Generalidades	35
4.3.2. Minerales de interés	35
4.3.3. Usos	36
4.3.4. Yacimientos tipo Placer	36
4.3.5. Metalurgia	37
4.4. TITANIO	38
4.4.1. Generalidades	38
4.4.2. Minerales de interés	39
4.4.3. Usos	39
4.4.4. Yacimientos tipo Placer	40
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	41
5.1. ETAPA DE GABINETE I.....	41
5.2. ETAPA DE TERRENO.....	41
5.3. ETAPA DE LABORATORIO.....	44
5.3.1. Secado de muestras	44
5.3.2. Análisis Granulométrico	45
5.3.3. Análisis de Densidad	45
5.3.4. Confección de briquetas, carbonización y pulidos transparentes.....	45
5.3.5. Análisis mineralógico automatizado QEMSCAN®	46
5.3.6. Análisis de magnetita por SATMAGAN	49
5.3.7. Análisis químico por FRX - EAA.....	50
5.3.8. Concentración magnética en Tubo de Davis.....	50
5.4. ETAPA DE GABINETE II	51

6. RESULTADOS	52
6.1. MORFOLOGÍA DEL DEPÓSITO	52
6.2. DESCRIPCIÓN DE SEDIMENTOS	54
6.2.1. Densidad arena total	55
6.2.2. Granulometría arena total	55
6.2.3. Granulometría de minerales metálicos	59
6.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA	60
6.3.1. Petrografía del placer	60
6.3.1.1. Muestra C1-SS	60
6.3.1.2. Muestra C2-SS	61
6.3.1.3. Muestra C3-SE	61
6.3.1.4. Muestra C4-SE	62
6.3.2. Fases minerales en arena cabeza	63
6.3.3. Magnetita en arena cabeza	66
6.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	68
6.4.1. Elementos mayores en arena cabeza	68
6.4.2. Elementos mayores en concentrado	71
6.4.3. Elementos mayores en relave	73
6.5. LEY Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS	75
6.5.1. Ley de Fe-Ti	75
6.5.2. Modelo del depósito	77
6.5.3. Estimación de recursos	80
7. DISCUSIÓN	84
7.1 INTERPRETACIONES DEL PLACER LITORAL	84
7.1.1. Extensión y distribución mineral	84
7.1.2. Categorización y cantidad de recursos	86
7.1.3. Prefactibilidad de explotación	88
7.2 POSIBLE FUENTE DE LAS ARENAS FERROSAS	91
7.2.1. Composición geoquímica de las arenas	91
7.2.2. Factores geológicos al interior de la cuenca del Itata	95
7.2.3. Factores geológicos externos a la cuenca del Itata	98
7.2.4. Ocurrencia del placer litoral: ¿Fuente muy enriquecida de Fe-Ti o mecanismos particulares del ambiente litoral?	101
8. CONCLUSIONES	106
9. PERSPECTIVAS Y PROYECCIONES	108
10. REFERENCIAS	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1. 1	Mapa de ubicación y accesos a Vegas de Itata	3
1. 2	Mapa con región de estudio, área de estudio y ubicación de pertenencias mineras.....	4
2. 1	Mapa geomorfológico de la región en estudio	8
2. 2	Mapa geomorfológico del área en estudio	9
2. 3	Cordón dunar al interior de pertenencias mineras	11
2. 4	Perfil esquemático para una sección de playa	12
2. 5	Mecanismos de transporte de sedimentos en la zona de playa de Vegas de Itata	15
2. 6	Hidrografía y relieve de la región de estudio	16
3. 1	Mapa geológico de la región de estudio	19
4. 1	Sección idealizada de playa para la acumulación de arenas negras	34
5. 1	Parte de materiales utilizados	42
5. 2	Mapa con la ubicación del total de calicatas de recolección de muestras y puntos de control realizados en el terreno	43
5. 3	Horno eléctrico para el secado de muestras.....	44
5. 4	Equipos utilizados para el análisis granulométrico	45
5. 5	Equipos y elementos utilizados en la etapa confección y análisis de cortes pulidos transparentes	46
5. 6	Equipo QEMSCAN® del Instituto GEA.....	47
5. 7	Esquema del proceso de Mineralogía Automatizada	48
5. 8	Equipo y elementos utilizados para cuantificación de magnetita.....	49
6. 1	Secciones esquemáticas de perfil de playa trazadas sobre las pertenencias mineras en estudio.	52
6. 2	Detalle de la recolección de muestras en las labores de exploración de las pertenencias mineras.....	53
6. 3	Granos minerales de las arenas en estudio vistas en lupa x5.....	54
6. 4	Correlación entre clasificación de sedimentos por tamaño de grano de Wentworth (1922) y las mallas ASMT.....	57
6. 5	Medición de granos metálicos a partir de imagen SIAMS	59
6. 6	<i>Particle Mineral Analysis</i> (PMA) realizado por QEMSCAN	66
6. 7	Modelado por secciones verticales del depósito	78
6. 8	Modelo del yacimiento de placer litoral interpretado en el estudio	79
6. 9	Clasificación de recursos y reservas minerales	80
6.10	Recursos estimados de las pertenencias mineras en estudio	82
7. 1	Mapa con las gráficas de proporción mineral de cada muestra	84
7. 2	Cambios estacionales de mareas y perfil de playa.....	87

7. 3	Esquema para cadena de procesos en la recuperación de Fe.....	90
7. 4	Cantidad mineral promedio entre las cuatro muestras de arenas.....	92
7. 5	Gráficos de cantidad de óxidos de elementos mayores en relaves	93
7. 6	Diagrama TAS con la ubicación de las muestras de arenas fracción relave	94
7. 7	Diagrama de Herron (1988), para clasificación de sedimento	95
7. 8	Tipos de rocas presentes en la cuenca del Itata	96
7. 9	Desembocadura del río Itata	97
7.10	Ubicación de factores geológicos externos a la cuenca del Itata	99
7.11	Dirección de corrientes en la desembocadura del río Itata	103
9. 1	Plano con zona valorizable tras estudio morfodinámico del área	108

ÍNDICE DE FOTOMICROGRAFÍAS

Fotomicrografías	Página
6. 1 Vista en microscopio de muestra C1-SS	60
6. 2 Vista en microscopio de muestra C2-SS.....	61
6. 3 Vista en microscopio de muestra C2-SS.....	61
6. 4 Vista en microscopio de muestra C3-SE	62
6. 5 Vista en microscopio de muestra C4-SE	62
6. 6 Vista en microscopio de muestra C4-SE	63

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
6. 1 Distribución de sedimentos según mallas ASTM	63
6. 2 Frecuencia acumulada de las muestras en estudio	63
6. 3 Distribución de sedimentos de las muestras de arena según clasificación por tamaño de grano de Wentworth (1922)	66
6. 4 Contenido mineral según porcentaje en volumen para cada muestra	75
6. 5 Determinación de magnetita en SATMAGAN	78
6. 6 Proporción del contenido de óxidos principales en arena cabeza	81
6. 7 Proporción del contenido de elementos mayores en la arena cabeza	82
6. 8 Proporción de contenido de óxidos principales en concentrado	84
6. 9 Proporción de contenido de elementos principales en concentrado	85
6.10 Proporción de contenido de óxidos principales en relave	86
6.11 Proporción de elementos mayores en relave	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
4. 1	Minerales pesados comunes en depósitos tipo placer	31
4. 2	Menas de hierro y sus características	36
4. 3	Menas principales de titanio y sus características.....	39
5. 1	Datos de las muestras recolectadas en terreno	42
5. 2	Procedimientos y lugar de realización para la etapa de laboratorio	44
5. 3	Parámetros operacionales de Tubo de Davis	51
6. 1	Densidad de muestras de arenas.....	55
6. 2	Resultados del tamizado por mallas ASTM	55
6. 3	Distribución porcentual de sedimentos según clasificación por tamaño de Wentworth (1922).....	58
6. 4	Estadística granulométrica de menas metálicas según eje corto	59
6. 5	Estadística granulométrica de menas metálicas según eje largo	60
6. 6	Reporte de fases minerales identificadas por QEMSCAN en las muestras de arenas	64
6. 7	Datos de calibración y lecturas de muestras por SATMAGAN	67
6. 8	Integración entre los datos de magnetita de SATMAGAN y los datos mineralógicos de QEMSCAN.....	68
6. 9	Reporte del contenido de óxidos en arena cabeza	69
6. 10	Reporte de contenido de elementos mayores en arena cabeza.....	70
6. 11	Reporte de contenido de óxidos en concentrado	71
6. 12	Reporte de contenido de elementos mayores en concentrado.....	72
6. 13	Reporte de contenido de óxidos en relave.	73
6. 14	Reporte de contenido de elementos mayores en relave	74
6. 15	Cálculo de %DTT en el balance de masas por separación magnética	75
6. 16	Reporte de la cantidad y ley de hierro en los sólidos generados por DTT ..	76
6. 17	Reporte de la cantidad y ley de titanio en los sólidos generados por DTT..	76
6. 18	Parámetros para el cálculo de recursos ($\bar{x}$: promedio).....	81
6. 19	Reporte de volumen y tonelaje de recurso mineral por sector y capa.....	83
6. 20	Reporte de tonelaje por tipo de recurso y pertenencia minera	83
7. 1	Estándares de concentrados de hierro comercial y su comparación con los concentrados de las muestras en estudio	89
7. 2	Valores de venta estimados en función de los datos de tonelaje y precio de los metales a fecha de marzo 2024.....	91

RESUMEN

Los depósitos sedimentarios de tipo placer son formados por la meteorización y erosión de un depósito primario, concentrando minerales de elevado peso específico en zonas específicas, formando así yacimientos de gran potencial económico explotados a nivel mundial, como los placeres auríferos, diamantíferos, de estaño, titanio, entre otros. Las acumulaciones de arenas pesadas en la costa dan origen a depósitos de placer litoral. En Chile hay reportes y explotación de este tipo de yacimientos con enriquecimiento de titanio o hierro, tanto en la zona norte como la zona sur y austral. Para la zona centro-sur del país, solo se cuenta con el antecedente de arenas titaníferas en playa Blanca, península de Coliumo.

Este estudio surge de la necesidad de corroborar la presencia de minerales de hierro y titanio, su distribución y cantidad en volumen, en dos pertenencias mineras establecidas legalmente en el sector de costa de la localidad de Vegas de Itata. Estas pertenencias están denominadas como San Sebastian y San Expedito, ubicadas en las coordenadas UTM 18S 5.969.050 – 5.966.550 N y 690.400 – 691.200 E.

Se plantea como objetivo realizar una caracterización mineralógica y química, a través de 3 etapas principales: terreno, laboratorio y gabinete. La etapa de terreno consiste en la excavación de 18 calicatas en la zona de playa: 4 de muestreo y 14 de observación (puntos de control). Se recolectan 4 muestras de 15 kg, equidistantes 600 m entre sí, 2 en cada pertenencia, además de recopilar descripciones de la geomorfología del sector litoral. Para la etapa de laboratorio, las muestras de arena son transportadas hasta el Instituto GEA de la Universidad de Concepción, para llevar a cabo análisis de granulometría, densidad y confección de 4 briquetas para el análisis mineralógico automatizado por QEMSCAN. También se realizan mediciones con equipo SATMAGAN, en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción, para la cuantificación de magnetita. Para el análisis químico, una fracción de las arenas es enviada a la empresa SGS en Santiago, donde realizan concentración magnética por DTT y aplican mediciones por XRF-EAA a los 3 sólidos generados: arena alimentación, concentrado y relave. Finalmente, la etapa de gabinete, consiste en recopilar toda la información, generar los reportes con los datos, obtener leyes minerales, ubicar el depósito a partir de la elaboración de un modelo 3D simple utilizando Leapfrog Geo y QGIS, permitiendo así estimar los tonelajes, y teorizar sobre el origen de la mineralización metálica.

La observación de terreno a partir de las calicatas y los datos físicos de las arenas muestran que estas se desarrollan de forma masiva a lo largo de la berma en las dos pertenencias, desarrollando una capa superficial enriquecida en minerales pesados (Nivel A), que posee un tamaño de grano entre arena fina/media (32/54%), y una capa que la infrayace con menor cantidad de estos minerales y mayor tamaño de grano (Nivel B), predominando el tamaño de arena media (67%). Para la fracción metálica, su tamaño de grano promedio medido (141-191 μm), corresponde al rango de arena fina.

La caracterización mineralógica llevada a cabo por QEMSCAN determina que las principales fases minerales que componen las arenas son en promedio olivino (38,4%), piroxeno-anfibol (20,5%), plagioclasa (13%), clorita (8,7%) y epidota (7,0%). La muestra C2-SS, que es representativa del Nivel A, posee el mayor contenido de óxidos de hierro (19,6%) y de ilmenita (2,72%). Se determina que la principal fase mineral de hierro es magnetita (11,7%) seguido de hematita, mientras que la de titanio es ilmenita, seguido por cantidades menores de esfero y rutilo. La separación magnética por DTT permiten obtener un concentrado por cada muestra de arena, llegando a alcanzar una ley mineral de 51,9-58,5% de hierro y 4,03-6,42% de titanio. Los valores máximos de estas leyes son reportados por la muestra C2-SS, ubicada en la capa superficial enriquecida de la playa.

El modelo 3D del depósito establece una berma de 2.500 m de largo por 30 de ancho en promedio, mientras que en profundidad se proyecta un nivel A de 20 cm de potencia en promedio, y un nivel B de 1 m de potencia en promedio. Estos datos junto a la densidad determinada por laboratorio, permite estimar como recursos identificados un tonelaje de 11.248 t. de hierro y 3.714 t. de titanio y como recursos inferidos 19.318 t. de hierro y 6.166 t. de titanio.

El origen geológico de este placer y de la mineralización metálica, se asocia a la combinación de mecanismos particulares de alta energía de la zona costera de la desembocadura del río Itata, como corrientes litorales y marejadas de invierno; junto con el aporte de sedimentos de rocas volcánicas de la cordillera andina, que es compatible con la alta presencia de olivino, piroxenos, liticos volcánicos y magnetita, y de rocas metamórficas e intrusivas de la Cordillera de la Costa, fuente de los óxidos de titanio.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio ha sido solicitado y financiado por los dueños de dos pertenencias mineras no explotadas, San Sebastián y San Expedito, en el sector de Vegas de Itata de la región del Ñuble, con el fin de confirmar la presencia de minerales de interés y valorizar estos depósitos de arenas ferro-titaníferas. En el pasado, el bajo precio del hierro causó que no prosperara el desarrollo de faenas en este sector, posteriormente, un análisis químico realizado en 2019 de un concentrado magnético obtenido de forma artesanal con un imán, de las arenas ya mencionadas, registró un contenido elemental de ~60% de Fe y ~8% de Ti (%Vol.). Este depósito correspondería a un placer litoral, formado a partir de sedimentos provenientes de las rocas costeras y del interior de la cuenca del río Itata, los cuales son acumulados en la costa por los agentes activos del océano (olas, mareas, corrientes marinas) y el viento. En el norte de nuestro país se han explotado yacimientos de este tipo, como el proyecto Chispita Dorada de explotación de concentrados de magnetita de arenas negras, ubicado en caleta Hornos, Región de Coquimbo. Hacia el sur, en la región del Biobío, se ha identificado y estudiado el yacimiento de arenas titaníferas en Playa Blanca, a 30 km al NNE de Concepción, cercano a la localidad de Tomé, descrito por Collao *et al.* (1982), tesis y cursos de la asignatura de Geología de Campo II de la Universidad de Concepción. A partir de los antecedentes expuestos, esta memoria tiene como objetivo realizar una labor de caracterización mineralógica y elemental en el área de estudio, mediante la elaboración de calicatas, toma de muestras y análisis de laboratorio de las mismas, con el fin de determinar una ley para el yacimiento y su prefactibilidad para la explotación. Sumado a esto, con la información de terreno y geoquímica, se describirá el potencial origen y contexto geológico para la acumulación de los granos minerales portadores de metales de interés. De ser positivos los resultados, el proyecto minero a realizar es distinto a la minería convencional, los procesos son netamente mecánicos, sin uso de químicos y/o explosivos, con mínimo impacto ambiental (Van Gosen *et al.*, 2014), además de potenciar el sector laboral de las caletas aledañas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Caracterizar mineralógica y químicamente las arenas ferrosas del margen actual del sur de Chile.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar las especies minerales que componen a las arenas ferrosas del área de estudio, en las pertenencias mineras San Sebastián y San Expedito en el sector Vegas de Itata (Ñuble).
- Determinar la cantidad de Fe y otros elementos de interés como Ti presentes en las arenas y obtener una ley representativa.
- Cubicar el depósito de placer mediante la elaboración de un modelo 3D, calculando sus dimensiones y tonelaje de recursos.
- Analizar la prefactibilidad de una eventual explotación y sugerir un mecanismo de recuperación del mineral de Fe de las arenas.
- Hipotetizar sobre la forma de acumulación y el potencial origen geológico del recurso mineral reconocido.

1.2. UBICACIÓN Y ACCESOS

La localidad Vegas de Itata se encuentra en la ribera sur del río Itata a menos de un kilómetro de su desembocadura, ~28 km al NW de Coelemu y 60 km. al NE de Concepción, Provincia de Itata en la Región del Ñuble (Figura 1.1). Desde Concepción se puede acceder a la localidad citada por dos caminos, uno por la costa y otro por el interior. El primero es más corto (60 km), pero en peor estado, debido a que sus últimos 20 km están sin pavimentar y con fuertes pendientes. Se requiere salir de Concepción por la ruta 150 hacia Penco, en Penco se debe conducir en dirección norte hacia Tomé por la ruta 150, la misma indicación se tiene que realizar ahora hasta Dichato por la ruta O-14-N y seguir conduciendo hacia el norte por la misma hasta llegar a Vegas de Itata. El segundo camino más largo (89 km), pero de mejor calidad, debido a que está asfaltado casi en su totalidad, a excepción de unos pocos kilómetros finales antes de llegar a Vegas de Itata. Se requiere salir de Concepción por la ruta 150 en dirección a Penco, antes de llegar a dicha ciudad se debe pasar a la ruta 152 (Autopista del Itata) y seguir hasta antes del peaje Agua Amarilla, acá se debe tomar la rotonda e incorporarse a la ruta 158 hacia el norte hasta Rafael, en Rafael se debe seguir conduciendo hacia el norte por la ruta 126 hasta Coelemu, y en Coelemu hay que conducir hasta el puente que la une con Maitenco y tomar la ruta N-14-O, la cual sigue hacia la costa por la ribera sur del río Itata y llega a la localidad de Vegas de Itata.

Desde Chillán se debe salir de la ciudad hacia el SW por la ruta 5, a la altura de Mirador se incorpora a la ruta 152 hasta llegar a Nueva Aldea, ahí se debe tomar la ruta O-66-N y O-10 hasta llegar a Coelemu, para finalmente seguir por la ruta N-14-O hasta Vegas de Itata.

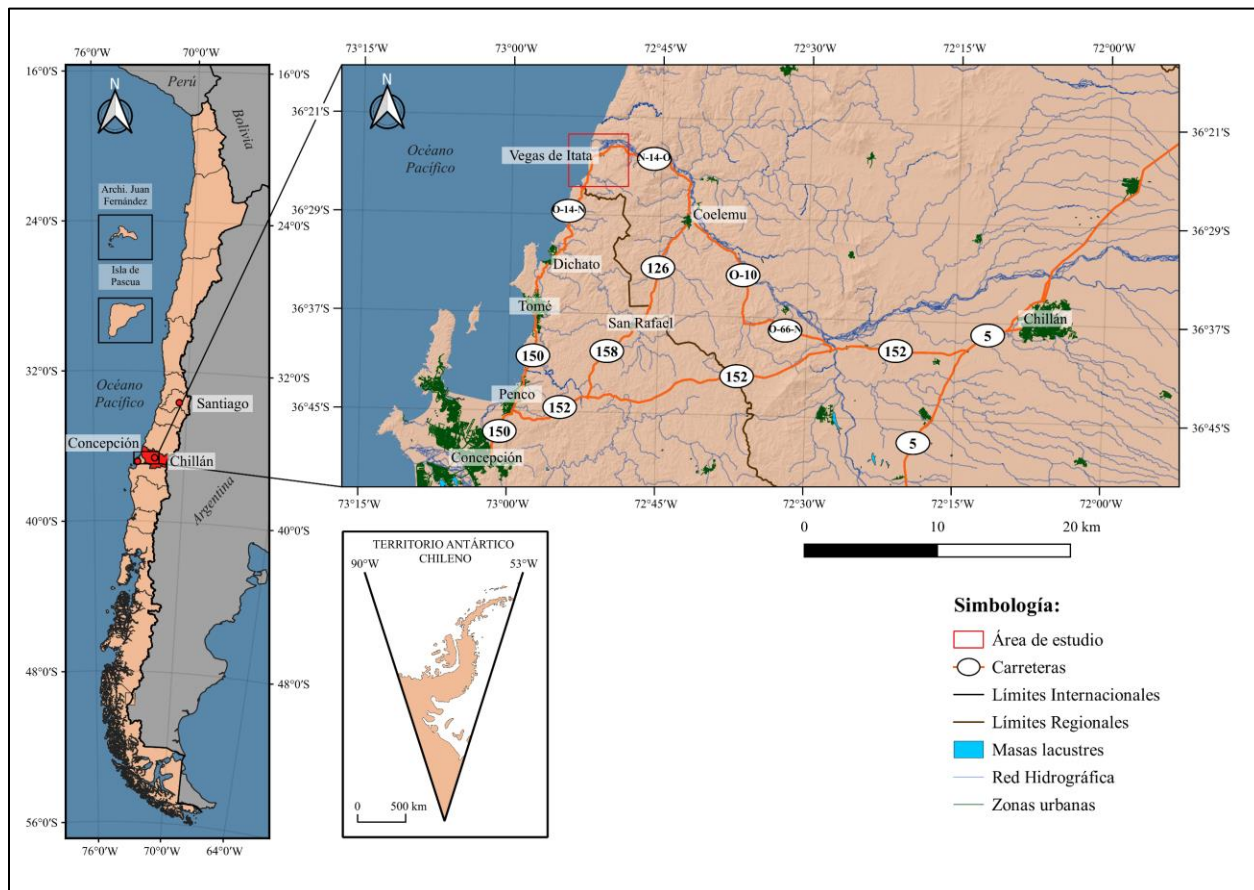


Figura 1.1 Mapa de ubicación y accesos a Vegas de Itata.

Las dos pertenencias mineras involucradas en este estudio, San Sebastián y San Expedito, se ubican en la costa del sector Vegas de Itata. Están localizadas entre las coordenadas UTM 5.969.050 - 5.966.550 N y 690.400 - 691.200 E, Provincia de Itata en la Región del Ñuble. Ambas pertenencias se encuentran debidamente inscritas y con sus patentes al día. El área de estudio corresponde a un cuadrante que incluye toda la ribera sur de la desembocadura del río Itata, sector donde se ubican las pertenencias mineras, parte de la ribera norte y una parte de la Cordillera de la Costa en el sector SE. Debido a que las pertenencias están emplazadas en el sector de playa y costa, y que, por el mismo motivo, los granos minerales depositados son aportados en su mayoría del transporte fluvial de la cuenca interior, es necesario incluir en el estudio un análisis rápido de la cuenca del río Itata, además del sector costero adyacente. La extensión de la cuenca del río Itata, según lo definido por

DGA (2019), se estrecha en su desembocadura, dejando fuera de dicha área a las pertenencias mineras, como parte del borde costero. Por este motivo, se define como región de estudio, un espacio que comprende toda la extensión de la cuenca del río Itata, más la extensión de la región del Ñuble, como se ilustra en la figura 1.2.

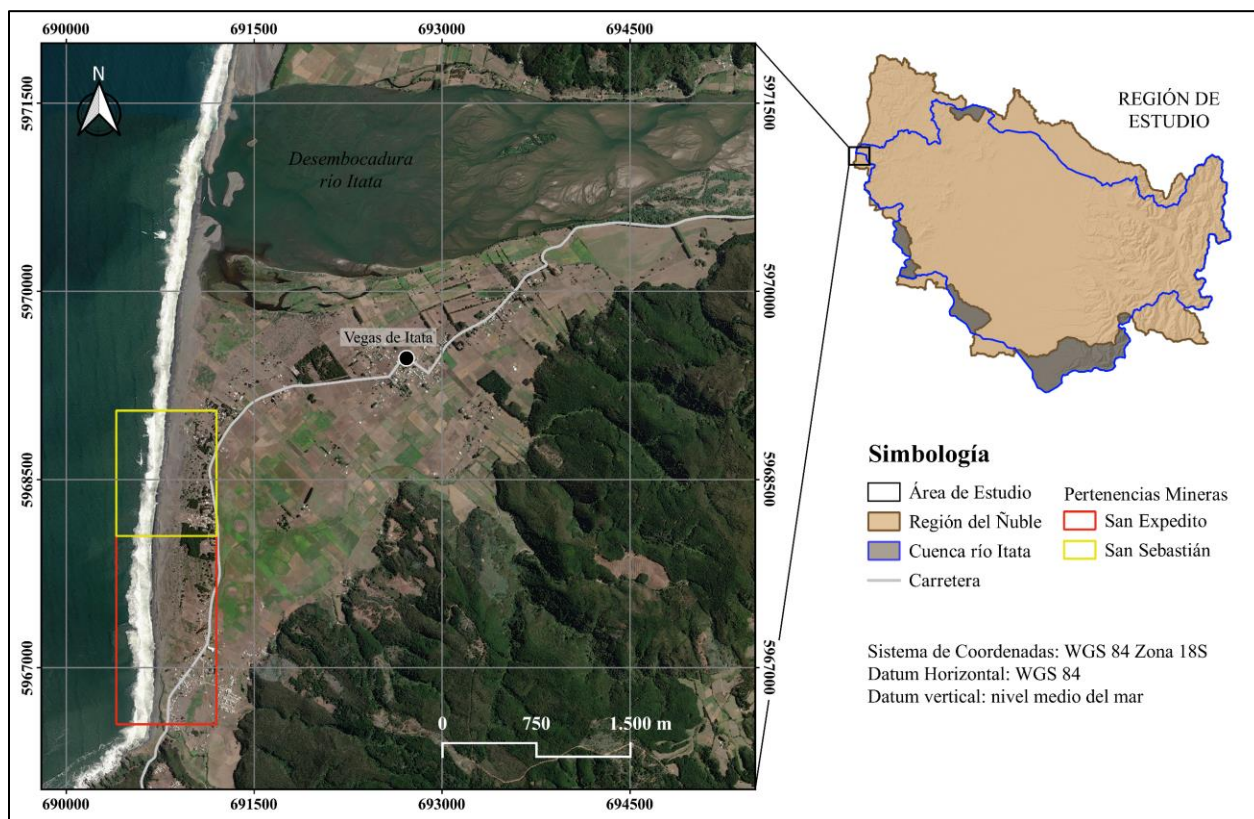


Figura 1.2 Mapa con región de estudio, área de estudio y ubicación de pertenencias mineras San Sebastián y San Expedito.

1.3. TRABAJOS ANTERIORES

D' Aubarede, G (1968). Realiza una labor de recopilación de antecedentes acerca de recursos minerales de Chile, teniendo en cuenta factores de geología, mercado de minerales y tecnología mundial. Entre los recursos analizadas están bentonita, diatomita, magnesio y titanio.

Vergara, C (1968). Efectúa un análisis mineralógico de arenas en 5 playas del sector norte de Concepción, llevando a cabo análisis granulométrico, variaciones del contenido de minerales de la fracción pesada, fuentes de origen y distribución de ellos.

Gajardo, A (1981). Confecciona la geología de la Hoja Concepción-Chillan, entre los 36-37°S y al oeste de los 71°30', a escala 1:250.000. Abarca el sector noroccidental de la región del Biobío y gran parte de la región del Ñuble.

Collao *et al.* (1982). Describen la mineralogía y aspectos texturales de la fracción metálica enriquecida en Fe-Ti de dos áreas de la región del Biobío. Un paleoplacer ubicado en Punta Tucapel, Lebu, y un placer de playa, en Playa Blanca, Península de Coliumo. En ambos se determina la presencia de ilmenita, titanomagnetita y rutilo.

Collao *et al.* (2000). Llevan a cabo una evaluación de los recursos metálicos de la Región del Biobío, integrando la geología y metalogénesis del área de estudio para identificar los sectores de mayor potencial económico en cuanto a la mineralogía metálica, a través de estudios de geoquímica orientativa.

Valderrama (2008). Realiza un estudio de caracterización y concentración gravitacional de minerales de titanio contenidos en arenas de playas de la Región de Atacama. Identifica que los principales componentes son cuarzo, feldespato, ilmenita y rutilo, y obtiene leyes de TiO_2 en concentrado de 46,0 - 51,3%.

Del Campo (2010). Cuantifica los tiempos de transporte de sedimentos en la cuenca del río Ñuble utilizando fraccionamientos isotópicos en disequilibrios de la serie uranio-238 en muestras del río del mismo nombre, determinando que la principal fuente sedimentaria son las rocas volcánicas de las Formaciones Cola de Zorro, Trapa-Trapa, Cura-Mallín, y determinando un tiempo de residencia máximo de $\sim 14 \text{ m a}^{-1}$ (20 km en ~ 1400 años).

GESEMEX (2011). Elaboran una DIA (Declaración de Impacto Ambiental) para un proyecto minero de extracción, procesamiento y exportación de mineral de hierro, obtenidos a través de la concentración de arenas ferrosas en el sector de Caleta Caramucho, Región de Tarapacá. Compila la cadena de procesos para producir 40.000 TM/mes por un presupuesto de inversión de USD\$ 2.000.000 (Construcción, montaje y puesta en marcha).

Van Gosen et al. (2014). Recopilan antecedentes acerca de los depósitos de arenas pesadas o *heavy sands* en ambientes costeros alrededor de todo el mundo, siendo un manual por parte de la USGS para entender el modelo típico de estos placeres, mineralogía asociada, mecanismos de acumulación, principales yacimientos, rocas fuentes, efectos de la explotación, entre otros factores asociados.

Carvajal (2018). Estudia y valora el prospecto de Cayucupil, Región del Biobío, el cual corresponde a un placer aurífero desarrollado en depósitos aluviales. A través de muestreo de sedimentos junto a análisis químico (XRF, AAS, de REE), caracteriza el depósito y determina una ley promedio de $0,01367 \text{ g/m}^3$, calificado como de baja o nula concentración económica.

Collao et al. (2019). Estudian la mineralogía de ocurrencias de elementos de tierras raras radiactivos en el batolito paleozoico de Chile sur-central, detectando su presencia por medio de microscopía óptica, análisis XRF y EMPA. En sus antecedentes, describen los depósitos litorales de Fe-Ti de la Región del Biobío.

DGA (2019). Evalúan la calidad de las aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y del Biobío por medio de recolección de muestras de pozos y análisis químicos. Complementariamente reúnen características geomorfológicas, geológicas, hidrográficas, climáticas e hidrogeológicas de ambas regiones.

Valderrama et al. (2021). Evalúan la validez de estimadores utilizados por la compañía CAP minería para la determinación de propiedades magnéticas de minerales de hierro. Para ello realizan una recopilación de varios parámetros y conceptos de la aplicación de equipos DTT, SATMAGAN y concentraciones de hierro comerciales.

García et al. (2022). Elaboran una recopilación de antecedentes del potencial de recursos minerales en el *offshore* chileno, dado que el subsuelo marino comprendido por la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Chile tiene condiciones propicias para originar y hospedar depósitos minerales. Entre los depósitos minerales no-energéticos más significativos postulan los placeres de oro y titanio, que se encuentran mayoritariamente en playas y canales del sur de Chile y podrían extenderse mar adentro.

1.4. AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a don Eduardo Montoya Apablaza, dueño de las pertenencias mineras en estudio, por la confianza y brindar la oportunidad de realizar este trabajo. Lamentablemente, no nos acompaña en este plano terrenal para la fecha de finalización de este informe, pero su espíritu humano y soñador, quedará en el sello eterno de esta memoria. A Raúl Calvert, socio y amigo de Eduardo, por la confianza y apoyo entregados durante el transcurso de este estudio y las labores de terreno.

A los docentes del GEA, por su apoyo logístico y teórico para las distintas etapas llevadas a cabo. Al profesor Osvaldo Rabbia, por aceptar el rol de docente guía para el tema propuesto y sus observaciones académicas ante las consultas realizadas. Al profesor Oscar Jerez, por coordinar los análisis de laboratorio y facilitar el acceso a los equipos requeridos. Al profesor Alexey Novoselov, por generar las imágenes SIAMS y analizar las menas metálicas en detalle. A los docentes del DCT: Luis Quinzio, Abraham Gonzáles y Ramiro Bonilla, por su ayuda a responder mis dudas.

A mis amigos que conocí en la carrera. En primera instancia, a las personas que considero hermanos, Erwin e Iván, gracias por hacer estos años más alegres con su carisma, hermandad y apoyo, tanto de colegas como emocional, espero que sigan abundando las juntas, conversaciones y buenos momentos. Por siempre quedo forjado el grupo de los 3 mosqueteros. A la gente con la que tuve la oportunidad de trabajar en equipo y aprender de ellos, a Isaac, Andrés, Javier, Vicho, Seba, Diego; les deseo éxito en sus vidas profesionales y personales. A Maty, amigo de Arauco, por las charlas de fin de semana en la playa de nuestras infancias, gracias por estar ahí. A las amistades que forme viviendo en Concepción, a Pancho, Zasko, Ludo, Stick, Germán, Dracox, por las tardes y noches de *CSGO*, ocio, consejos de vida y pizzas compartidas.

A mi compañera emocional, Valentina, por dar una oportunidad de amar y compartir tiempo juntos, gracias por hacer más bonitos estos últimos años con tu compañía. Eres y serás una gran científica.

A mi núcleo familiar, los que van quedando. A mis tías, Bruna y Kathy, por hacer del hogar familiar un sitio acogedor y a mi primo, Sebastián, junto al Taro, su gato, por alegrar mis tardes con sus acciones y juegos.

2. FISIOGRAFÍA

2.1. GEOMORFOLOGÍA

2.1.1. Geomorfología regional

En la región de estudio se reconocen las cinco macro unidades morfológicas del territorio chileno (Figura 2.1), las cuales son de oeste a este: planicies litorales (marinas o fluviomarinas), cordillera de la Costa, depresión intermedia o valle central; precordillera y cordillera Andina, además de otras unidades más restringidas como llanos de sedimentación fluvial o aluvional, cuenca granítica marginal y llano central fluvio-glacio-volcánico (Börgel, 1983). En cuanto a la topografía, las máximas alturas se concentran en las dos cadenas montañosas antes nombradas, siendo el máximo topográfico de 3.156 metros ubicado en la Cordillera de los Andes.

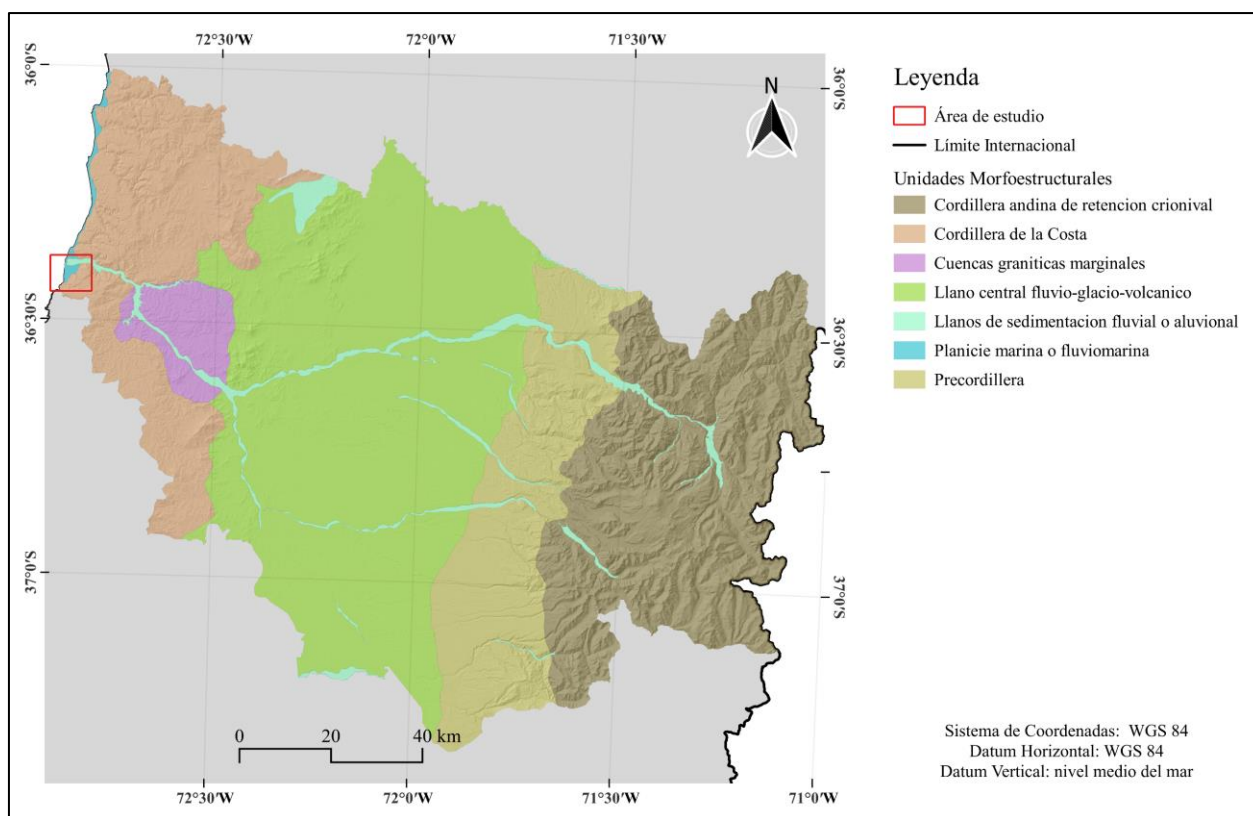


Figura 2.1 Mapa geomorfológico de la región en estudio. Modificado de Börgel (1963).

De todas estas unidades antes mencionadas, solo 3 se encuentran en el área de estudio, las cuales son: planicie litoral, Cordillera de la Costa y llanos de sedimentación fluvial o aluvional. Las planicies litorales corresponden a extensiones de áreas relativamente planas formadas por la acción

conjunta de procesos erosivos y sedimentación fluviomarina. Los llanos de sedimentación fluvial y/o aluvional son superficies planas o suavemente onduladas, conformadas por la depositación de grandes potencias de sedimentos transportados por los esteros y ríos de la región. La Cordillera de la Costa es una unidad compuesta por rocas graníticas y metamórficas del Paleozoico (Hervé *et al.*, 1987). Los cordones graníticos están afectados por un alto grado de meteorización, causando una capa arcillosa que comúnmente se conoce como “maicillo”. Esta cordillera se caracteriza por un relieve moderado que facilita la comunicación entre la depresión central y la costa (DGA-Aquaterra, 2012).

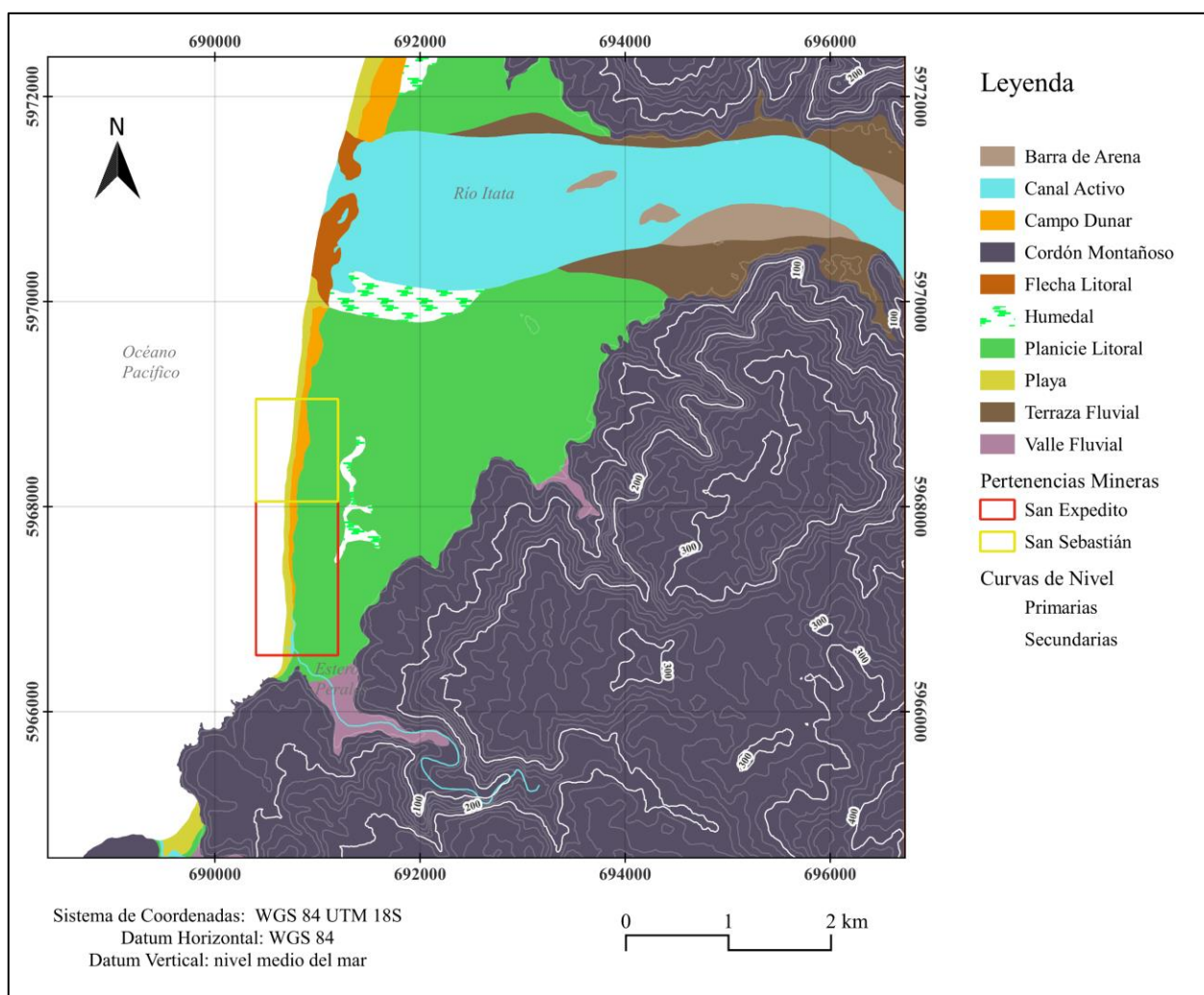


Figura 2.2 Mapa geomorfológico del área de estudio. Elaboración propia.

2.1.2. Geomorfología local

El contexto geomorfológico regional ha dado desarrollo a distintas unidades fisiográficas de mayor y menor escala identificadas en el área de las pertenencias mineras (Figura 2.2). Estos rasgos superficiales se detallan a continuación:

2.1.2.1. Cordón montañoso

Parte de la Cordillera de la Costa que aflora en el área de estudio, compuesta mayoritariamente por rocas metamórficas del Paleozoico (Hervé *et al.*, 1987). Abarca todo el sector sureste del área y alcanza una altura de 455 m s.n.m.

2.1.2.2. Valle fluvial

Formados por la acción erosiva de los cursos de agua sobre la roca. El valle más desarrollado en el área de estudio es el del río Itata, junto a más pequeños causados por esteros menores.

2.1.2.3. Terraza fluvial

Niveles planos, causados por la acción erosiva y sedimentaria de los cursos fluviales. Estas terrazas se desarrollan en los bordes de la incisión causada por el río Itata sobre la Cordillera de la Costa, y el nivel alcanza los 20 m s.n.m.

2.1.2.4. Planicie litoral, playa y campo dunar

Rasgos depositacionales con desarrollo intermitente a lo largo de la costa en el área de estudio. La planicie litoral corresponde a la fisiografía con mayor extensión, llegando a los 10 km². La playa en donde están ubicadas las pertenencias mineras tiene una extensión longitudinal de ~4 km, compuesta de arenas negras de posible origen volcánico. Hay desarrollo de campos dunares de ~2,5 km de extensión, en los cuales las dunas alcanzan una altura de ~7 m s.n.m (Figura 2.3).



Figura 2.3 Cordón dunar al interior de pertenencias mineras.

2.1.2.5. Humedal

Zonas de marismas, siendo las de mayor extensión cercanas a la desembocadura. Estos lugares cumplen la función de ser hogar de aves migratorias y acuáticas, anfibios y peces.

2.1.2.6. Barra de arena y Flecha litoral

Formas depositacionales asociadas al cauce y desembocadura del río Itata. Unas pocas barras de arenas son permanentes, siendo el resto inundadas durante los meses de invierno. La flecha litoral es dinámica y su forma cambia a lo largo del año, generada por los sedimentos del río y la deriva litoral. Cuenta con una extensión aproximada de 900 metros en la ribera sur y 500 metros en la ribera norte. Están formadas por arenas claras, las que actualmente transporta el río.

2.1.3. Morfología y dinámica de una playa

Una playa es un tipo de relieve depositacional costero, y consisten en extensiones relativamente planas de material no consolidado desarrolladas a orillas del océano, ríos o lagos. Es la acumulación más importante de sedimento a lo largo de las costas y las zonas de su desarrollo involucran condiciones de olaje, mareas, corrientes y disponibilidad sedimentaria. Los materiales que la conforman generalmente son una variedad de partículas orgánicas e inorgánicas, que van desde arenas muy finas a gravas y cantos rodados.

Un perfil del borde costero es convencionalmente dividido en zonas, basado en la morfología, hidrodinámica y procesos sedimentarios. Dentro de estas distintas divisiones, la extensión de lo

que se denomina playa comprende más de uno de estos segmentos. Los términos y límites para definir estas zonas difieren ligeramente entre los distintos profesionales que la estudian: geomorfólogos, sedimentólogos e ingenieros (Walker & Plint, 1992). Con la excepción de algunos límites y subzonas, la gran mayoría de conceptos coinciden y se tiene un modelo para esquematizar la morfología de una playa (Figura 2.4).

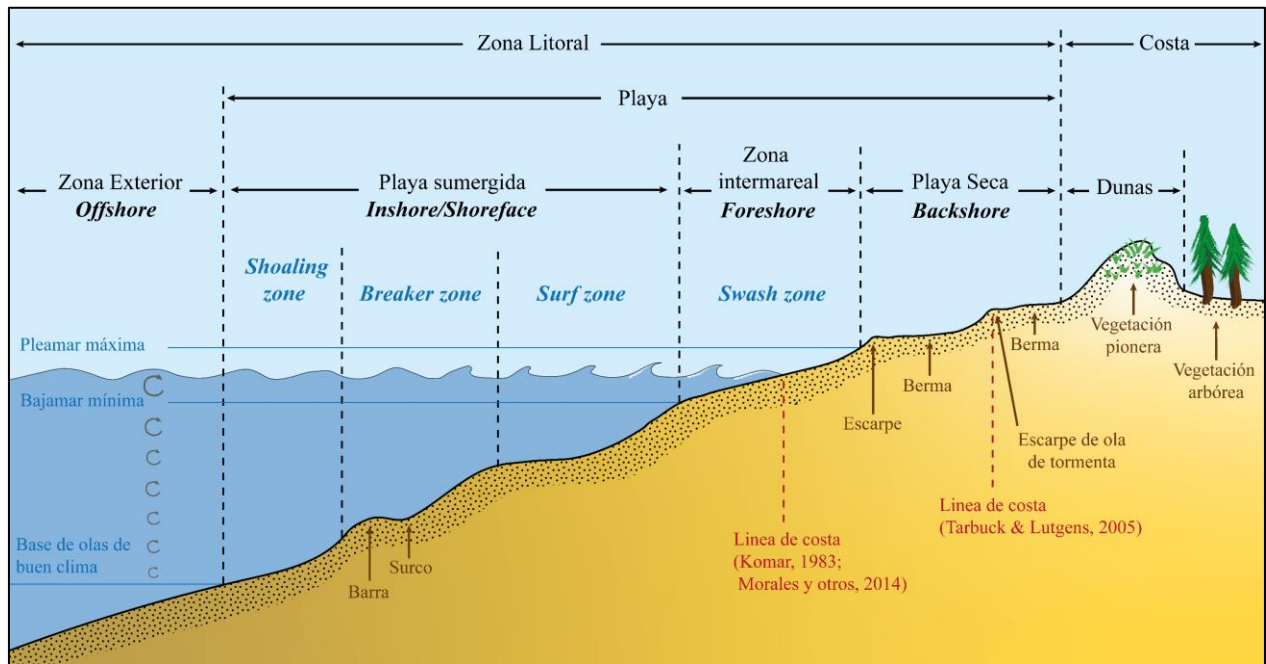


Figura 2.4 Perfil esquemático para una sección de playa. Elaboración propia a partir de los esquemas de Komar (1998), Tarbuck & Lutgens (2005), Morales *et al.* (2014) y Longhitano (2015).

- **Zona exterior (offshore):** Corresponde a una zona plana que se extiende desde el borde de la plataforma continental hasta el límite inferior del *shoreface*. Se usa para referirse a la porción de océano y olas mar adentro desde el sector de playa (Komar, 1998).
- **Playa sumergida (inshore/shoreface):** Zona de la playa que se extiende desde el nivel de oleaje de clima tranquilo hasta el nivel de marea baja o bajamar mínima (Longhitano, 2015). Como indica su nombre, esta zona está sumergida de forma permanente. En la bibliografía se la divide en 2 o 3 zonas, dependiendo el autor o el tipo de estudio, siendo estas:
 - **Shoaling Zone:** Esta zona es la más suprimida en los esquemas, ya que es incluida en la *breaker zone*. Aquí ocurre el asomeramiento de las olas, por la fricción con el lecho oceánico, el cual provoca un aumento de su altura y disminución de la longitud de onda (Prothero & Schawb, 2013).

- **Breaker Zone:** Zona de rompiente, zona donde las olas que arriban desde mar adentro alcanzan su altura máxima, se vuelven inestables y quiebran. Su límite inferior esta dado por la presencia de barras paralelas a la costa, que responden a ciclos estacionales de temporal, y su límite superior es con la zona de *surf* (Komar, 1998).
- **Surf Zone:** Zona de *surf* o remonte, es donde las olas quebradas forman un resalte (*bore*) y se desplazan hacia la línea de costa hasta la zona de *swash* (Komar, 1998). Dependiendo la pendiente del fondo marino, esta zona puede ser muy extensa o no desarrollarse.
- **Zona intermareal (*foreshore*):** Zona que se encuentra intermitentemente cubierta o libre de mar. Se extiende desde la marca de marea baja o bajamar mínima, hasta la marca de marea alta o pleamar máxima, donde comúnmente se desarrolla un escarpe y berma. Este sector contiene a la *swash zone* o zona de *swash*, que es la porción de playa donde llegan los resaltes de olas, siendo cubierta y expuesta por la ascenso y descenso de las mismas (Komar, 1998; Morales *et al.*, 2020).
- **Playa seca (*backshore*):** Zona que se extiende desde el nivel de marea alta o pleamar máxima, hasta el punto donde comienza el desarrollo de vegetación o hay cambios en la fisiografía (dunas, acantilados, etc) (Komar, 1998). Como su nombre indica, este sector de playa está permanentemente expuesto en condiciones de clima tranquilo.
- **Dunas o cordón litoral:** Acumulaciones de arena eólicas, usualmente en forma de pequeños montes o crestas, las cuales se estabilizan con el desarrollo de vegetación, y marcan el límite superior del *backshore*.
- **Berma:** Superficie horizontal en el sector de *backshore* formada por la depositación de sedimentos de las olas. Algunas playas pueden tener más de una berma separadas entre sí por escarpes. Este es el lugar donde la mayoría de gente se ubica cuando salen de paseo a las playas (Komar, 1998).
- **Escarpe:** Corte vertical provocado por la erosión de las olas, suele no superar el metro de altura (Komar, 1998).

En referencia al esquema de playa, caben a lugar un par de observaciones para tener en cuenta. Entre la zona de *offshore* y *shoreface*, suele definirse una zona llamada transición *offshore*, sobre

todo en estudios sedimentarios de océano profundo, tema que no es el objetivo principal del presente estudio, y razón por la cual se ha omitido. La *shoaling zone*, suele no ser representada y se interpreta como parte del *breaker zone*, en este caso, se ha dejado ilustrada. Sobre la extensión de lo denominado playa, existe literatura (Komar, 1983; Tarbuck & Lutgens, 2005; Prothero & Schawns, 2013) donde la acotan a *foreshore* y *backshore*, sin embargo, en Morales *et al.* 2020, extienden este límite incluyendo la zona de *shoreface* o playa sumergida, siendo esta extensión la considerada en el presente estudio. La línea de costa es un concepto sujeto a cambios de escala y tiene distintas interpretaciones. Como se ilustra en el esquema de la figura 2.4, hay autores que la posicionan en el contacto entre las olas del mar y la arena expuesta, cuya posición varía en función de las mareas. Por otra parte, Tarbuck & Lutgens (2005) la ubican en el límite de olas de tormenta, entendiendo que marca la separación entre la zona de playa que nunca se cubre por mar y las que eventualmente sí. Para el presente estudio, se tomará la primera interpretación de línea de costa.

La principal fuente de sedimento que constituyen las costas proviene de los ríos, que transportan el material erosionado de las cuencas, y en menor medida, del material derivado de la erosión directa del oleaje y transporte eólico. Las playas de arena predominan en regiones donde los ríos transportan sedimentos finos y el clima promueve la erosión de los acantilados costeros. El material depositado en las playas pasa por los procesos de intemperismo, transporte, depositación y mitificación.

Los sedimentos son transportados a lo largo de las playas debido a la acción del oleaje, las corrientes, las mareas y el viento, donde el primero es el más importante en las costas expuestas del océano Pacífico. Se estima que más del 90% del transporte de arena se produce en la zona del oleaje rompiente. Este se produce de dos formas: transporte transversal y transporte longitudinal.

- Transporte transversal: Ocurre de manera perpendicular a la línea de costa debido al oleaje de rompiente, el cual genera un flujo turbulento que pone en suspensión e impulsa los sedimentos del fondo. La magnitud del transporte depende, además de las características del oleaje, del grosor de la arena y la pendiente de la playa (Morales *et al.*, 2020).

- Transporte longitudinal: También conocido como deriva litoral, ocurre de forma paralela a la línea de costa debido a la corriente litoral producida por el oleaje. Cuando las olas son oblicuas a la costa, la rompiente produce un movimiento oscilatorio y una corriente longitudinal (Figura 2.5), usualmente inferior a 1 m/s. El transporte longitudinal es el resultado de la combinación de estas dos componentes (Morales *et al.*, 2020).



Figura 2.5 Mecanismos de transporte de sedimentos en la zona de playa de Vegas de Itata. Adaptado de Morales *et al.* (2014). [A] Transporte transversal, con frentes de olas demarcados con línea segmentada, [B] Transporte longitudinal.

Cuando estos flujos y corrientes actúan en el fondo arenoso, los granos pueden moverse a través de los mecanismos fundamentales que son **rodadura** (granos rodando sobre el lecho marino), **saltación** (granos levantados a través de saltos cortos e interrumpidos) y **suspensión** (partículas transportadas en forma independientes del lecho suspendidas en la columna de agua). El mecanismo operante sobre una partícula depende de las características de esta, tales como densidad y esfericidad, así también de la energía del flujo.

2.2. HIDROGRAFÍA

La cuenca del río Itata es un elemento de crucial interés para este estudio puesto que es la principal fuente de sedimentos para la zona litoral de las pertenencias mineras en análisis. Esta se ubica entre los 36°12' – 37°16'S y 71°00' – 73°10'W (Figura 2.6), comprende un área de 11.294 km² que abarca casi la totalidad de la región del Ñuble e incluye 5 subcuencas: Itata bajo, Itata medio, Itata alto, Ñuble bajo y Ñuble alto (DGA, 2014).

En su curso superior, el río principal se origina en la alta cordillera, en la confluencia de los ríos Cholguán desde el NE y Huépil desde el sur, donde predominan las formaciones rocosas de origen volcano-sedimentarias. Su curso transcurre por la Depresión Intermedia entre riberas bajas y cultivables, captando tributarios que constituyen la red de drenaje de la cuenca, donde destacan los ríos Danicalqui, Diguillín y Larqui (DGA, 2019).

Después sigue aguas abajo hasta su confluencia con el río Ñuble, su principal afluente, cuya hoya es de 5.097 km² (DGA, 2019). Nace al pie del paso de Buraleo, al oriente de los nevados de Chillán (3.212 m). Desarrolla su curso superior en dirección al NNW y a 40 km de su origen recibe desde

el norte su principal afluente, el río Los Sauces. Incrementan el caudal del río Ñuble esteros de escaso caudal y a poco de cruzar la Carretera Panamericana recibe por el sur, proveniente de La Montaña, el río Cato. A 10 km de su confluencia con el río Itata, afluye al Ñuble, también por el sur, otro importante afluente que es el río Chillán, que nace en la falda poniente de los Nevados de Chillán, que domina el paisaje cordillerano de la región. Tras un recorrido de 155 km, el Ñuble se junta en el borde oriental de la Cordillera de la Costa al río Itata (DGA, 2019).

En el curso inferior, desarrolla su extensión a través de la Cordillera de la Costa, en la cual recibe el aporte de esteros menores, siendo el río Lonquén el de mayor caudal. En esta zona la litología que predomina corresponde a rocas ígneas. Una vez que el curso atraviesa esta cordillera, los bancos de arena obligan al caudal a extenderse considerablemente en vegas y su profundidad disminuye. El ancho en la boca del Itata varía en verano y alcanza su mayor extensión en los meses de invierno (DGA, 2019).

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. GENERALIDADES

En la región de estudio hay diferentes unidades ampliamente descritas en la bibliografía, entre las cuales las más antiguas corresponden a rocas metamórficas de la Serie Oriental del Paleozoico superior (González-Bonorino & Aguirre, 1970), que constituyen la Cordillera de la Costa junto con las rocas plutónicas del Batolito Costero del Sur, también de esta edad, las cuales intruyen a las primeras y desarrollan un metamorfismo regional de contacto (Hervé, 1977). En discontinuidad, sobre estas dos unidades, se deposita Estratos de Pocillas-Coronel del Maule-Quirihue, compuesto de rocas volcano-sedimentarias. Hay presencia de intrusivos jurásicos en estas longitudes de la Cordillera de la Costa (Gajardo, 1981).

En la cordillera andina, se depositaron secuencias derivadas principalmente de la actividad volcánica, entre ellas las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Cura-Mallín de edad Oligoceno tardío-Mioceno Medio (Gonzales & Vergara, 1962) y Formación Trapa-Trapa de edad Mioceno Medio-Mioceno tardío (Muñoz & Niemeyer, 1984). Durante este periodo, ocurre la intrusión del Batolito Santa Gertrudis-Bullileo a partir de un magmatismo calcoalcalino (Muñoz & Niemeyer, 1984), además de intrusiones de cuerpos menores asociados a pequeños stocks y pórfidos. Sobre estas litologías se depositan las secuencias volcánicas de la Formación Cola de Zorro de edad Plioceno Superior-Pleistoceno (Gonzales & Vergara, 1962) y los edificios volcánicos recientes del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, junto a lavas jóvenes (Muñoz & Niemeyer, 1984).

Hacia la zona del valle central, se desarrollan dos secuencias sedimentarias de gran extensión areal, la Formación Mininco de edad Plioceno-Cuaternario (Muñoz-Cristi, 1960) y la Formación La Montaña de edad Pleistoceno (Muñoz & Niemeyer, 1984). Durante el Holoceno hay desarrollo de varios depósitos no consolidados en la región de estudio. En la cordillera andina se desarrollan depósitos glaciares y coluviales. Depósitos no consolidados de piroclastos y arenas del cono del río Laja se encuentran en la zona sur del Valle Central (Gajardo, 1981). De cordillera al litoral se depositan depósitos fluvio-aluviales antiguos y recientes. En la planicie litoral, se acumulan depósitos litorales.

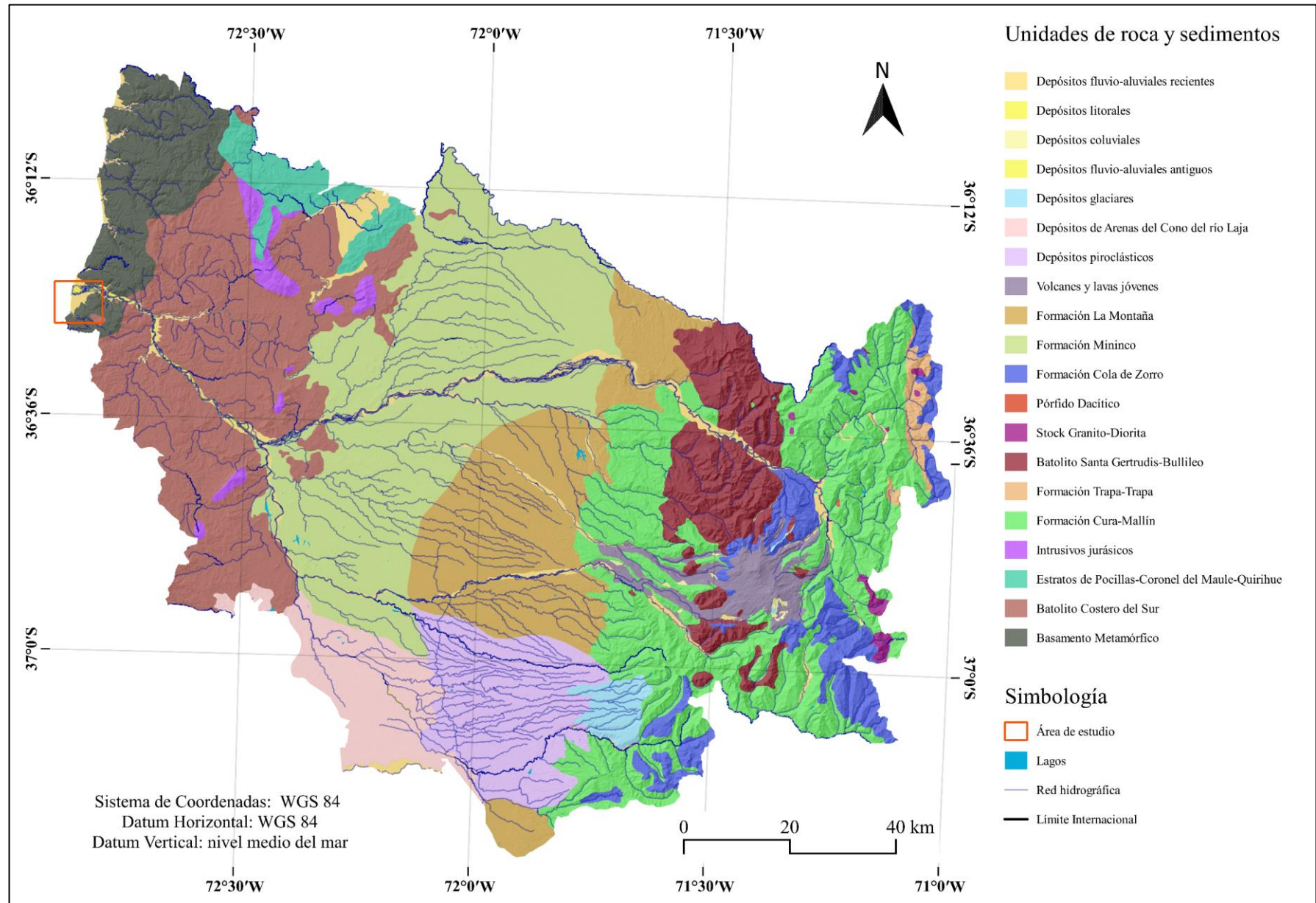


Figura 3.1 Mapa geológico de la región de estudio. Adaptado y compilado de Gajardo (1981), Muñoz & Niemeyer (1984), Naranjo *et al.* (2006), Geología de Campo II Universidad de Concepción (2013) y DGA (2019).

3.2. ROCAS METAMÓRFICAS

3.2.1. Basamento Metamórfico

González-Bonorino & Aguirre (1970) designan como Basamento Metamórfico a las rocas metamórficas que se distribuyen en la zona centro y centro-sur de Chile entre los 32° y 43°S, las cuales constituyen un paleo prisma acrecional desarrollado entre el Paleozoico Superior y el Triásico durante la subducción de corteza oceánica bajo el margen SW de Gondwana (Hervé, 1988; Hyppolito *et al.*, 2014). Consiste en una franja de 800 km de largo y ~30 km de ancho (González-Bonorino & Aguirre, 1970). Es dividido en dos subunidades por Aguirre *et al.* (1972), la Serie Occidental al oeste, asociada a un metamorfismo de alta razón presión/temperatura (P/T), y la Serie Oriental al este de baja razón P/T, formando un cinturón metamórfico pareado (Hervé, 1977). Se interpretan las series Occidental y Oriental como la representación de los productos de acreción basal y frontal respectivamente en un margen continental activo (Willner *et al.*, 2005; Glodny *et al.*, 2006).

En la región en estudio, aflora solo la Serie Oriental, la cual corresponde a facies de esquistos verdes, y está compuesta por metapsamitas, metapelitas, pizarras, filitas y esquistos micáceos, además gneises, migmatitas y rocas calcosilicatadas menos abundantes (Hervé, 1988; Vásquez, 2001). Entre la mineralogía observada en otros estudios, se han descrito blastos de moscovita y biotita, clivajes de crenulación con dominios de moscovita y biotita, y microlitones de moscovita, biotita, clorita y cuarzo (García-Sansegundo *et al.*, 2018).

3.3. ROCAS INTRUSIVAS

3.3.1. Cordillera de la Costa

3.3.1.1. Batolito Costero del Sur

Definido formalmente por Hervé *et al.* (1987), quienes agrupan bajo esta denominación a las rocas intrusivas del Paleozoico superior, ubicadas en el rango de la Cordillera de la Costa con orientación NNE-SSW, entre los 32°33'S-38°S. Está compuesto mayoritariamente por tonalitas, granodioritas y dioritas, con gabros y granitos en menor medida (Gajardo, 1981; Hervé *et al.*, 1988). Su mineralogía principal corresponde a plagioclasa, feldespato alcalino, cuarzo, biotita y hornblenda (Creixell, 2001). Como minerales accesorios, se han descrito en granitoides a los ~36°S con zircón,

apatito, esfeno y allanita (Velasquéz *et al.*, 2012). Dataciones de U-Pb en circones acotan su edad de cristalización a 320-300 Ma (Deckart *et al.*, 2014), y correspondería al remanente del arco magmático del Carbonífero Superior-Pérmico (Glodny *et al.*, 2008). Los magmas que dieron origen a estas rocas son del tipo calcoalcalinos, cercanos al manto superior y/o corteza inferior, con contaminación cortical similar en composición a las rocas metamórficas que lo hospedan según razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Hervé *et al.*, 1976; Creixell, 2001). El Batolito Costero del Sur intruye a la Serie Oriental, en la cual desarrolla una aureola de contacto con tres facies minerales, las que varían de mayor a menor grado de metamorfismo en zonas de sillimanita, andalucita y biotita (Hervé, 1977; Vásquez, 2001).

3.3.1.2. Intrusivos Jurásicos

Conjunto de cuerpos graníticos ubicados en el sector oriental de la Cordillera de la Costa, descritos por Gajardo (1981), de composición semejante a los granitoides paleozoicos y de textura más fina. Representan altos topográficos que sobresalen el nivel promedio de las rocas paleozoicas de la citada cordillera (Gajardo, 1981). Dataciones radiométricas de K-Ar efectuadas en estos intrusivos y otros emplazados en rocas triásicas al norte de los 36°S determinaron edades en el rango de 205-173 Ma. (Hervé & Munizaga, 1978).

3.3.2. Cordillera de los Andes

3.3.2.1. Batolito Santa Gertrudis-Bullileo

Extenso complejo plutónico, de orientación general norte-sur, el cual aflora en el orden de centenares de kilómetros cuadrados en el sector occidental de la Hoja Laguna del Maule (Muñoz & Niemeyer, 1984). Muñoz & Niemeyer (1984), describen que está compuesto de monzogranitos, granodioritas, monzonitas cuarcíferas, monzodioritas cuarcíferas y dioritas cuarcíferas, además de filones tardimagmáticos de composición granítica. Los mismos autores detallan que, mineralógicamente, predominan cantidades variables de plagioclasa (albita cálcica a oligoclasa sódica), cuarzo, feldespatos alcalinos, hornblenda, biotita, apatito, circón, esfeno y minerales opacos. También hay desarrollo de minerales de alteración, como clorita, epidota y sericita. Dataciones radiométricas K-Ar han determinado edades en el rango de $17,33 \pm 2,16$ Ma. y $5,8 \pm 0,3$ Ma. (IIG; MMAJ., 1981). Este batolito intruye a la Formación Cura-Mallín e infrayace en discordancia a la Formación Cola de Zorro y coladas de lavas cuaternarias (Vergara & Muñoz,

1982; Muñoz & Niemeyer, 1984). Debido a las características mineralógicas y químicas, estas rocas indican una naturaleza del magma calcoalcalina (Gardeweg, 1980; Muñoz & Niemeyer, 1984).

3.3.2.2. Stock Granito-Diorita

Constituyen a pequeños stocks, diques y sills de variada forma y dimensiones de afloramiento en la cordillera andina (Muñoz & Niemeyer, 1984). Están compuestos por sienogranitos, monzogranitos, granodioritas, tonalitas, dioritas y monzodioritas cuarcíferas (Muñoz & Niemeyer, 1984). La edad deducida para estas rocas es Mioceno medio-Plioceno inferior, basada en relaciones de contacto, ya que intruyen a Formación Cura-Mallín y están cubiertas por rocas de la formación Cola de Zorro y por coladas de lavas (Muñoz & Niemeyer, 1984). Dataciones radiométricas K-Ar realizadas a dos rocas de este grupo intrusivo indican una edad miocena media a superior (Muñoz & Niemeyer, 1984), lo cual es apoyado por dataciones previas por el mismo método (IIG; MMAJ., 1981).

3.3.2.3. Pórfido Dacítico

Agrupar a stocks, diques y sills, que afloran principalmente en el sector norte de la cordillera andina en la región del Maule (Muñoz & Niemeyer, 1984). Gran parte de los diques y sills no cuentan con las dimensiones para ser mapeables. Petrológicamente son hololeucocráticas de textura porfídica, gruesa a fina, con masa fundamental intergranular (Muñoz & Niemeyer, 1984). Mineralógicamente está compuesta de plagioclasa, cuarzo, feldespato alcalino, apatito, esfeno y minerales opacos (Muñoz & Niemeyer, 1984). La edad es deducida a partir de relaciones de contacto, asignada al rango de Mioceno medio-Plioceno inferior (Muñoz & Niemeyer, 1984).

3.4. ROCAS ESTRATIFICADAS

3.4.1. Estratos de Pocillas-Coronel del Maule-Quirihue

Unidad informal definida por Gajardo (1981), quien agrupa bajo esta denominación a las rocas sedimentarias y volcánicas que afloran en el sector noroccidental de la Cordillera de la Costa, entre los 36°05'-36°22'S. Litológicamente está compuesto de lutitas pizarrosas y areniscas, andesitas, riolitas y brechas volcánicas, chert, conglomerados de cuarzo y areniscas cuarcíferas con intercalaciones de conglomerado de cuarzo (Moreno *et al.*, 1976; Lagno, 1981). De acuerdo con el

contenido fosilífero de flora, se les asigna edad de Triásico Superior (Moreno *et al.*, 1976). El ambiente de depositación corresponde a marino-transicional (Charrier, 1979). Están dispuestas en inconformidad sobre el Basamento Cristalino y su límite superior corresponde a la actual superficie de erosión (Gajardo, 1981)

3.4.2. Formación Cura-Mallín

Definida por Gonzales & Vergara (1962), quienes identifican una unidad sedimentario-volcánica en las nacientes del río Queuco, entre los 37° y 38° S. Posteriormente fue redefinida por Niemeyer & Muñoz (1983) y ampliada hacia al sur por Suárez & Emparan (1997). Se distribuye en los principales cordones montañosos de la Cordillera de los Andes entre los 36-39° S, abarcando las regiones de Ñuble, Biobío y Araucanía (Niemeyer & Muñoz, 1983; Suárez & Emparan, 1997). Esta formación se divide en dos miembros concordantes: Miembro Río Queuco, inferior, y Miembro Malla-Malla, superior (Niemeyer & Muñoz, 1983). Litológicamente el Miembro Río Queuco está compuesto de rocas volcanoclásticas: tobas, brechas y subordinadamente, areniscas, conglomerados, lutitas y coladas de lava de varios colores. Por otro lado, el Miembro Malla-Malla está compuesto predominantemente de rocas sedimentarias: areniscas fluviales, conglomerados y lutitas lacustres, con menor cantidad de tobas, brechas, calizas y niveles carbonosos (Niemeyer & Muñoz, 1983; Flynn *et al.*, 2008). La edad de la formación, en base a estudios fosilíferos y dataciones radiométricas, se ha estimado en el rango de Oligoceno tardío-Mioceno medio (Suárez & Emparan, 1997; Jordan *et al.*, 2001; Melnick *et al.*, 2006; Flynn *et al.*, 2008; Charrier *et al.*, 2015). El ambiente de esta formación corresponde a una cuenca continental extensional, predominando para el miembro inferior una intensa actividad volcánica de carácter ácido a intermedio, mientras que hacia el techo ocurre una transición al predominio de ambientes fluviales de pie de monte y lacustres (Niemeyer & Muñoz, 1983; Radic *et al.*, 2002; Flynn *et al.*, 2008; Urrutia, 2018). Su base no se encuentra expuesta en la región (Gajardo, 1981), mientras que más al norte sobreyace a la Formación Nacientes del Teno (Niemeyer & Muñoz, 1983); e infrayace de manera concordante a la Formación Trapa-Trapa y en discordancia con las formaciones Campanario, Cola de Zorro y rocas volcánicas más jóvenes (Niemeyer & Muñoz, 1983; Jordan *et al.*, 2001; Flynn *et al.*, 2008; Charrier *et al.*, 2015). Se correlaciona con la Formación Abanico (Charrier *et al.*, 2015).

3.4.3. Formación Trapa-Trapa

Definida por Niemeyer & Muñoz (1983), aflora entre los 36 y 39° S en la Cordillera de los Andes y se distribuye en el sector oriente de la región en franjas de orientación norte-sur, formando parte de las cumbres de los cordones montañosos de media altura de la citada cordillera. Corresponde a una secuencia cuyo espesor puede superar los 1.500 m, compuesta de lavas (andesitas, andesitas basálticas, dacitas calcoalcalinas), rocas volcanoclásticas (tobas y brechas) y conglomerados, (Muñoz & Niemeyer, 1984). Dataciones radiométricas K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y estudios más modernos que integran datos geocronológicos, permiten asignarle una edad en el rango de Mioceno medio-Mioceno superior (Muñoz & Niemeyer, 1984; Jordan *et al.*, 2001). Estas rocas se depositaron en un ambiente volcánico subaéreo, con influencia fluvial (Niemeyer & Muñoz, 1983; Muñoz & Niemeyer, 1984). Se correlaciona con lavas de Huelehueico descritas por Ferraris, 1981 (Muñoz & Niemeyer, 1984) y con la Formación Farellones, que aflora entre los 33° y 36°S (Charrier *et al.*, 2015). Se dispone de manera concordante sobre la Formación Cura-Mallín e infrayace en discordancia a las formaciones Cola de Zorro y Campanario (Niemeyer & Muñoz, 1983; Muñoz & Niemeyer, 1984).

3.4.4. Formación Cola de Zorro

Definida por Gonzales & Vergara (1962), en la quebrada homónima, como una secuencia volcánica, carente de fósiles y de gran extensión areal. Predomina entre los 36° y 39°S, en los sectores aledaños a los distintos complejos volcánicos de la cordillera andina (Vergara & Muñoz, 1982; Niemeyer & Muñoz, 1983). En la región, se distribuye en una franja N-S en el sector occidental de la Cordillera de los Andes (Anavalón, 2018). Está compuesta por lavas de color gris a pardo oscuro, entre ellas andesitas, andesitas basálticas, basaltos, dacitas, además de aglomerados volcánicos y tobas (Muñoz & Niemeyer, 1984; Del Campo, 2010). La edad de la formación data, a partir correlaciones litoestratigráficas y dataciones K-Ar, en el rango Plioceno Superior-Pleistoceno (Gonzales & Vergara, 1962; Vergara & Muñoz, 1982; Muñoz & Niemeyer, 1984), sin embargo, podría extenderse a todo el Plioceno, debido a dataciones realizadas a rocas de esta formación en Argentina (Folguera *et al.*, 2004; Melnick *et al.*, 2006). El ambiente se propone como volcánico subaéreo, constituyendo extensas mesetas por acumulación de estratos subhorizontales que nivelan antiguas superficies de erosión, el cual representa parte del volcanismo del Cenozoico

superior (Vergara & Muñoz, 1982; Muñoz & Niemeyer 1984). Sobreyace en discordancia a las formaciones Rio Blanco, Cura-Mallín, Trapa-Trapa y en inconformidad a rocas graníticas, a la vez que, infrayace a rocas volcánicas cuaternarias más jóvenes y depósitos morrénicos y piroclásticos (Gajardo, 1981; Niemeyer & Muñoz, 1983; Muñoz & Niemeyer 1984).

3.4.5. Formación Mininco

Definida por Muñoz-Cristi (1960) en el río del mismo homónimo a la altura de la Carretera Panamericana. Se distribuye dentro del sector de la Depresión Central, aflorando en los valles de los ríos y esteros (Gajardo, 1981). En cuanto a su litología, Gajardo (1981) describe areniscas tobáceas con matriz de ceniza, limolitas y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas y tobas, por otro lado, en estudios recientes, se identifican areniscas con alto contenido de pómez, conglomerados, limolitas tobáceas y en menor medidas tobas (Anavalón, 2018; Encinas *et al.*, 2021). El rango de edad para esta formación no es claro y preciso, Muñoz-Cristi (1960) la asigna al Plioceno-Cuaternario, posteriormente, Ferraris (1981) por relaciones estratigráficas le asigna edad post-miocena e indica que la sobreyacen capas pliocenas. Estas rocas se depositaron en ambientes lagunares y fluviales preglaciares (Muñoz-Cristi, 1960), no obstante, estudios más recientes indican solo un ambiente fluvial para su génesis (Anavalón, 2018). Sobreyace en discordancia a Lavas del Huelehueico e infrayace, en concordancia, a Formación Banco del Laja y sin determinar, a Formación Campanario (Ferraris, 1981; Gajardo, 1981).

3.4.6. Formación La Montaña

Definida por Gajardo (1981), quien identifica bajo esta denominación a un conjunto de sedimentos, principalmente glaciares y glaci-lacustres, que conforman una serranía baja distribuida en el flanco oriental de la cordillera andina desde la región de Talca (actual del Maule) hacia el sur, invadiendo la Depresión Central. Se dispone sobre las formaciones Mininco y Cura-Mallín en discordancia, sobre el batolito Santa Gertrudis-Bullileo en inconformidad, y su límite superior varía por sectores, desde ser la superficie actual de erosión, a estar cubierto por suelo agrícola o arenas del Cono del río Laja (Gajardo, 1981; Muñoz & Niemeyer, 1984). Está compuesta de conglomerados, conglomerados arenosos, areniscas, limolitas y cenizas, de varias tonalidades (Muñoz & Niemeyer, 1984). Dentro de estas litologías, predominan los conglomerados oligomícticos, con clastos de composición principalmente andesítico-basáltica de un tamaño entre 5-20 cm (Muñoz & Niemeyer,

1984). Su edad es asignada a Cuaternario por Muñoz-Cristi (1960), posteriormente es acotada Pleistoceno inferior (Varela & Moreno, 1982) y Pleistoceno (Muñoz & Niemeyer, 1984), por las características depósito y meteorización de los clastos. El ambiente de depositación es asignado como aluvial glaciar con participación fluvial por Muñoz & Niemeyer (1984), señalando además que no se puede descartar que la sedimentación haya empezado desde el Plioceno superior.

3.4.7. Volcanes y lavas

La Cordillera de los Andes constituye una cadena montañosa de más de 7.500 km de largo, en la cual se tiene volcanismo cuaternario que se ha dividido en cuatro regiones, denominadas Zonas Volcánicas Norte (NVZ), Central (CVZ), Sur (SVZ) y Austral (AVZ), de las cuales las tres últimas se extienden por territorio chileno continental (Stern, 2004). La SVZ se extiende entre los 33° a 46°S de latitud, abarcando desde la región metropolitana hasta la región de los Lagos. La cuenca del Itata, al igual que la región del Ñuble, están dentro del área de la SVZ, específicamente en el segmento central, por lo que incorpora en su zona cordillerana al Complejo Volcánico Nevados de Chillán, y fuera del límite sur pero inmediato a él, al volcán Antuco. Además de estos volcanes activos, se tiene otros centros volcánicos inactivos en el área que son el Nevados de Longaví y Lomas Blancas, así como también al suroeste del volcán Antuco se encuentra el volcán Sierra Velluda. Todos estos centros eruptivos son representantes de la continua actividad volcánica desarrollada desde el Pleistoceno a la actualidad (Muñoz & Niemeyer, 1984), por lo que esta litología agrupa a todos los edificios volcánicos, estratovolcanes, conos piroclásticos, coladas de lavas, domos y materiales piroclásticos originados por la cadena volcánica actual de los Andes. Estas volcanitas se disponen en discordancia sobre las formaciones más antiguas Cola de Zorro, Cura-Mallín y Trapa-Trapa (Gajardo, 1981; Niemeyer & Muñoz, 1983; Muñoz & Niemeyer 1984; Varela *et al.*, 1988).

3.4.7.1. Complejo Volcánico Nevados de Chillán (CVNCh)

El CVNCh es un complejo estratovolcánico compuesto que agrupa a numerosos conos volcánicos y piroclásticos de alineación NNW, con coladas de lava asociadas. Este complejo ha comenzado su evolución desde a lo menos 640 ka a partir de la emisión de gran volumen de lavas subglaciales, según estudios geocronológicos y dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Muñoz & Niemeyer, 1984; Dixon *et al.*, 1999). Este se ha construido sobre basamento de rocas intrusivas graníticas y lavas cenozoicas.

(Dixon *et al.*, 1999). El rango composicional del CVNCh va desde andesítico-basáltico a riolítico, predominando las coladas andesíticas y dacíticas. Las coladas son de bloques, escoriáceas y piroclásticas, textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa (andesina-labradorita), clinopiroxeno (augita), ortopiroxeno (hiperstena), magnetita y ocasionalmente, olivino (Muñoz & Niemeyer, 1984; Dixon *et al.*, 1999). Las erupciones históricas de algunos de los conos del volcán Nevados de Chillán II se han registrado desde el siglo XVII (Déruelle & Déruelle, 1974) y continúan en la actualidad, bajo la forma de constantes emisiones de vapor de agua, gases y material piroclástico.

3.4.7.2. Volcán Antuco

El Volcán Antuco corresponde a un estratovolcán mixto y compuesto, el cual alcanza una altura de 2979 m s.n.m., abarca un volumen estimado de 62 km³ y su actividad se inició hace aproximadamente 150,4 ka años según dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar (Martínez *et al.*, 2017). Conforman el Complejo volcánico Antuco-Sierra Velluda, junto al volcán Sierra Velluda, que corresponde a un estratovolcán extinto y fuertemente erosionado (Moreno *et al.*, 1984). Los eventos glaciares y las emisiones de lavas de este complejo moldearon y represaron los valles glaciares dando origen al antiguo Lago Laja (Varela *et al.*, 1988). El volcán Antuco consta de dos unidades principales: un primer edificio volcánico (Antuco I) que culminó con la formación de una caldera de aproximadamente 4 km de diámetro, originando una avalancha volcánica hace aproximadamente $6,25 \pm 0,06$ ka (Lohmar, 2000), y un cono central posterior (Antuco II), que se desarrolló en el interior de la caldera (Varela *et al.*, 1988). El Antuco I está formado principalmente por andesitas basálticas de olivino y clinopiroxeno. El Antuco II, en cambio, está formado por alternancias de andesitas basálticas y piroclastos de color oscuro (Vergara & Katsui, 1969; Thiele *et al.*, 1998). Martínez *et al.* (2017), han dividido la evolución del volcán Antuco en 3 etapas principales: (A) Una fase temprana pre-Último Máximo Glaciar (LGM), que comienza a los 150,4 ka; (B) una fase tardía post-LGM entre los 16,4 y 6,2 ka; y (C) una fase post-colapso en los últimos 6,2 ka.

3.5. DEPÓSITOS RECIENTES

3.5.1. Depósitos piroclásticos

Corresponden a flujos piroclásticos de composición riolítica, asociados a colapso de calderas volcánicas. Se aprecian en la parte sur de la cuenca del río Itata (DGA-AQUATERRA, 2011).

3.5.2. Depósitos de Arenas del Cono del río Laja

Corresponden a depósitos de arenas basálticas, cuya principal área de exposición se encuentra al sur de los 37° S (Gajardo, 1981). Cubren localmente a las rocas de las formaciones Mininco y la Montaña, y su límite superior es la superficie actual de erosión (Gajardo, 1981). Están compuestos por material piroclástico, proveniente de la actividad volcánica del volcán Antuco y centros adyacentes, cuyo transporte fue mixto, tanto fluvial como eólico, el cual se depositó en la Depresión Central, debido a la disminución de la capacidad de transporte de estos agentes. Posteriores redistribuciones eólicas han originado dunas, las cuales alcanzan hasta los 6 metros de espesor (Gajardo, 1981; Ferraris, 1981).

3.5.3. Depósitos glaciares

Están compuestos de morrenas mayores de más de 100 metros de espesor, asignadas al último periodo glacial o su etapa de retroceso, y morrenas pequeñas, asociadas a los actuales glaciares de las cumbres altas. Se encuentran parcialmente desmembrados por la erosión o cubiertos por los depósitos fluviales (Muñoz & Niemeyer, 1984; DGA-AQUATERRA, 2011). Las morrenas mayores dan una morfología de lomajes suaves y están compuesto de material clástico, anguloso, predominantemente volcánico (DGA-AQUATERRA, 2011).

3.5.4. Depósitos fluvio-aluviales antiguos

Corresponden a depósitos distribuidos en los valles de los principales ríos del área de la región (Itata, Ñuble, Chillán), constituyendo amplios niveles aterrizados donde se emplazan asentamientos urbanos y que presentan, además, un buen desarrollo agrícola y ganadero (Gajardo, 1981). Están compuestos de gravas y ripios, con clastos redondeados a subredondeados de

andesitas y granitos de diámetro promedio entre 8 y 30 cms, con fracciones variables de arenas y limos. Sus espesores máximos alcanzan a 20 m (Gajardo, 1981). También hacia la cordillera andina se tiene desarrollo de estos depósitos con influencia glaciaria, como niveles de terrazas discontinuas, formadas en los principales cauces de la zona cordillerana, adosadas a las laderas de los valles, permitiendo un buen desarrollo de suelo y vegetación. Están relativamente bien estratificados, mal seleccionados e inmaduros, con clastos de tamaño bloque, grava y arena (Muñoz y Niemeyer, 1984).

3.5.5. Depósitos coluviales

Son frecuentes en toda la zona de la cordillera, localizándose en laderas de fuerte pendiente y sin vegetación, de los valles de origen glacial. Son muy inmaduros y los componen fragmentos rocosos, provenientes de las partes altas de las laderas, generalmente monomícticos y angulosos. Tienen forma de abanico irregular que, a causa de la inestabilidad gravitacional o por saturación de agua, provocan derrumbes (Muñoz & Niemeyer, 1984).

3.5.6. Depósitos litorales

Hay importante desarrollo de terrazas de abrasión marina generadas durante el Cuaternario (Gajardo, 1981). Están cubiertas por sedimentos arenosos y limosos, parcialmente estratificados, compuestos por material proveniente de erupciones volcánicas de la Cordillera Andina (Gajardo, 1981). Se disponen a alturas máximas de 15 m.s.n.m. (Gajardo, 1981)

3.5.7. Depósitos fluvio-aluviales actuales

Corresponden a materiales no consolidados, representados por gravas, ripios y arenas, que constituyen el relleno actual del cauce de los ríos y esteros. Las mayores extensiones de estos sedimentos se dan en la depresión central, cubriendo a las unidades preexistentes, especialmente a Formación Mininco, hacia el sector oriental de la Depresión Central. También existen acumulaciones importantes de estos sedimentos en los ríos Itata y Biobío (Gajardo, 1981).

4. MARCO METALOGÉNICO

4.1. ANTECEDENTES

La antigua región del Biobío (áreas comprendidas entre región del Ñuble y actual región del Biobío), ha sido dividida en tres franjas mayores de mineralización, que corresponden de este a oeste: Franja Oriental que abarca las zonas de Cordillera de los Andes y Precordillera, la Franja Central que se extiende por el Valle Central y la Franja Occidental que comprende la Cordillera de la Costa y Planicies Litorales (Alfaro & Gajardo, 1980).

En la región de estudio, la Franja Oriental posee depósitos primarios que consisten en mineralizaciones de Cu, Au, Pb y Zn asociada a intrusivos cenozoicos, con ocurrencia diseminada en brechas hidrotermales, vetas, mantos y cuerpos irregulares, destacándose los yacimientos de Curacarel y Minas del Prado (Collao *et al.*, 2000). La Franja Central contiene rocas de ambientes lacustres, fluviales y aluviales, las cuales generan ripios, arenas y arcillas explotadas para material de construcción (Alfaro & Gajardo, 1980). La Franja Occidental cuenta en la Cordillera de la Costa con numerosos lavaderos de oro a lo largo de su extensión (Collao *et al.*, 2000) y ocurrencia de tierras raras hacia el sur (Collao *et al.*, 2019). En el sector de Planicie Litoral se tienen depósitos minerales secundarios de tipo placer, describiéndose concentraciones de arenas pesadas o titaníferas (Collao *et al.*, 1982). El área de estudio del presente informe se encuentra en la playa de la ribera sur de la desembocadura del río Itata, por lo que se tiene un absoluto interés en las acumulaciones minerales tipo placer, teniendo como finalidad detectar y cuantificar el potencial de arenas ferrosas-titaníferas, seguido del oro y tierras raras.

4.2. DEPÓSITOS TIPO PLACER

4.2.1. Generalidades

Los placeres son depósitos minerales alóctonos, formados a partir de procesos sedimentarios, los cuales se forman a partir de la meteorización y erosión de un depósito primario y/o roca fuente de un mineral, liberando los sedimentos que luego son movilizados y concentrados mecánicamente por fluidos en movimiento, generalmente agua, pero también puede ocurrir por medios sólidos y

gaseosos, generando así la acumulación de minerales pesados, concepto que engloba a los minerales densos cuya gravedad específica es mayor que 2.85 (Van Gosen *et al.*, 2014).

Los minerales pesados que son acumulados en placeres cumplen con las siguientes condiciones: alta densidad, alta resistencia química a la meteorización y durabilidad mecánica a la destrucción física. Cumplen en distinto grado estas condiciones: casiterita, cromita, granates, ilmenita, magnetita, corindón, rutilo, diamantes, monacita, circón, xenotima y metales nativos (Au, Cu, Pt), los cuales se detallan en la tabla 4.1. Los tipos que más destacan por su potencial económico y popularidad son los placeres auríferos, de estaño y de diamantes (Harraz, 2013), teniendo de ejemplo depósitos de oro en Nome, Alaska, y placeres diamantíferos en Namibia (Morales *et al.*, 2020).

Tabla 4.1 Minerales pesados comunes en depósitos tipo placer. Modificado de Van Gosen *et al.* 2014. Ordenados de mayor a menor según su gravedad específica (G.E), junto con su dureza en escala de Mohz (H) y principal interés de explotación.

Mineral	Fórmula	G.E	H	Interés
Platino	Pt	21,4	4,0 - 4,5	Mena
Oro	Au	15 - 19,3	2,5	Mena
Cobre	Cu	9,0	2,5 - 3,0	Mena
Casiterita	SnO ₂	7,0	6,0 - 7,0	Mena de estaño
Hematita	Fe ₂ O ₃	5,3	5,5 - 6,5	Mena de hierro
Magnetita	Fe ₃ O ₄	5,2	6,0	Mena de hierro
Ilmenita	FeTiO ₃	4,7	5,5 - 6,0	Mena de titanio
Circón	(Zr,Hf,U)SiO ₄	4,7	7,5	Mena de zirconio
Monacita	(Ce,La,Y,Th)PO ₄	4,6 - 5,4	5,0 - 5,5	Tierras raras y Th
Cromita	FeCr ₂ O ₄	4,5 - 4,8	5,5	Mena de cromo
Xenotima	YPO ₄	4,4 - 5,1	4,5 - 5,0	Mena de yodo
Rutilo	TiO ₂	4,2 - 4,3	6,0 - 6,5	Mena de titanio
Corindón	Al ₂ O ₃	4,0	9,0	Gema (Rubí, zafiro)
Diamantes	C	3,5	10	Gema
Granates	(Mg,Fe,Mn,Ca)Al ₂ Si ₃ O ₁₂	3,1 - 4,3	6,5 - 7,5	Gema

La mayoría de los placeres tienen una edad de Cenozoico-Reciente, por lo que en mayor parte son depósitos pequeños y efímeros, debido a que tienden a depositarse en relieves positivos quedando expuestos a la erosión. Son en general de baja ley, pero por ocurrir casi en su totalidad en materiales no consolidados, son de explotación simple y de bajo costo, principalmente por dragado y concentración gravitacional. Existen también los paleo-placeres (placeres preservados en secuencias sedimentarias), los cuales ya litificados, y parcial o totalmente enterrados, presentan una eventual explotación más costosa, y deberán tener una alta ley o contener minerales preciosos para ser rentables. No obstante, un placer actual puede tener como fuente de aporte un paleo-placer exhumado y expuesto a meteorización y erosión (Harraz, 2013).

4.2.2. Clasificación

Los depósitos tipo placer pueden ser clasificados basado en las condiciones de depositación (Jenkins, 1964), de la siguiente forma: placeres residuales (acumulados *in situ* durante la meteorización), placeres eluviales (concentrado en un medio solido en movimiento), placeres aluviales-fluviales (concentrado en un medio liquido por la corriente del rio), placeres de playa (concentrados en un medio liquido por la acción de las olas y mareas), placeres eólicos (concentrados por un medio gaseoso por acción del viento) y paleo-placeres (placeres preservados en el tiempo).

Para los alcances del presente trabajo, es de principal interés comprender en detalle los placeres de tipo fluvial, de playa, eólico y paleo-placer.

4.2.2.1. Placer fluvial

Corresponde a uno de los más comunes e importantes tipo de placer, siendo la principal fuente de placeres auríferos minados, como fue la explotación durante la fiebre del oro en California, Estados Unidos (Jenkins, 1964).

La acumulación dependerá de dos factores principales: la razón hidráulica de las partículas (densidad/tamaño) y las variaciones de velocidad del caudal del río. Los minerales pesados son siempre muchos más finos en granulometría que los sedimentos que lo acompañan, por lo que una partícula grande y liviana puede llegar a la misma distancia que una pequeña y pesada. Por otra

parte, la disminución en la velocidad de la corriente del río de forma abrupta en un punto determinado causa que los minerales de alta densidad sean depositados y se concentren, ya que es menos fácil volverlos a movilizar por las corrientes de agua (Harraz, 2013).

Las zonas más comunes donde se dan y/o pueden darse estas condiciones son: entre crestas del lecho, detrás de barras rocosas, en el borde interno de meandros, en cavidades en el lecho del cauce, confluencia de un cause tributario de mayor energía y caídas de agua.

Estos depósitos están asociados genéticamente con los depósitos costeros o placer litoral, ya que son los sistemas fluviales los que transportan los sedimentos que contienen minerales pesados desde el área fuente hacia la costa.

4.2.2.2. Placer litoral

Se desarrollan en las playas oceánicas y su formación ocurre como el resultado de la acción de corrientes de alta mar y costeras, olas, mareas y viento, los cuales son mecanismos efectivos para separar y distribuir sedimento basado en sus tamaños y densidades (Jenkins, 1964, Van Gosen *et al.*, 2014; Morales *et al.*, 2020). Esta acumulación también es promovida por el “lavado” que realizan las olas del mar sobre la costa, las cuales remueven de la arena los granos minerales menos densos provocando que queden acumulados los minerales más pesados, efecto que se incrementa durante los ciclos de tormenta (Harraz, 2013, Morales *et al.*, 2020).

El resultado es la formación de muchas capas delgadas de acumulaciones de minerales pesados separadas por inconformidades pequeñas (Force, 1991). Las dimensiones de estos depósitos de forma individual son típicamente alrededor de 1 km de ancho, más de 5 km de largo y de 3 a 45 m de espesor. Distritos de arenas con minerales pesados tienden a extenderse por más de 10 km, componiéndose de algunos cuerpos individuales que están dispuestos juntos, en playas antiguas y modernas, llegando a máximos de decenas de kilómetros de largo, como los depósitos de dunas en Grande Cote, Senegal (100 km) y arenas en la costa de Sri Lanka, India (72 km) (Van Gosen *et al.*, 2014).

Las operaciones explotan depósitos en el rango de edad desde Cretácico a Holoceno. Esto incluye sedimentos recientes en costas modernas como también a depósitos costeros formados por transgresiones y regresiones del mar durante intervalos del Cuaternario, resto del Cenozoico y Cretácico (Van Gosen *et al.*, 2014). Los placeres litorales recientes se presentan a diferentes niveles topográficos debido a cambios del nivel del mar durante el Pleistoceno (Morales *et al.*, 2020). Cuando la playa presenta un régimen pro-gradante, son mejor preservadas las acumulaciones de minerales pesados o arenas negras, las cuales comúnmente son re TRABAJADAS y re-depositadas (Harraz, 2013). Estudios indican que los lugares más significativos para la acumulación de minerales pesados son dunas eólicas, el *foreshore*, *shoreface* y ambientes de *lagoon* (Figura 4.1) (Van Gosen *et al.*, 2014; McLemore, 2017).

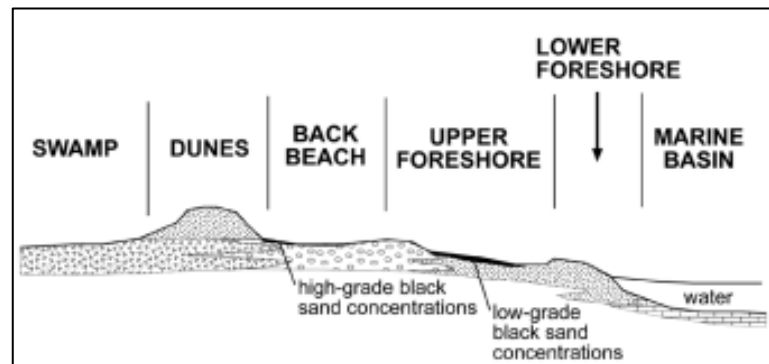


Figura 4.1 Sección idealizada de playa para la acumulación de arenas negras. Tomado de McLemore (2017).

El origen de los minerales de interés puede tener distintas fuentes, los acumulados pueden provenir de rocas costeras o vetas aflorantes en la costa, del aporte de los ríos, del fondo marino u otros depósitos arenosos más antiguos re TRABAJADOS por el mar (Morales *et al.*, 2020). Los placeres litorales en Chile están vinculados al re trabajo del oleaje costero de depósitos sedimentarios originados de rocas metamórficas-graníticas del basamento o sedimentos glacio-aluvio-fluviales (García *et al.*, 2020).

4.2.2.3. Placer eólico

Acumulaciones causadas por la acción del viento, en un proceso también llamado deflación (Jenkins, 1964). Desarrollados en zonas áridas o dunas costeras, como *foredunes*, dunas transgresivas y/o dunas estacionarias; razón por la que están ligados a placeres litorales. El

mecanismo de concentración en este tipo de depósitos es la acción del viento, que remueve y transporta los granos más livianos de una zona dada, concentrando y enriqueciendo el depósito con los más pesados (Harraz, 2013). Procesos eólicos crearon muchos de los más grandes depósitos fósiles y recientes de minerales pesados del mundo, ejemplos de este tipo de placer son los depósitos de Titanomagnetita en Nueva Zelanda (Harraz, 2013); depósitos cuaternarios de ilmenita Guajo, Brasil; depósitos en duna estacionaria en South Bay, Sudáfrica (Van Gosen *et al.*, 2014).

4.2.2.4. Paleo-placer

También llamados placeres fósiles, se encuentran entre los tipos de placer más importantes, ejemplo de esto son los depósitos de oro y uranio del Arqueano-Proterozoico en la cuenca de Witwatersand, Sudáfrica, el cual corresponde al yacimiento de oro más grande del mundo (Harraz, 2013; Nwaila *et al.*, 2019). El mecanismo de formación de estos placeres es igual al de los demás tipos, con la salvedad que estos no son erosionados, siendo enterrados como parte de la secuencia sedimentaria de su ambiente, y así, quedan preservados en el tiempo.

4.3. HIERRO

4.3.1. Generalidades

El hierro es un metal de transición, con símbolo químico Fe y número atómico 26. En estado puro es un metal de color blanco grisáceo y brillante, caracterizado por su gran ductilidad y maleabilidad, que forma con gran facilidad compuestos ferrosos y férricos (SERNAGEOMIN, 2023).

Es parte de los 4 elementos más abundantes de la corteza continental (O, Si, Al, Fe), con un 5% de abundancia relativa. También se encuentra en cantidades relevantes formando el núcleo de la Tierra junto al níquel responsable del campo magnético terrestre (Tarbuck & Lutgens, 2005).

4.3.2. Minerales de interés

Los principales minerales menas de hierro son magnetita, hematita, limonita y siderita, siendo los tres primeros de tipo óxido y el último un carbonato. Las características de estas especies minerales se compilan en la tabla 4.2. Las menas con mayor presencia en depósitos de tipo placer hierro son la magnetita y hematita.

Tabla 4.2 Menas de hierro y sus características.

Nombre	Formula	% de Fe	Clasificación	Propiedades
Magnetita	Fe_3O_4	72,4	Óxido	Sistema cristalino isométrico, color negro, brillo metálico, raya negra, fuerte magnetismo.
Hematita	Fe_2O_3	70	Óxido	Sistema cristalino romboédrico, color gris acero oscuro a negro de hierro, brillo metálico, raya roja <i>cherry</i> a marrón rojizo, magnetismo leve.
Limonita	$\text{FeO} \cdot \text{HO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	62,9	Óxido hidratado	Usualmente en formas estalactitas y botroidales o mamilares, también masiva y ocasionalmente terrosa, brillo sedoso, color en varias tonalidades de marrón, comúnmente oscuro, raya marrón amarillento.
Siderita	FeCO_3	48,2	Carbonato	Sistema cristalino romboédrico, color en tonalidades de gris ceniza, amarillento, verdoso; también marrón y rojo pardo, brillo vitreo-perlado, raya blanca.

4.3.3. Usos

El principal uso es la obtención de hierro fundido y del acero, además de materiales metálicos de amplia utilización en la construcción habitacional y pública, las obras civiles, la industria manufacturera, naviera, automotriz y metalmecánica, y la fabricación de electroimanes (SERNAGEOMIN, 2023).

4.3.4. Yacimientos tipo Placer

A nivel mundial, el hierro en placeres ocupa un rol secundario, siendo los minerales de hierro acompañantes de otras fases de mayor interés económico, como ilmenita, rutilo, zircón, etc. Destacan los distritos de placer Sai-Lao, Wuzhuang, y Xinglong, China, donde se explotan ilmenita, zircón, anatasa, casiterita, monacita, magnetita y cromita (Orris and Grauch, 2002), y las arenas de magnetita de North Island, en Nueva Zelanda (Morales *et al.*, 2020).

El hierro en Chile es obtenido en su mayoría de depósitos primarios, de tipo IOCG, IOA y estratoligados, provenientes principalmente de las regiones de Atacama y Coquimbo. Se alcanzó 17.637.927 toneladas métricas de mineral en el año 2022 (SERNAGEOMIN, 2023). Respecto a los depósitos de placer, en la zona norte del país se han desarrollado explotaciones de arenas de magnetita, como los proyectos Chispita Dorada, región de Coquimbo, con una producción estimada de 200.000 t/mensuales, y el proyecto FOX, a cargo de APC minerales, con una producción de 40.000 t/mensuales de concentrados de magnetita (GESEMEX, 2011). Hacia el sur, se tiene la ocurrencia en playa Blanca de Coliumo, Región del Biobío, lugar donde se describió un placer de playa de Fe-Ti (Collao *et al.*, 1982; Collao *et al.*; 2019). Cabe mencionar que, en la costa occidental de la isla de Chiloé, oro detrítico se encuentra en arenas negras, conformadas por magnetita, ilmenita, zircón, granate y monacita (Ruiz & Peebles, 1988; Morales *et al.*, 2020). Óxidos de hierro y titanio también han sido reportados en sedimentos marinos de los canales y fiordos magallánicos (Pineda *et al.*, 2002; Ayala, 2022).

4.3.5. Metalurgia

Para los productos obtenidos de hierro, así como para las pruebas metalúrgicas realizadas en laboratorio, la principal entidad productora de hierro, CAP minería, utiliza una serie de conceptos para caracterizar parámetros y materiales. A partir de un informe interno realizado para esta empresa (Cuadra, 2015) y trabajos en proyectos similares (Torres, 2019; Valderrama, 2022), serán definidos los conceptos utilizados en esta memoria:

- **Tubo de Davis:** Instrumento basado en un electroimán (1000-4000 Gauss) adosado a un tubo de vidrio y que permite medir el contenido magnético en muestras que tienen minerales susceptibles al magnetismo (magnetita, hematita, pirrotina, ilmenita y otros). En el proceso, el tubo se inclina 45° y se le hace pasar un flujo de agua. Como resultado se obtienen dos materiales partir de la arena cabeza: un concentrado y el relave.
- **Cabeza:** Material inicial correspondiente a las muestras de arenas introducidas en el Tubo de Davis.
- **Concentrado:** Material que reúne las fases minerales de hierro, obtenido por concentración magnética en húmedo, a través de un Tubo Davis. Su granulometría es de aproximadamente 44 um (Malla Tyler 325#).

- **Relave:** Material sobrante de la concentración magnética del Tubo Davis, el cual carece de magnetismo y tiende a estar conformado por minerales formadores de roca.
- **DTT:** acrónimo en inglés para *Davis tube tester* (Tubo de Davis).
- **% DTT:** Parámetro magnético que corresponde a la recuperación en peso de mineral magnético obtenida en el Tubo de Davis. El % DTT se calcula como el cociente entre el peso del concentrado obtenido y el peso de la muestra (Ecuación 1).

$$\% DTT (Rp) = \frac{C}{H} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Rp: Recuperación en peso del concentrado

C: Peso del concentrado magnético

H: Peso de la muestra

- **% Fe DTT:** Corresponde a la ley de hierro del concentrado magnético obtenido por ensayo de laboratorio en el Tubo de Davis
- **Ley Magnética (% Fe Mag):** Parámetro que indica el porcentaje de minerales magnéticos en la muestra o mineral. Lo fundamental, es que solo cuantifica el hierro magnético recuperable por los procesos de concentración magnética. Se calcula como el producto del % DTT y % Fe DTT dividido por 100 (Ecuación 2).

$$\% Fe Mag = \frac{(\% DTT) \times (\% Fe DTT)}{100} \quad \text{Ecuación 2}$$

4.4. TITANIO

4.4.1. Generalidades

El titanio es un metal de transición, con símbolo químico Ti y número atómico 22. En su estado puro es un metal plateado de elevada dureza y brillante, buen conductor de calor y electricidad, con puntos elevados de ebullición y fusión. Tiene excelentes propiedades mecánicas, siendo más duro, resistente y ligero que el acero, limitado en sus aplicaciones por su costosa metalurgia. Es el noveno elemento más abundante de la corteza terrestre, con un 0,63% de abundancia relativa.

4.4.2. Minerales de interés

El titanio se encuentra presente en 45 minerales, pero los depósitos con viabilidad económica son la ilmenita, rutilo, anatasa, leucoxeno y esfeno (Valderrama, 2008), de los cuales el rutilo e ilmenita tiene un valor comercial significativo para una minería rentable por su abundancia (El Khalloufi, 2021).

Tabla 4.3 Menas principales de titanio y sus características.

Nombre	Formula	% de Ti	Clasificación	Propiedades
Ilmenita	TiFeO ₃	31,6	Óxido	Sistema cristalino trigonal, color negro hierro, brillo submetálico, raya negra metálica a marrón rojizo, magnetismo leve
Rutilo	TiO ₂	59,9	Óxido	Sistema cristalino tetragonal, color marrón rojizo, pasando hacia rojo, a veces amarillento e incluso negro, brillo metálico-adamantino, raya marrón pálida, vitreo.

4.4.3. Usos

Alrededor del 95% del titanio se consume como TiO₂ en la producción de pigmento blanco para pinturas, barnices, plásticos, esmaltes, papel y también en medicamentos, pasta de dientes y en la industria alimentaria (Urpí, 2019). Como parte de aleaciones, su uso principal es en aplicaciones aeroespaciales y aeronáuticas, tales como motores, misiles, fuselajes y naves espaciales. En la industria aeroespacial, su uso se basa en su baja densidad y alta resistencia a temperaturas elevadas. Su alta resistencia a la corrosión permite usarlo en la industria submarina, marina y naval, así como en condensadores de agua de mar de centrales eléctricas (Froes, 2015 en El Khalloufi, 2021). Además, su excelente integración ósea y biocompatibilidad permiten su empleo en prótesis articulares, cadera y rodilla, e implantes dentales (Urpí, 2019).

4.4.4. Yacimientos tipo Placer

A nivel mundial, hay desarrollo de placeres de playa de titanio en todos los continentes excepto la Antártica. Este tipo de depósito es la fuente principal de titanio para la industria de pigmentos de dióxido de titanio (Gambogi, 2012 en Van Gosen *et al.*, 2014). Las mayores reservas del mundo se

encuentran en Australia, China, India, Brasil y Sudáfrica, mientras que el principal productor de ilmenita es China y el de rutilo es Australia (Van Gosen *et al.*, 2014; USGS, 2023). Estos depósitos son la principal fuente de zircón mineral obtenido como un subproducto durante la obtención de minerales de titanio (Loferski, 2013 en Van Gosen *et al.*, 2014).

En nuestro país, todo el borde costero depositacional tiene contenidos de hierro y titanio en variables, aunque generalmente son bajos y cuando son altos se vuelven yacimientos secundarios de titanio. Los principales antecedentes de este tipo de ocurrencia en Chile se dan en 2 lugares: el primero en el sector de Caldera, Región de Atacama, donde estudios realizados a muestras de arenas en esas playas reportaron la presencia de fases minerales de titanio tales como ilmenita, titanita y rutilo, mostrando que se puede obtener un concentrado con una ley de TiO_2 de 51,4% (Valderrama *et al.*, 2005; Valderrama, 2008). El segundo caso es la ya citada playa Blanca de Coliumo, Región del Biobío, el cual consta de 1.500 m de largo y 30-50 metros de ancho, con capas aterrazadas de 60-70 cm de potencia, las cuales contienen horizontes no consolidados de arenas negras muy finas, de 2 a 6 cm de espesor. Los minerales de Fe-Ti encontrados corresponden de mayor a menor porcentaje a: titanomagnetita, magnetita, ilmenita, hematita, esfero y rutilo; y según análisis químicos, se indicaron leyes de 11-20% de Fe y 2,2 a 4,4% de Ti (Collao *et al.*, 1982; Collao *et al.*, 2019). Este titanio se explotó de forma artesanal para la fabricación de varillas de soldar (Guarachi & Rossier, 1989 en Geología de Campo II, 2013).

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las pertenencias mineras en estudio poseen un área total de 2 km², la cual incluye 0,73 km² de superficie cubierta por mar y 1,27 km² de superficie continental. El trabajo requiere de una labor de exploración por medio de excavaciones y calicatas, en una zona que comprende playa, dunas y área poblada, con solo 2 accesos para vehículo hasta la costa, además de ser un lugar sin muchos estudios previos en cuanto a geología económica. La metodología consistirá en una inicial etapa de gabinete I, etapa de terreno, etapa de laboratorio y etapa de gabinete II.

5.1. ETAPA DE GABINETE I

Recopilación y revisión bibliográfica de los antecedentes de formación y ocurrencia de placeres costeros y yacimientos de arenas ferrosas a nivel mundial y nacional. Revisión de informes técnicos y de evaluación ambiental de proyectos de explotación y obtención de concentrados metálicos de Fe-Ti realizados en Chile y países sudamericanos. Un análisis geomorfológico y geológico del área de estudio utilizando imágenes satelitales (Sentinel-2, Planet) para una interpretación previa de morfologías y litologías del sector. Confección en QGIS de mapas e imágenes con las delimitaciones de las pertenencias, para planificar los sitios de muestreo de la toma de muestras de arenas y puntos de control.

5.2. ETAPA DE TERRENO

Los trabajos de exploración se desarrollaron durante un día de terreno, a cargo del grupo de trabajo conformado por el dueño de las pertenencias Sr. Eduardo Montoya, el ingeniero Raúl Calvert, el licenciado en Geología Andrés Parra y el estudiante de geología Erwin Hödl. Los materiales por utilizar para esta fase de terreno son:

- 1 carretilla
- 4 palas, 2 grandes y 2 pequeñas
- 2 cubetas de 15 litros
- 20 bolsas de muestras gruesas de 40x30 cm.
- Corchetera
- Rótulos de muestras

- Guincha de 3 m
- GPS Garmin
- Brújula básica
- Dos imanes de 10 cm

Se extraen 4 muestras de arenas en el sector de playa sobre el nivel de marea alta, distribuidas en las dos pertenencias mineras y distanciadas entre sí a 600 m, las cuales son localizadas y marcadas en terreno utilizando GPS y dispositivos móviles. Los detalles de estas se resumen en la tabla 5.1. Para la extracción de material se realizan calicatas en los 4 puntos designados previamente en la etapa anterior, y apoyados de las herramientas de pala y guincha se llevan a cabo excavaciones de 50 x 50 cm en el plano horizontal, 50 cm de profundidad, y se extraen ~15 kg de material por muestra (Figura 5.1). Estas muestras son embolsadas y rotuladas, para posteriormente ser transportadas a laboratorio para su análisis granulométrico, mineralógico y químico.

Tabla 5.1 Datos de las muestras recolectadas en terreno.

Muestra	Cantidad de material	Coordenada Norte	Coordenada Oeste
C1-SS	15-18 kg.	5968856	18H 690809
C2-SS	15-18 kg.	5968249	18H 690754
C3-SE	15-18 kg.	5967658	18H 690717
C4-SE	15-18 kg.	5967061	18H 690748



Figura 5.1 Parte de materiales utilizados.

Además de las cuatro calicatas donde se extraen muestras, se realizan otras más pequeñas, denominadas puntos de control, con una separación de 200 metros entre sí, incluyendo a las cuatro calicatas ya descritas, en el eje norte-sur (N-S). En el eje oeste-este (W-E), se realizan dos puntos de control a los laterales de cada calicata de muestreo a una distancia de ~15 m, conformando un total de 14 puntos de control (Figura 5.2). Esto con el objetivo de obtener más información para interpretar las variaciones de las capas de arena bajo superficie. En conjunto con las labores de toma de muestras, se realiza la observación y descripción de la geomorfología costera y rocas de la zona, de manera de integrar esta información a la geología del sector, la interpretación del origen de las arenas junto a su contexto de acumulación, y las implicancias de su eventual explotación.

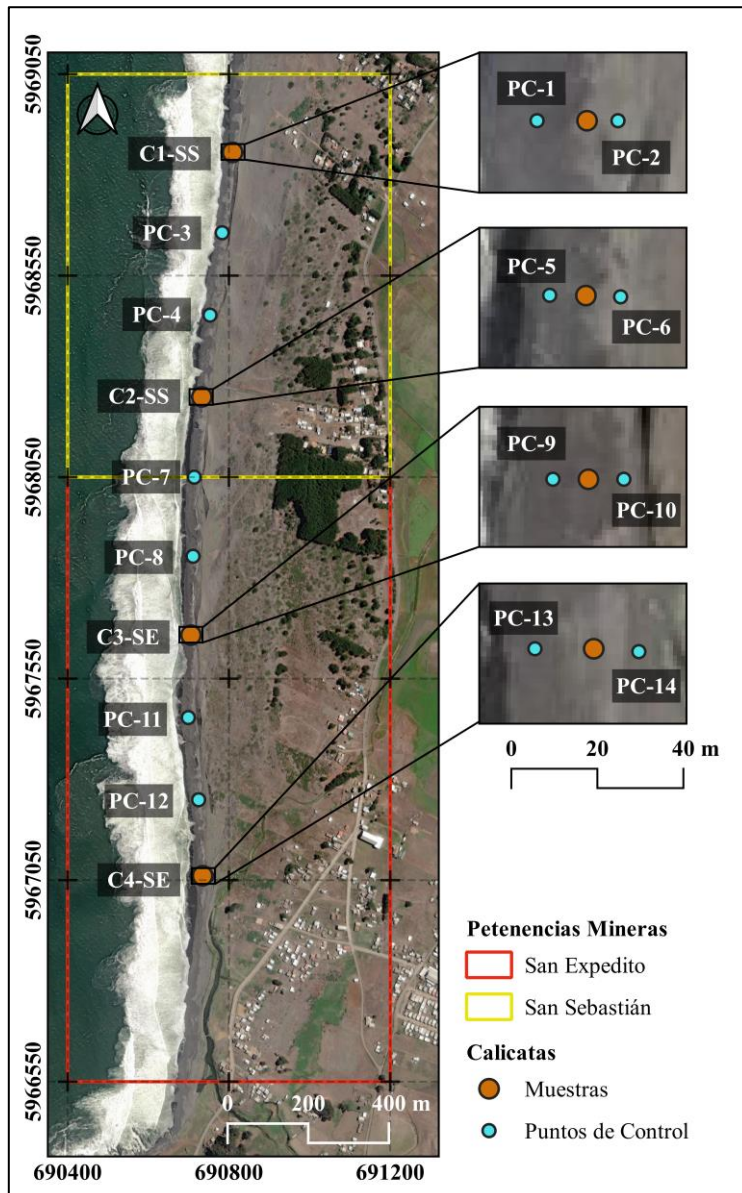


Figura 5.2 Mapa con la ubicación del total de calicatas de recolección de muestras y puntos de control realizados en el terreno.

5.3. ETAPA DE LABORATORIO

Esta etapa tiene el propósito de obtener distintas características físicas de las arenas, determinar las fases minerales que componen sus granos, separar magnéticamente cada muestra para así obtener un concentrado, y determinar la cantidad de porcentaje en peso de los elementos más abundantes tanto en el concentrado como en el relave. Consta de múltiples procedimientos, desde el tratamiento de las muestras, confección de cortes pulidos transparentes para análisis QEMSCAN, y el análisis químico elemental. Estos procesos se realizan en su mayor parte en el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET), ambos de la Universidad de Concepción, y en la empresa SGS, Santiago, tal como se resume en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Procedimientos y lugar de realización para la etapa de laboratorio.

Procedimiento	Lugar
Secado de muestras	GEA
Análisis Granulométrico	GEA
Análisis de Densidad	GEA
Confección de cortes pulidos y carbonización	GEA
Análisis mineralógico mediante QEMSCAN	GEA
Análisis elemental de Magnetita por SATMAGAN	DIMET
Análisis químico por FRX - EAA	SGS
Concentración magnética en Tubo Davis (DTT)	SGS
Análisis químico por FRX - EAA	SGS

5.3.1. Secado de muestras

Es necesario secar las arenas para remover el contenido de agua remanente entre los granos. Las cuatro muestras son secadas a 105°C utilizando el horno eléctrico Memmert (Figura 5.3).



Figura 5.3 Horno eléctrico para el secado de muestras.

5.3.2. Análisis Granulométrico

Con el fin de identificar las fracciones granulométricas donde más se acumulan granos minerales de interés, así como también tener una descripción total para las arenas, las muestras se tamizan por medio de mallas. Previo a esto, las arenas pasan por un proceso de cuarteado, para así homogeneizar las muestras y asegurar una mejor representatividad de estas. El análisis se realiza en un tamizador RO-TAP marca Gilson modelo SS-30F, con tamices ASTM de 8'' de diámetro, en las fracciones de tamaño 10#, 18#, 35#, 60#, 70#, 80#, 100#, 140# y 200# (Figura 5.4).



Figura 5.4 Equipos utilizados para el análisis granulométrico. [A] Cuarteador, [B] Tamizador RO-TAP.

5.3.3. Análisis de Densidad

Se realiza un análisis de densidad a las muestras con el fin de determinar la magnitud de minerales pesados presentes en las arenas. Este se realiza mediante el uso de un picnómetro, conforme a lo expuesto en Klein & Hurlbut (1996).

5.3.4. Confección de briquetas, carbonización y pulidos transparentes.

Se preparan briquetas para ser analizadas por el equipo QEMSCAN®, determinando las fases minerales principales presentes en las arenas y caracterizar mineralógicamente las mismas. Esto se realiza en las dependencias del GEA, donde cada muestra de 100 g de arena se monta en una solución de 15 g de resina y 2 g de endurecedor. Estas después son pulidas en fino sobre un primer plato con pasta de diamante de 3 micrones y alúmina de 1 micrón, para luego ser pulidos en un segundo plato con pasta de diamante de 1 micrón y alúmina de 0,3 micrones. Posteriormente se

carbonizan (Figura 5.5b), para así asegurar una superficie conductora en las briquetas y permitir que el equipo automatizado obtenga las lecturas de forma correcta.



Figura 5.5 Equipos y elementos utilizados en la etapa confección y análisis de cortes pulidos transparentes. [A] Resina y endurecedor aplicados a la solución de las briquetas, [B] Carbonización de briquetas, [C] Pulidos transparentes a partir de briquetas, [D] Microscopio Nikon 275150 donde es realizada la observación óptica de los pulidos transparentes.

Dentro de esta etapa, se realiza el análisis mineralógico por microscopio (Figura 5.5d), tanto para minerales formadores de roca como para menas metálicas, de manera de tener un punto de partida de la composición mineral e integrarla al análisis de la mineralogía automatizada. Esto se realiza confeccionando cortes pulidos transparentes a partir de las briquetas, los cuales son observados en un microscopio Nikon 275150, que tiene integrado una cámara Nikon F-130, dispositivo que permite la captura de fotomicrografías.

5.3.5. Análisis mineralógico automatizado QEMSCAN®

El análisis por QEMSCAN® (acrónimo inglés de Evaluación Cuantitativa de Materiales mediante Microscopio Electrónico de Barrido) es una herramienta analítica computarizada que permite el ordenamiento espacial de información inferida en base a espectros químicos, con el fin de obtener

información cuantitativa y estadística como la abundancia de cada fase mineral, tamaño y forma de partículas, cálculo de áreas reactivas, entre otras características (Gottlieb *et al.*, 2000).

Está compuesto por una fuente de emisión de electrones, bombas rotatorias, una columna de lentes electromagnéticas, una cámara, detectores de emisiones y procesadores de pulso. El equipo utilizado para este estudio corresponde al modelo FEI Quanta 650 QEMSCAN-TM del Departamento de Geología Económica Aplicada (Figura. 5.6) y los resultados son revisados en el software IDiscover 5.3.

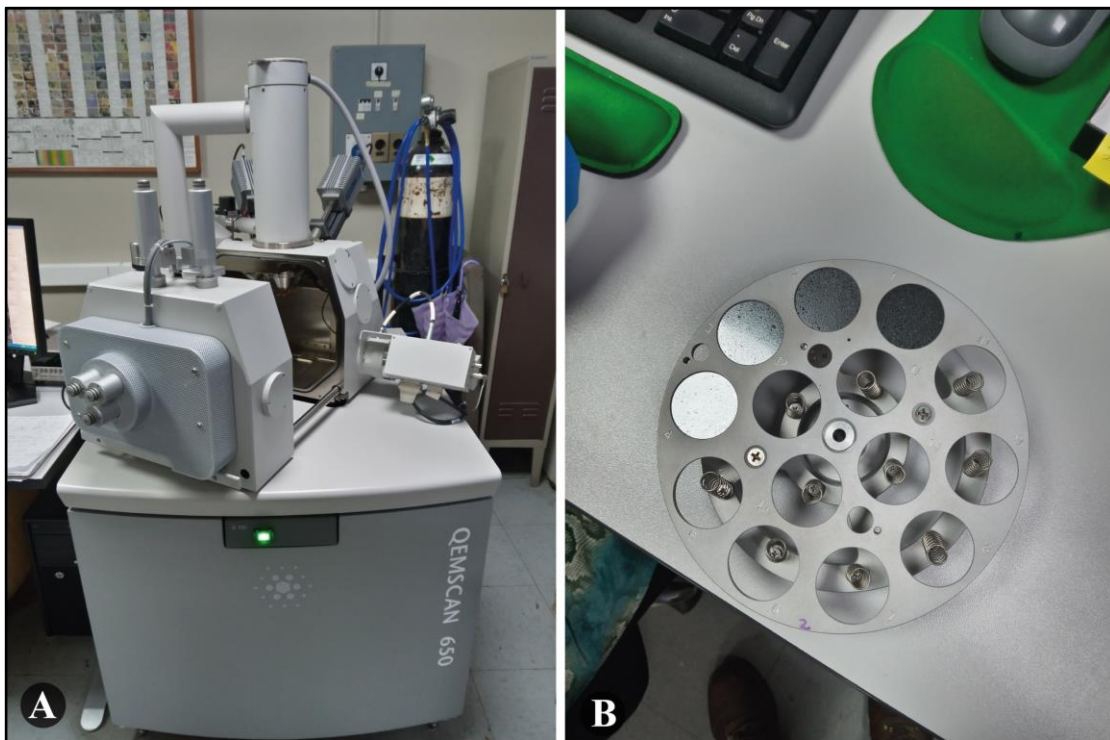


Figura 5.6 Equipo QEMSCAN® del Instituto GEA. [A] Instalaciones del equipo, [B] Montaje de las briquetas.

La identificación y cuantificación de fases minerales en las briquetas pulidas se realiza mediante la combinación de las emisiones de electrones retrodispersados (BSE) y Rayos X. Para el presente estudio, se utiliza el método PMA (Análisis Mineralógico de Partícula), el cual es un análisis bidimensional de las partículas de cada muestra de arena, que entrega la clasificación y cuantificación mineralógica, grado de liberación global, asociación mineral, tamaño de grano y factor de forma.

De acuerdo con lo explicado en Flores (2006), el equipo escanea las briquetas en base a una malla regular, de manera que analiza cuadro por cuadro la diferencia de resina de granos minerales por las BSE. Cabe destacar que las partículas que quedan en los bordes de un cuadrante de la malla no son identificadas. Una vez que identifica las partículas dentro de un cuadrante, escanea cada partícula identificada a través de una malla de pixeles. Se adquiere un espectro de Rayos X punto a punto por detectores EDS (SDD). El dispositivo identifica por cada píxel los elementos y sus proporciones relativas, cuantificando estos datos para posteriormente asignar una composición por píxel y así asignar la fase mineral, teniendo como resultado la creación de una imagen de falso color de cada partícula analizada (Figura 5.7).

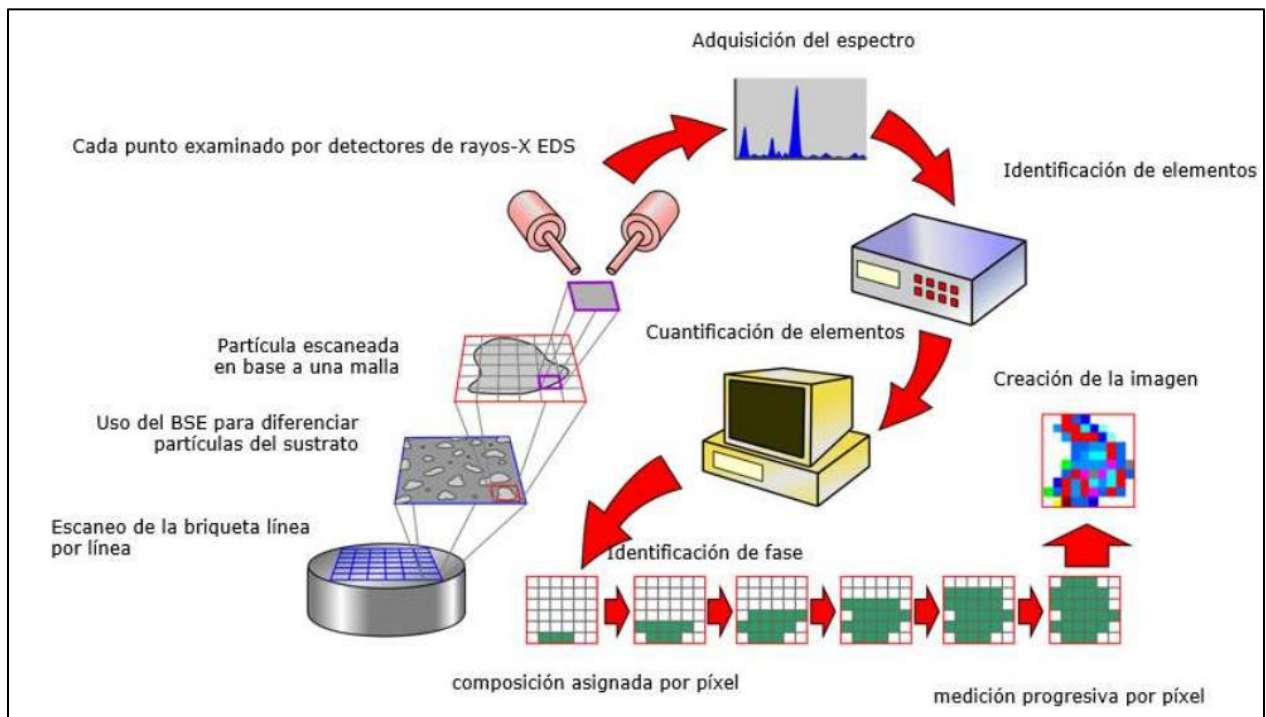


Figura 5.7 Esquema del proceso de Mineralogía Automatizada (Flores, 2006).

La identificación de la fase mineral es realizada por el equipo basado en listas de minerales (SIP), las cuales trae incorporadas, empleando en este caso una lista de depósito de tipo pórfido cuprífero, que cuenta con una buena base de datos de fases de Fe y Ti. Además de esto, en esta etapa, se contó con la captura de imágenes de cada muestra por SIAMS, como material de apoyo para los análisis.

5.3.6. Análisis de magnetita por SATMAGAN

Se realiza un análisis específico para cuantificar la cantidad en porcentaje en peso de magnetita en las arenas, mediante el equipo SATMAGAN 133 del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción. Esto se determina mediante balanza de saturación magnética, donde a la muestra introducida en la celda del equipo se le aplica un campo gravitacional y luego un campo magnético creado por imán permanente. Al llevar la balanza al equilibrio, la lectura entrega de forma directa el porcentaje en peso de magnetita de la muestra.

$$\% Fe_3O_4 = \frac{\text{Peso molecular de } Fe_3O_4}{\text{Peso molecular de } FeO} \times \% FeO \quad \text{Ecuación 3}$$

Este equipo se calibra con muestras de cantidades conocidas de magnetita (0, 10 y 25%), y luego se coloca aproximadamente 1 g de pulverizado de cada muestra de arena en la celda del equipo para su lectura (Figura. 5.8). La cifra que entrega el equipo se debe extrapolar con los valores de la calibración, y así se obtiene la cantidad de magnetita por cada muestra.



Figura 5.8 Equipo y elementos utilizados para cuantificación de magnetita. [A] SATMAGAN 133, [B] Cápsulas de muestra, pulverizados de arenas y ficha de calibración.

5.3.7. Análisis químico por FRX – EAA

El análisis químico a las muestras de arena en bruto se realiza por método FRX-EAA (Fluorescencia de Rayos X - Espectroscopia de Absorción Atómica), para así obtener las cantidades en porcentaje de los elementos principales que las constituyen. Esto se lleva a cabo en las instalaciones de laboratorio de la empresa SGS en Santiago. Se utilizan los siguientes métodos, definidos de forma estándar por la misma empresa:

- **XRF76A:** Análisis de masa total por fluorescencia de rayos X, que determina la cantidad de óxidos de elementos principales de una muestra y su límite de detección es de 0,01%. La muestra se funde en disco de borato/XRF. Esta fusión de borato con análisis de XRF es una técnica extremadamente sólida para el análisis de elementos principales y menores en mineralización compleja y ofrece resultados de una alta precisión para las muestras de mineral de hierro. Esto se aplicó a la arena cabeza, concentrado y relave.
- **AAS022D:** Análisis de Espectrometría de Absorción Atómica, que mide el hierro total en muestras con baja ley. Se aplicó para medir la cantidad de hierro en la arena cabeza y relave.
- **CON08V:** Análisis de Espectrometría de Absorción Atómica, que mide el hierro total soluble en ácido, en titrimétrico y límite de detección de 0.50%. Se utiliza en muestras con leyes elevadas de hierro. Se aplicó para medir la cantidad de hierro del concentrado.

5.3.8. Concentración magnética en Tubo de Davis

Para un resultado con énfasis en los minerales ferrosos de interés, se lleva a cabo una separación magnética de las arenas a través del Tubo de Davis, también realizado por SGS en Santiago. A los dos productos sólidos de la separación magnética, concentrado y relave, se les repetirá el análisis químico por FRX-EAA. Este ensayo se inicia tomando 20 gramos de cada muestra, este material de cabeza se coloca en un tubo de vidrio con un ángulo de 45° entre dos potentes electroimanes. Una mezcla o suspensión acuosa se vierte lentamente a través del tubo y luego del tubo se enjuaga con agua de manera que sólo quede un concentrado limpio. Los parámetros utilizados para el DTT se compilan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Parámetros operacionales de Tubo de Davis.

Parámetro	Cantidad
Masa	20 gramos
Flujo de agua	600 ml/min
Velocidad	110 golpes/min
Campo Magnético	4000 Gauss
Tiempo de acondicionado	30 segundos
Tiempo de lavado	30 minutos

5.4. ETAPA DE GABINETE II

Con las observaciones y datos tanto de terreno como laboratorio, se procede con esta información técnica a terminar con los objetivos planteados inicialmente en esta memoria. Se realiza la descripción morfológica del depósito, integrando los datos de terreno y datos remotos de imágenes satelitales (Sentinel 2 y Google Satelital). Los análisis químicos permiten cuantificar la cantidad de hierro, titanio y otros elementos de interés presentes en las muestras para así obtener una ley total representativa para cada muestra.

Con la descripción del depósito de placer y las cantidades determinadas de elementos y su ley, se procede a generar un modelo 3D simple del yacimiento, apoyándose de los softwares Leapfrog GEO y QGIS, para así realizar la cubicación y determinar el volumen de material total de interés aproximado y la ley representativa de los mismos, para las pertenencias mineras. Se hará un breve estudio de prefactibilidad, para un sistema de explotación que permita recuperar minerales de Fe de las arenas. Finalmente, con la caracterización mineral de las arenas junto al material bibliográfico de placeres litorales nivel nacional y mundial, se especulará sobre el origen de este material y su contexto de acumulación.

6. RESULTADOS

6.1. MORFOLOGÍA DEL DEPÓSITO

Basado en la geomorfología costera del sector y el perfil de una zona litoral, se identifican varias zonas en el área de estudio, anteriormente definidas (Figura 6.1). El sector de mar comprendido dentro de las pertenencias mineras corresponde a las zonas de *shoreface* y parte del *foreshore*. La parte identificada como placer de este estudio se ubica en lo que sería la playa expuesta, en la zona de *backshore* y parte de la zona de *foreshore*, sector en el cual se desarrolla una berma que se extiende en ambas pertenencias con 30 m de ancho en promedio y 2.500 m de largo, morfología donde fueron recolectadas las muestras y donde se atribuye la concentración mineral.

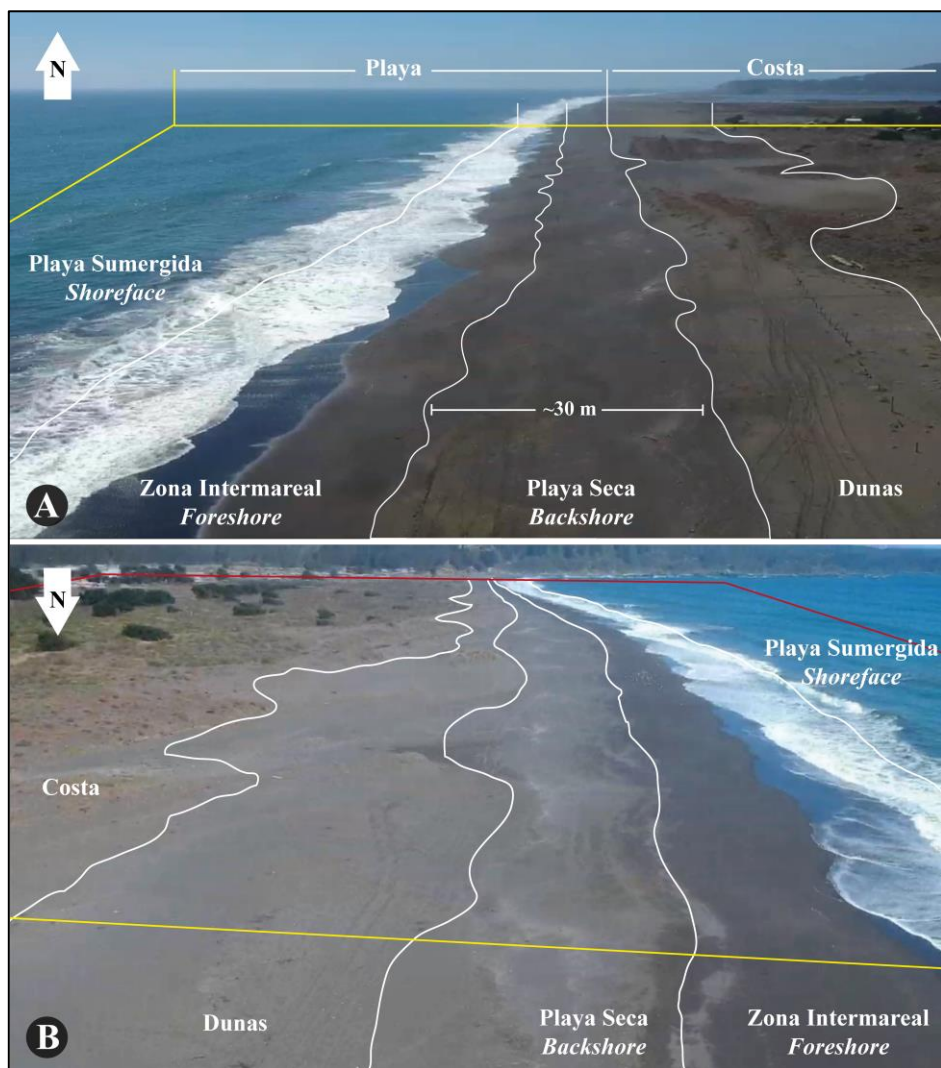


Figura 6.1 Secciones esquemáticas de perfil de playa trazadas sobre las pertenencias mineras en estudio. [A] Vista hacia el límite norte de pertenencia San Sebastián, [B] Vista hacia el límite sur de pertenencia San Expedito. Fotografías tomadas con dron.

Hacia el Este la berma es cortada por dunas que se extienden por toda la pertenencia San Sebastian y parte de la San Expedito, con anchos variables de entre 5 a 20 metros. Esto marca el límite entre la zona de *backshore* y el inicio de la zona de costa.

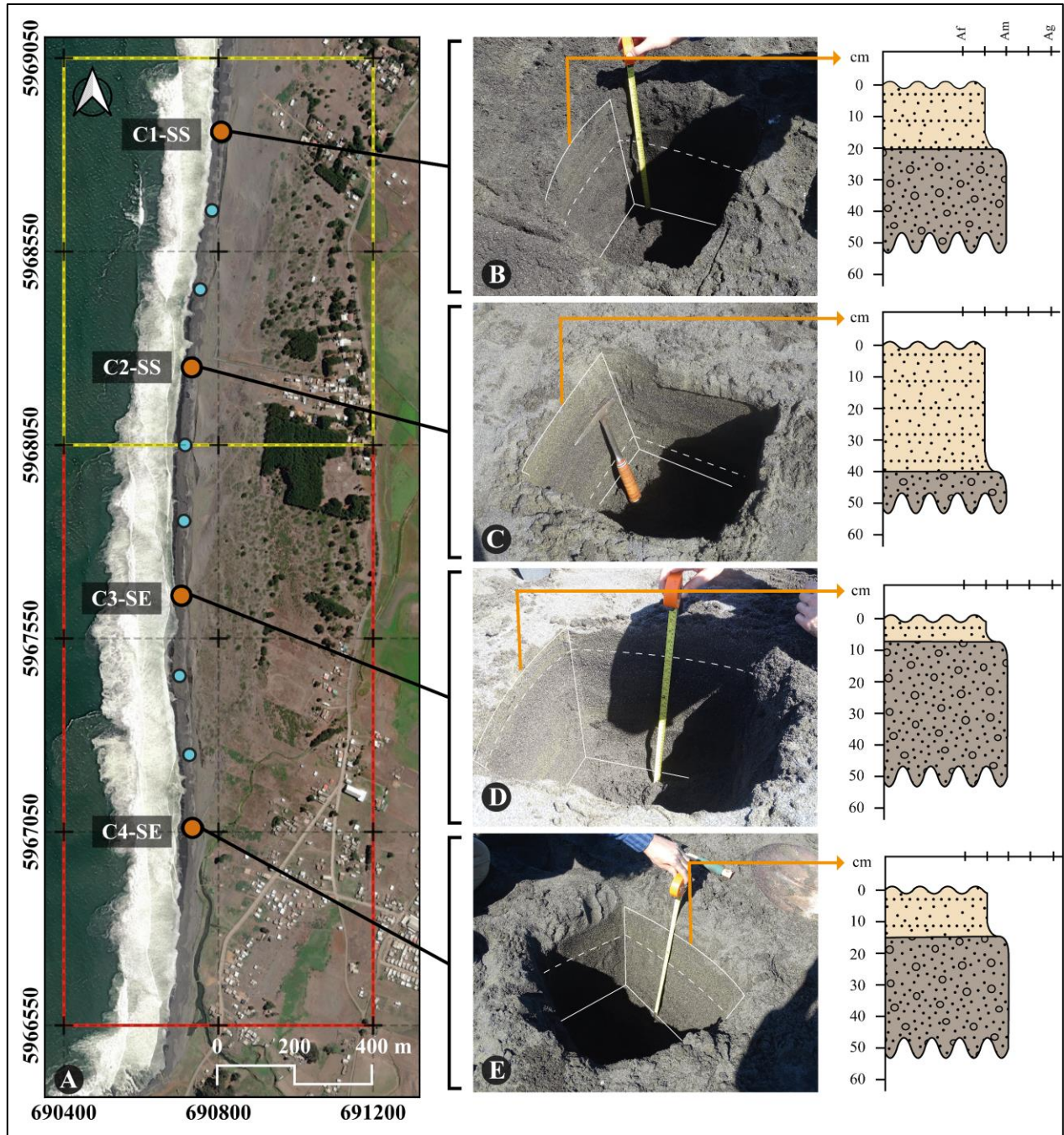


Figura 6.2 Detalle de la recolección de muestras en las labores de exploración de las pertenencias mineras. [A] Plano con la ubicación de las 4 muestras y pertenencias mineras (San Sebastian amarillo, San Expedito rojo), [B] Muestra C1-SS con su columna, [C] Muestra C2-SS con su columna, [D] Muestra C3-SE con su columna, [E] Muestra C4-SE con su columna.

A través de las calicatas realizadas, se puede notar la distribución masiva de los granos metálicos oscuros, a diferencia de otros tipos de estos depósitos donde se tienen capas bien definidas y delgadas. Estas excavaciones permiten identificar dos niveles de arena en la columna, identificados como nivel A y B (Figura 6.2). El **Nivel A** es el más superficial, tiene una granulometría de arena media a fina y contiene una mayor cantidad de granos minerales oscuros de brillo metálico. El **Nivel B** tiene una granulometría más gruesa que el A, de tamaño arena media, contiene una menor cantidad de granos metálicos magnéticos y contiene fragmentos de conchas de moluscos (1-2%). Estos niveles varían a lo largo de la playa y en las 4 calicatas, expresando distintos espesores. Según se ilustra, la muestras C1-SS, C3-SE y C4-SE son arenas representativas al nivel B, mientras que la muestra C2-SS es arena representativa del nivel A, punto en el cual este nivel presenta el mayor espesor (40 cm).

6.2. DESCRIPCIÓN DE SEDIMENTOS

Las arenas comprendidas entre las dos pertenencias mineras en estudio corresponden en su mayoría a sedimentos derivados de la meteorización y erosión de las rocas de la cuenca del río Itata. En un reconocimiento preliminar, las arenas tienen una tonalidad oscura, variando de gris verdoso oscuro a gris pardo oscuro. Están compuestas principalmente de minerales ferromagnesianos, hecho que se corrobora por el alto grado magnetismo que tienen estos sedimentos (Figura 6.3). Se reconocen mayoritariamente granos de olivino, magnetita, y menor medida de hematita, líticos y cuarzo.

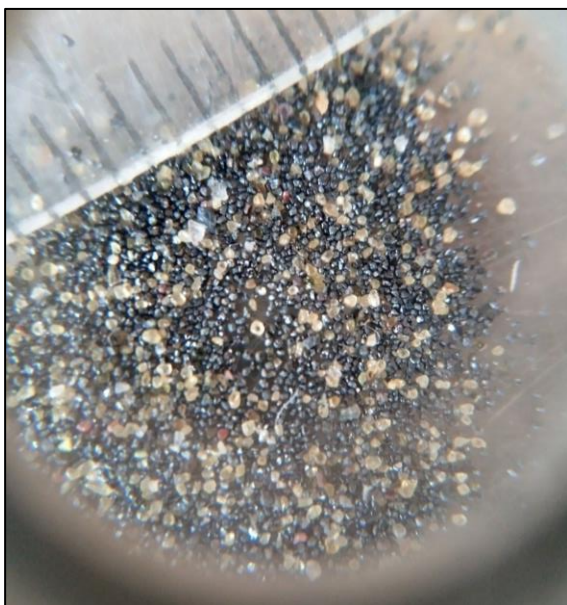


Figura 6.3. Granos minerales de las arenas en estudio vistas en lupa x5. Recolectados de Nivel A. Líneas de graduación marcan 1 mm.

6.2.1. Densidad arena total

La determinación de la densidad se realizó en triplicado y sus resultados se compilan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Densidad de muestras de arenas.

Muestra	Densidad relativa, g/ml
C1-SS	3,2520
C2-SS	3,5273
C3-SE	3,0100
C4-SE	3,1720

6.2.2. Granulometría arena total

Los datos de granulometría obtenidos se detallan a continuación en las tablas y gráficos correspondientes. El detalle completo por cada muestra se puede revisar en el anexo 1. En primera instancia, se tiene un resumen de los resultados obtenidos en la Tabla 6.2, así como en los gráficos 6.1 y 6.2.

Tabla 6.2 Resultados del tamizado por mallas ASTM

Malla ASTM	Tamaño [μm]	Pasante [%]			
		C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
+10#	2000	100,00	99,98	99,88	99,79
+18#	1000	99,51	99,12	97,33	95,38
+35#	500	83,60	90,58	77,33	66,64
+60#	250	16,93	36,58	16,49	12,45
+70#	210	9,67	26,03	9,39	7,66
+80#	177	5,58	14,82	5,29	4,13
+100#	149	2,35	4,06	2,06	1,14
+140#	105	0,15	0,19	0,22	0,05
+200#	74	0,00	0,00	0,00	0,00
-200#	74				

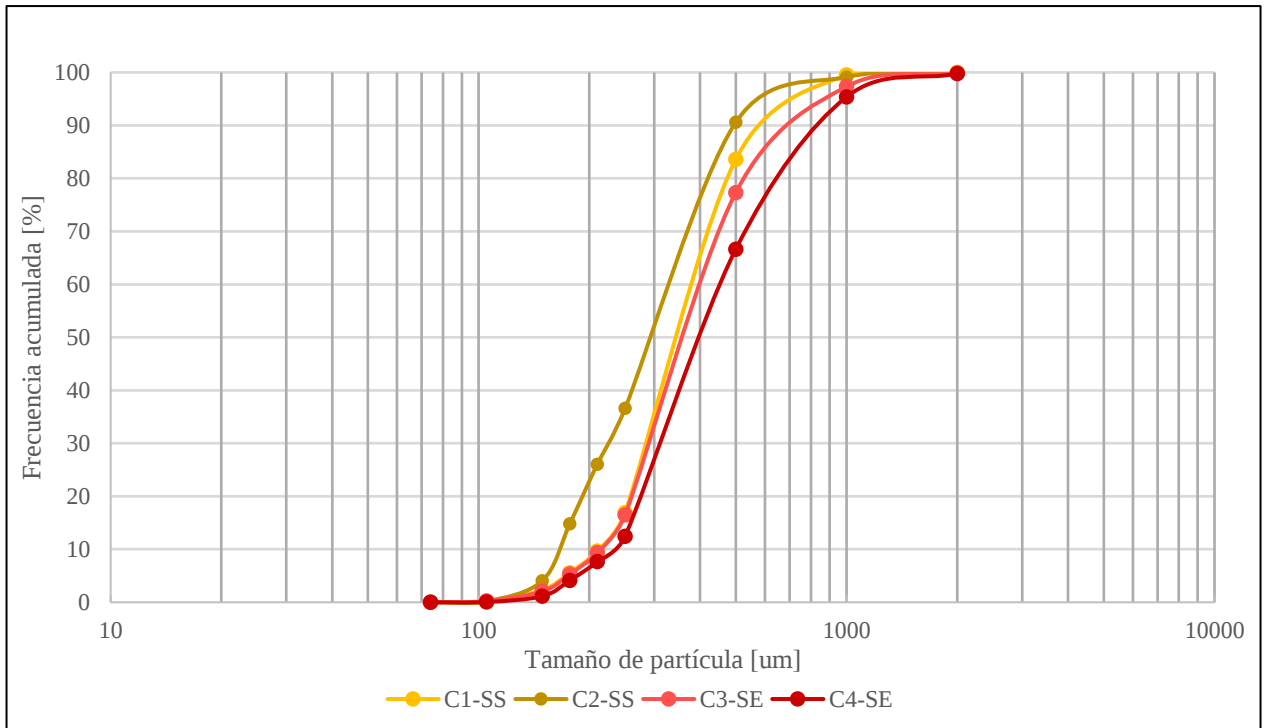


Gráfico 6.2 Frecuencia acumulada de tamaño de partícula para muestras de arena.

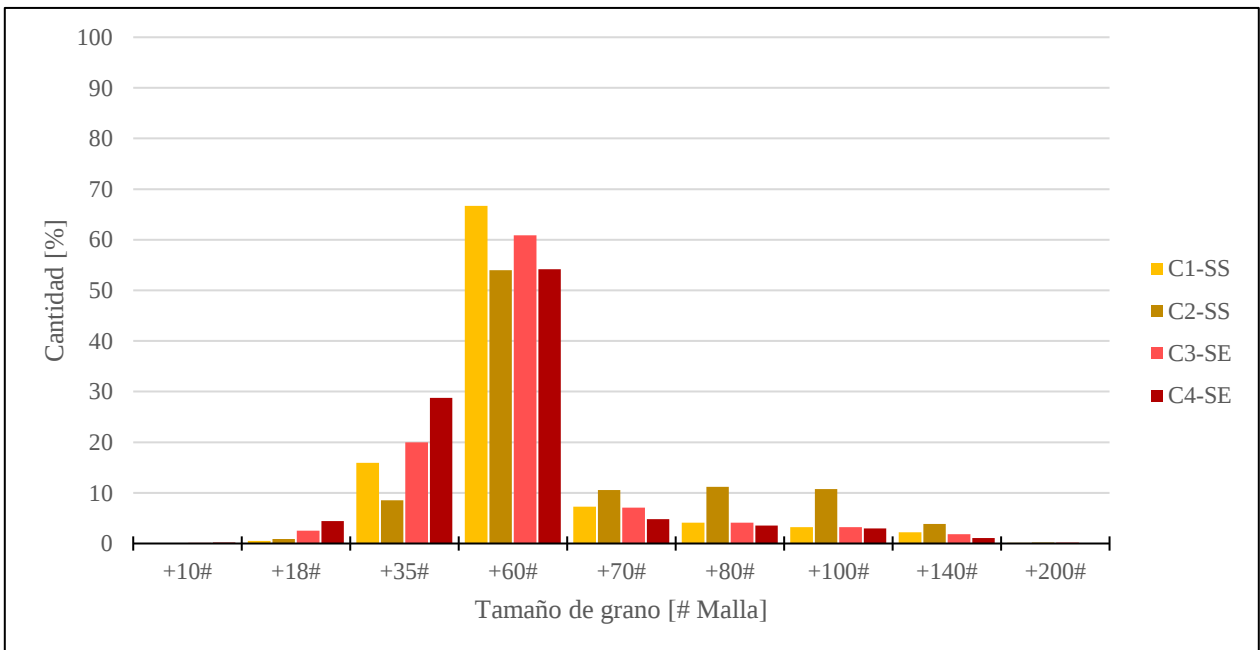


Gráfico 6.1 Distribución de tamaño de grano en las muestras de arena.

Como se puede apreciar en el gráfico 6.1, de las cuatro muestras, la muestra C2-SS presenta una tendencia distinta y alejada con respecto a las otras tres, las cuales tienen curvas de frecuencia más

similares. Esto queda mejor ilustrado al observar la distribución de sedimentos según malla ASTM (Gráfico 6.2), donde se puede ver que la moda de los datos se encuentra en la malla 60#, siendo este el tamaño predominante en las muestras (>50% de los datos), mientras que, por otro lado, se aprecia que las mayores diferencias se encuentran en las mallas 35#, 80# y 100#. De acuerdo con lo anterior, la muestra C2-SS contiene una menor cantidad de partículas grandes (35#) y una mayor cantidad de partículas más finas (80#, 100#).

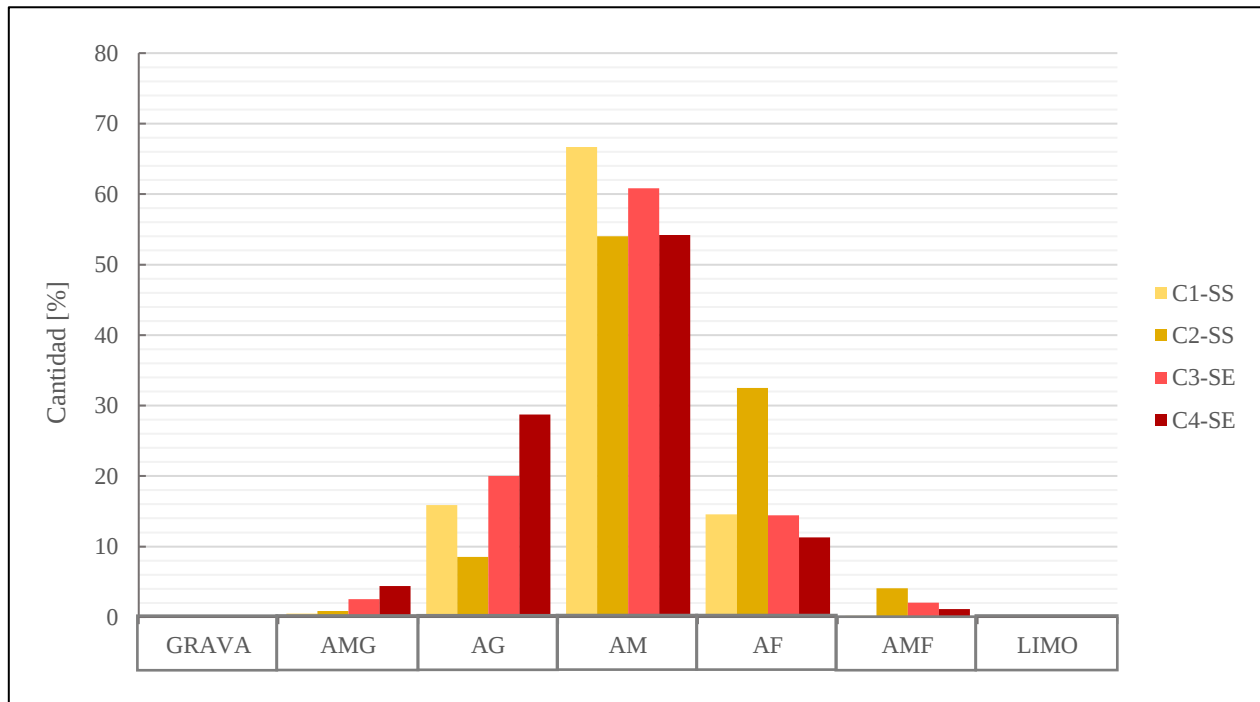
Para incorporar esta información de una manera más rápida de interpretar, se dispondrá de un formato más cualitativo mediante la correlación de los datos con la clasificación de sedimentos de Wentworth (1922), quien clasifica las partículas por su tamaño en una escala ampliamente usada en geología. Esto permite añadir otra interpretación a los resultados (Figura 6.4), agrupando los sedimentos por tipo según la clasificación antes nombrada, de acuerdo con lo compilado en la tabla 6.2 y el gráfico 6.3.

[mm]	Clasificación por tamaño de grano			Malla ASMT Nº [µm]	
256	Bloques	Grava	Gb	5#	4000
64	Guijarros		Gjs	7#	2830
4	Guija		Gj	10#	2000
2	Gránulo		Gn	14#	1410
1	Muy gruesa	Arena	Amg	18#	1000
0.5	Gruesa		Ag	25#	710
0.25	Media		Am	35#	500
0.125	Fina		Af	45#	350
0.063	Muy fina		Amf	60#	250
0.032	Grueso	Limo	Lg	70#	210
0.016	Medio		Lm	80#	177
0.008	Fino		Lf	100#	149
0.004	Muy fino		Lmf	120#	125
				140#	105
				200#	74
				230#	63
		Arcilla			

Figura 6.4 Correlación entre clasificación de sedimentos por tamaño de grano de Wentworth (1922) y las mallas ASMT. Con verde están resaltadas las mallas utilizadas en el presente análisis. Las abreviaciones de la 3ra columna son informales y tienen la finalidad de hacer más cómodo el rotulado en las figuras de este estudio.

Tabla 6.3 Distribución porcentual de sedimentos según clasificación por tamaño de Wentworth (1922).

Tipo	Malla ASTM	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Grava	10#	0%	0,02%	0,12%	0,21%
Arena muy gruesa	18#	0,49%	0,86%	2,54%	4,41%
Arena gruesa	35#	15,90%	8,54%	20,00%	28,74%
Arena media	60#	66,68%	54,01%	60,85%	54,18%
Arena fina	70,80,100#	14,58%	32,52%	14,43%	11,31%
Arena muy fina	140, 200#	0,15%	4,06%	2,06%	1,14%
Limo		0%	0%	0%	0%

**Gráfico 6.3** Distribución de sedimentos de las muestras de arena según clasificación por tamaño de grano de Wentworth (1922).

De este último gráfico se aprecia de una forma más categórica la textura de los granos de arena de las 4 muestras analizadas. El tamaño de grano predominante en todas es el de arena media (Am), siendo superior al 53%, por lo que este rango es la moda del total analizado. La muestra C1-SS tiene la mayor cantidad de granos de arena media, y la menor cantidad en los tamaños extremos. Una de las principales diferencias es que la muestra C2-SS tiene la menor cantidad de arena de tamaño gruesa (Ag), pero la mayor cantidad de arena de tamaño fina y muy fina (Af, Amf), lo cual

corroborar las observaciones de terreno y se relaciona con el hecho de que, en este rango de arena fina, es donde se encuentran los granos metálicos de interés. La muestra C3-SE posee rangos similares a C1-SS, mientras que la muestra C4-SE destaca por tener la mayor cantidad de arena de tamaño muy gruesa y gruesa (Amg, Ag).

6.2.3. Granulometría de minerales metálicos

Con la disponibilidad de imágenes SIAMS generadas para la caracterización mineralógica, es posible poder contar y medir los granos que corresponden a menas metálicas, para así tener una referencia de en qué fracción de tamaño se acumulan los minerales portadores de Fe y Ti (Figura 6.5).

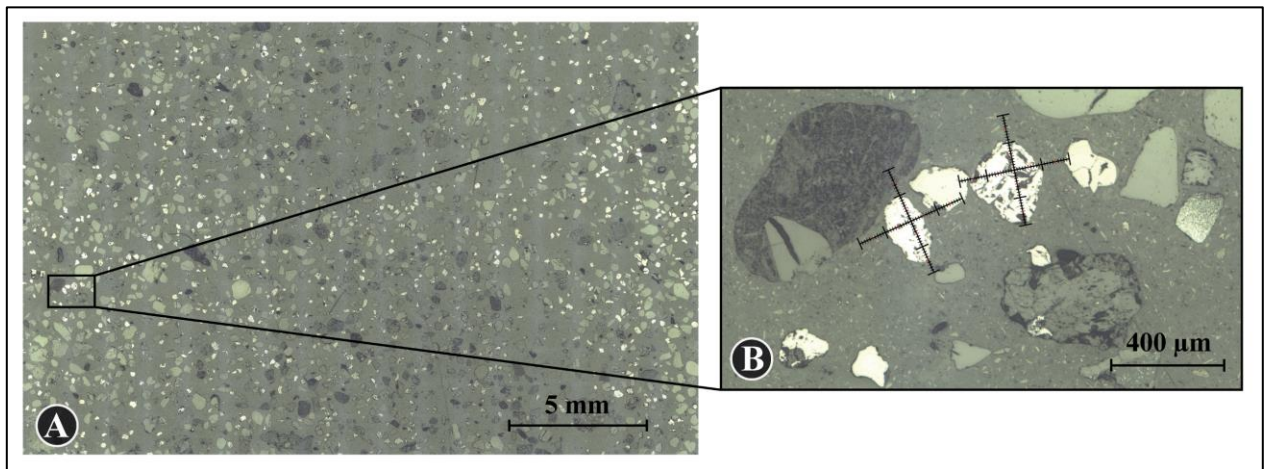


Figura 6.5 Medición de granos metálicos a partir de imagen SIAMS. [A] Microfotografía de corte pulido transparente de la muestra C2-SS. [B] Sección ejemplo para medir los granos minerales, tamaño de la mira 400 μm cada eje.

Para esto se analizaron 310 granos minerales metálicos entre las 4 muestras y se registraron las dimensiones de estos para el compilado estadístico, el cual se resume en las tablas 6.4 y 6.5, separadas por el tamaño de eje medido.

Tabla 6.4 Estadística granulométrica de menas metálicas según eje corto.

Eje Corto					
Mínimo [μm]	Máximo [μm]	Promedio [μm]	Moda [μm]	% Am	% Af
30	280	141	140	3,29	96,71

Tabla 6.5 Estadística granulométrica de menas metálicas según eje largo.

Eje Largo					
Mínimo [μm]	Máximo [μm]	Promedio [μm]	Moda [μm]	% Am	% Af
60	340	195	190	17,76	82,24

A partir de estas tablas, se entiende que la totalidad o gran parte de la fracción magnética contenida en las arenas se encuentra en el rango de tamaño de arena fina, por lo que a través de métodos de separación por tamaño de grano se puede obtener un concentrado de estos minerales. El tamaño máximo tanto del eje corto como del largo, 280 y 340 μm , determina que a partir de la malla ASMT 45# es posible concentrar estos granos de interés.

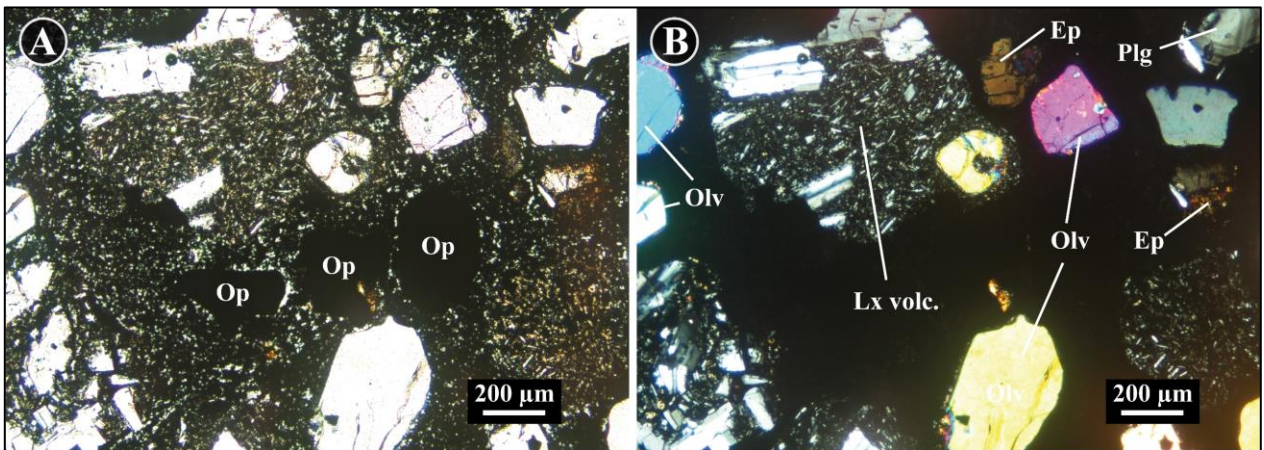
6.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

6.3.1. Petrografía del placer

Las observaciones realizadas en microscopio tanto en luz transmitida como en luz reflejada en los cortes transparentes pulidos de cada muestra de arena permiten determinar de manera general la composición mineral del placer en estudio.

6.3.1.1. Muestra C1-SS

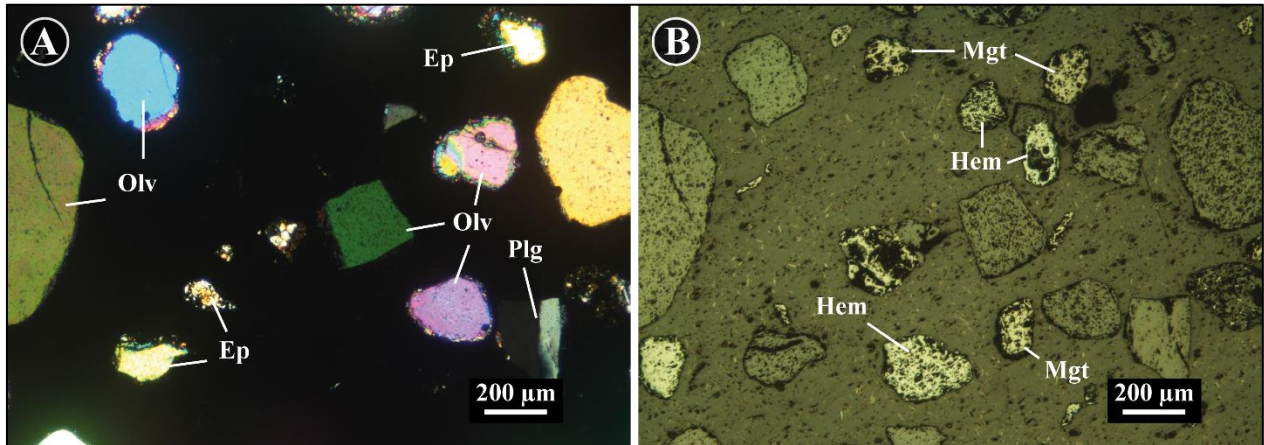
Se observan abundantes olivinos, junto con líticos volcánicos de composición básica (~andesitas basálticas), epidota, plagioclasas y poco o casi nada de cuarzo. En luz reflejada se observan granos minerales de magnetita y hematita.



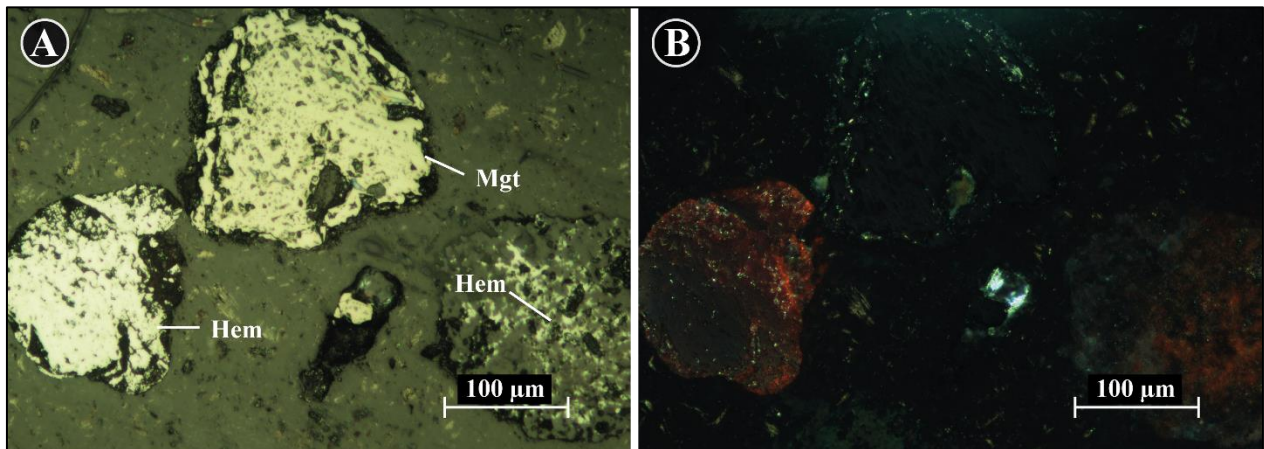
Fotomicrografía 6.1 Vista en microscopio de muestra C1-SS. [A] Nicols paralelos, [B] Nicols Cruzados. Ep: epidota, Lx. volc.: Lítico volcánico, Olv: olivino, Op: opaco, Plg: plagioclasa.

6.3.1.2. Muestra C2-SS

Es la muestra que mayor contenido de minerales metálicos posee (opacos), alrededor de un 20%. La mineralogía mayoritaria es de olivinos, seguido de epidotas, piroxenos y plagioclasas. En luz reflejada se observan magnetitas y hematitas.



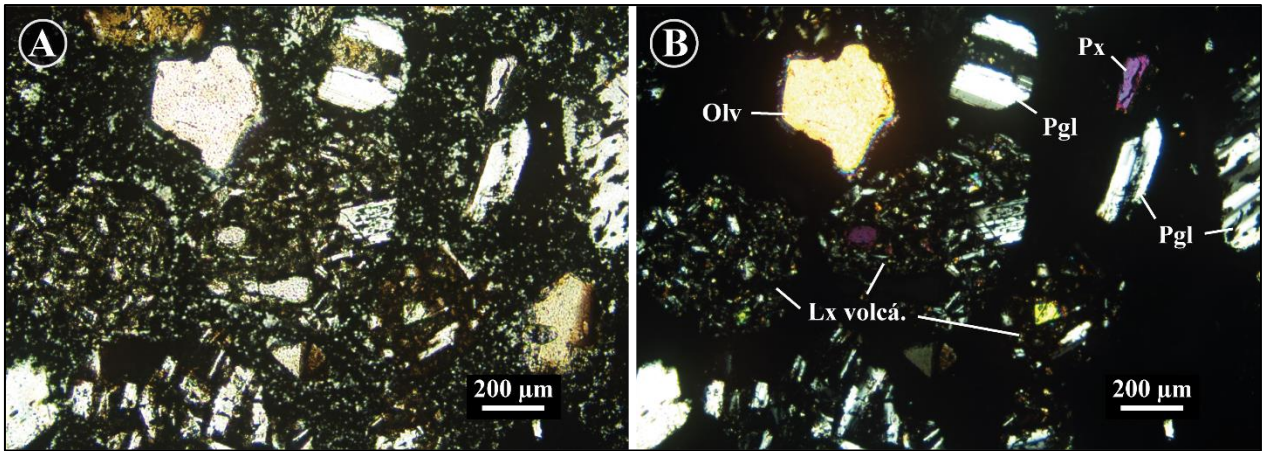
Fotomicrografía 6.2 Vista en microscopio de muestra C2-SS. [A] Nícoles cruzados, [B] Nícoles paralelos en luz reflejada. Ep: epidota, Hem: hematita, Mgt: magnetita, Olv: olivino, Plg: plagioclase.



Fotomicrografía 6.3 Vista en microscopio de muestra C2-SS. [A] Nícoles paralelos en luz reflejada, [B] Nícoles cruzados en luz reflejada. Ep: epidota, Hem: hematita, Mgt: magnetita, Olv: olivino, Plg: plagioclase.

6.3.1.3. Muestra C3-SE

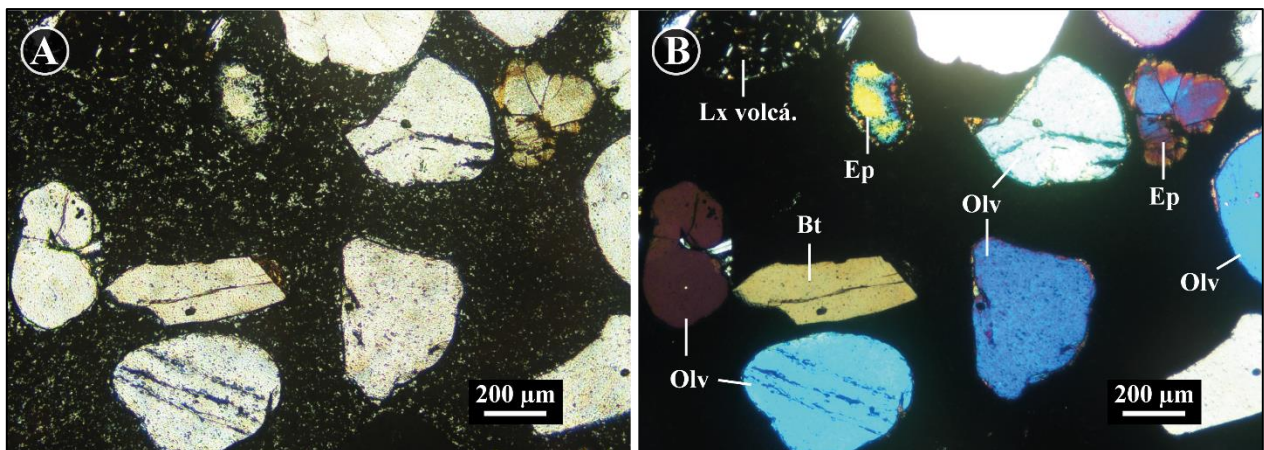
Esta muestra presenta variaciones con relación a las otras 3 arenas analizadas, observando un mayor contenido de líticos volcánicos, plagioclase, clorita en forma de alteración de minerales máficos, y una cantidad drásticamente menor de olivino.



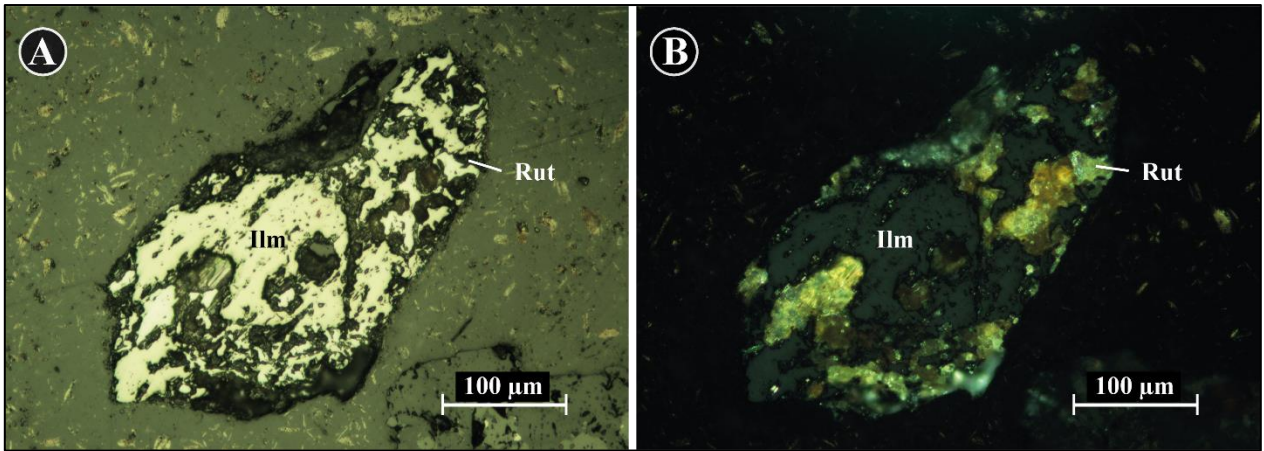
Fotomicrografía 6.4 Vista en microscopio de muestra C3-SE. [A] Nícoles paralelos, [B] Nícoles Cruzados. Lx. volc.: Lítico volcánico, Olv: olivino, Plg: plagioclasa, Px: piroxeno.

6.3.1.4. Muestra C4-SE

Composición similar a C1-SS, con una cantidad predominante de olivinos, líticos volcánicos de composición básica (andesitas basálticas) y biotitas. Esta muestra contiene clorita como mineral de alteración en líticos y plagioclasas. En luz reflejada se observan magnetitas, hematitas, y en bastante menor proporción granos de ilmenita y rutilo.



Fotomicrografía 6.5 Vista en microscopio de muestra C4-SE. [A] Nícoles paralelos, [B] Nícoles Cruzados. Bt: biotita, Ep: epidota, Lx. volc.: Lítico volcánico, Olv: olivino.



Fotomicrografía 6.6 Vista en microscopio de muestra C4-SE. [A] Nicols paralelos en luz reflejada, [B] Nicols cruzados en luz reflejada. Ilm: ilmenita, Rut: rutilo.

6.3.2. Fases minerales en arena cabeza

La mineralogía automatizada de QEMSCAN compiló las principales fases minerales que componen las cuatro muestras de arenas, como se resume en la tabla 6.6. En la misma, se encuentran resaltadas las fases mineralógicas que son mena de hierro y titanio.

De estos datos se puede notar que la mineralogía en la arena tiene una predominancia de minerales de tipo silicatos ferromagnesianos (olivino, piroxeno-anfíbol), seguidos de plagioclasa, epidota y clorita (Gráfico 6.4). La muestra C2-SS es la que contiene una mayor cantidad de óxidos de hierro y de minerales de titanio, como ilmenita. La muestra C3-SE cambia un poco la tendencia de proporción mineral siendo la más pobre en olivino, y concentrando mayor cantidad de plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico.

Además de este reporte mineralógico compilado por QEMSCAN, se contó con un breve análisis complementario, elaborado por el Dr. Alexey Novoselov del Instituto GEA, para identificar fases de hierro a partir de las imágenes SIAMS. A partir del mismo, se reconoce la presencia de hematita, y un contenido menor de Ti en los óxidos de hierro.

Tabla 6.6 Reporte de fases minerales identificadas por QEMSCAN en las muestras de arenas
(wt. = peso)

Fase Mineral [%wt.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Cuarzo	2,84	1,49	6,94	3,00
Feldespatos K	2,12	1,82	6,32	3,57
Plagioclasa	10,69	7,02	26,39	15,10
Piroxeno-Anfíbol	21,32	17,26	18,44	18,20
Clorita	8,20	9,01	11,14	7,09
Muscovita	0,27	0,08	0,56	0,17
Biotita	0,57	0,39	1,20	0,81
Epidota	5,69	3,93	14,09	8,17
Olivino	43,69	34,35	9,79	38,15
Serpentina	0,25	0,04	0,06	0,08
Apatito	0,04	0,24	0,04	0,06
Arcillas	0,13	0,06	0,28	0,21
Carbonatos	0,26	0,24	0,25	0,36
Óxidos de Fe	2,25	19,63	1,82	2,54
Ilmenita	0,18	2,72	0,08	0,18
Titanita	0,05	0,14	0,11	0,08
Rutilo	0,01	0,03	0,01	0,02
Otros	1,43	1,57	2,47	2,19

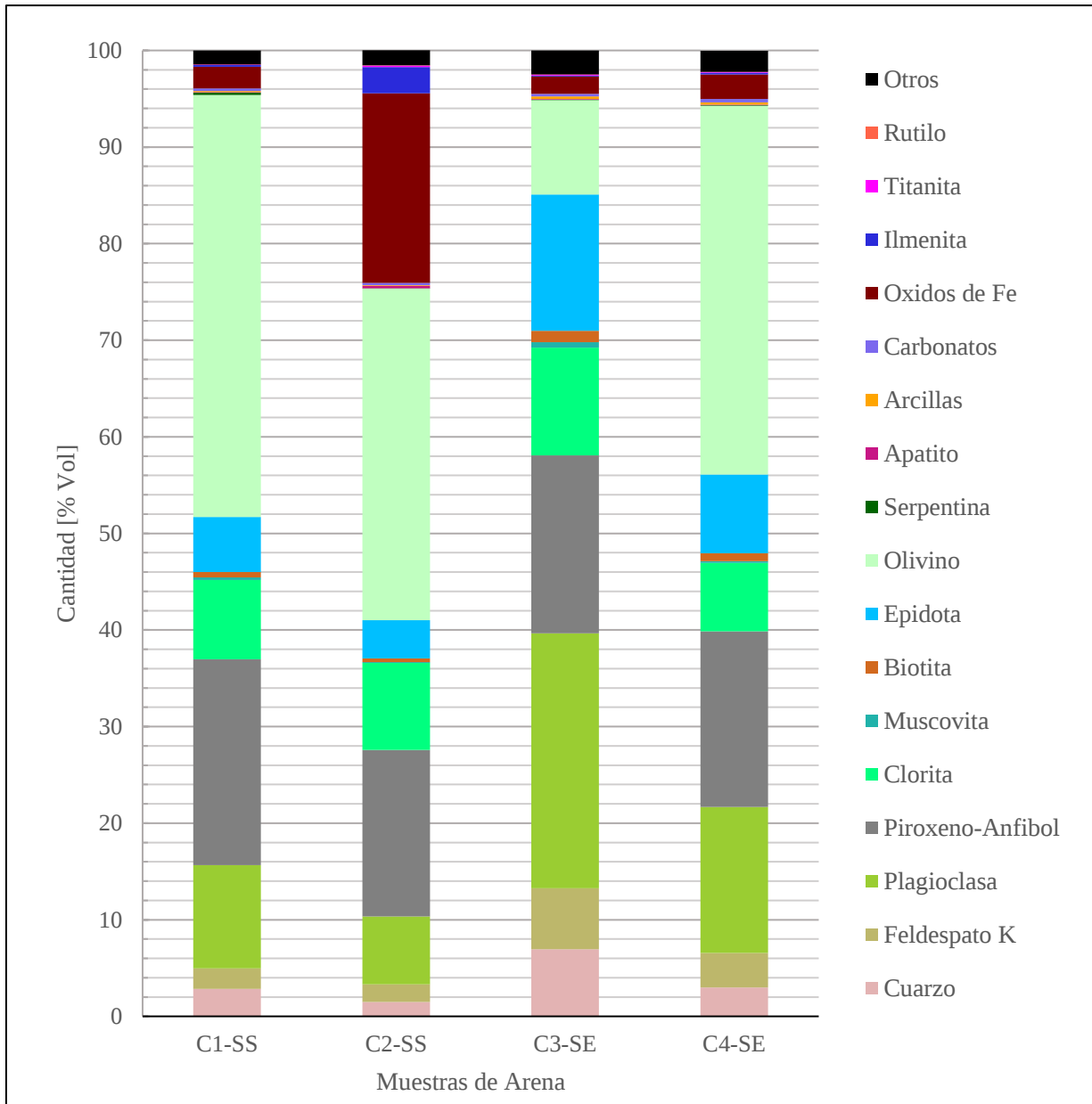


Gráfico 6.4 Contenido mineral según porcentaje en volumen para cada muestra.

Este método permite además reconocer en que fases minerales está contenido el titanio. De los píxeles analizados, se determina la presencia de ilmenita, titanita y rutilo como principales fases portadoras de titanio. Del análisis en imágenes SIAMS se reconoce en menor medida titanio incorporado en minerales de hierro como magnetita y hematita. También se identificó que la hematita y rutilo, además de estar como grano monomineral, se encuentran de forma dispersa dentro de feldespato (Figura 6.6).

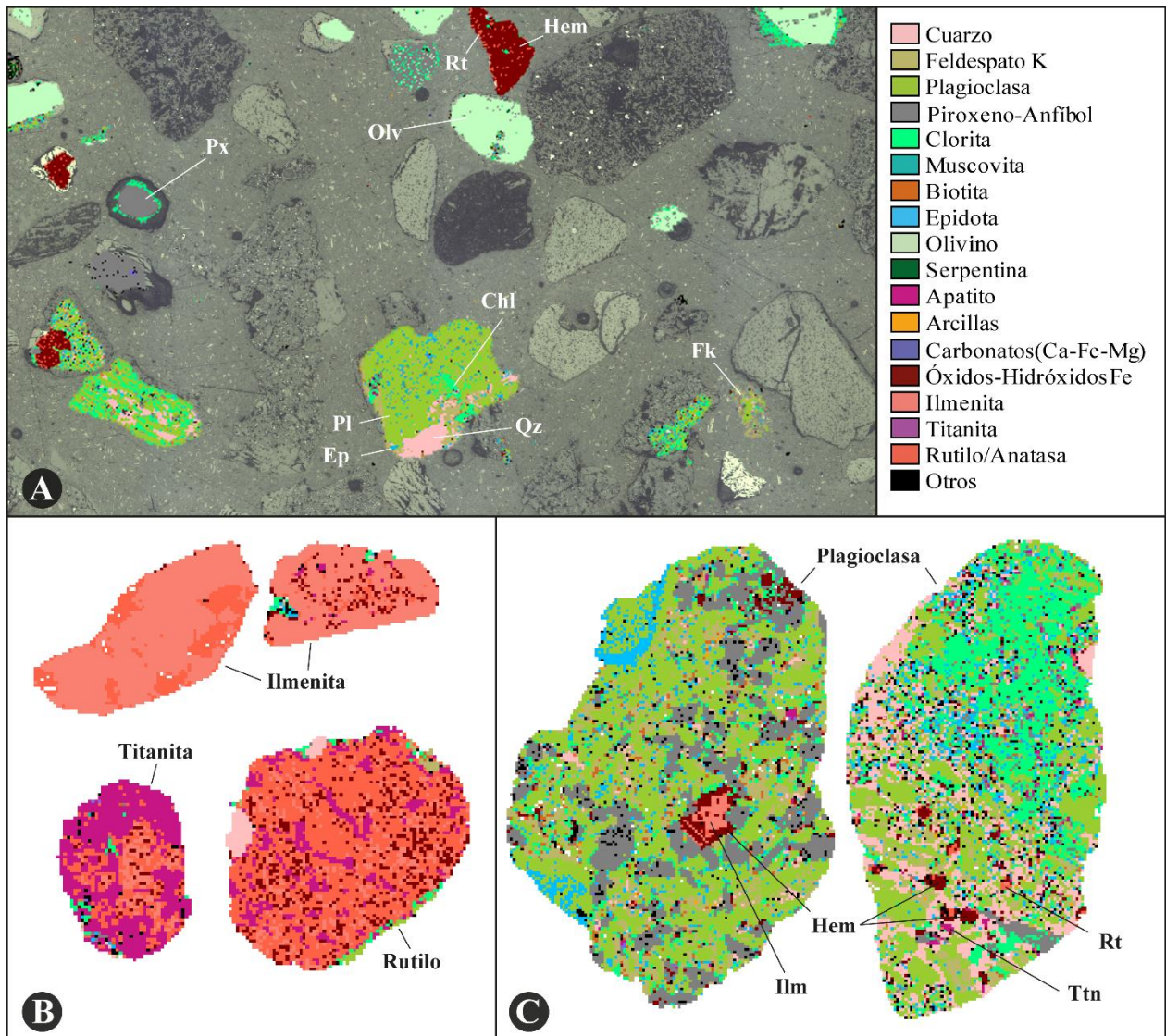


Figura 6.6 Particle Mineral Analysis (PMA) realizado por QEMSCAN. Cada píxel es asignado con un color que representa una fase mineral. [A] Microfotografía SIAMS con parte de los resultados del PMA cargados sobre la misma, mostrando la composición mineralógica general de la muestra C4-SE (Chl: clorita, Ep: epidota, Fk: feldespato potásico, Hem: hematita, Oliv: olivino, Pl: plagioclasa, Px: piroxeno, Qz: cuarzo; Rt: rutilo, Ttn: titanita). [B] Fase monominerales menos de titanio reconocidas por el PMA. [C] Minerales contenedores de titanio dispersos en plagioclasa.

6.3.3. Magnetita en arena cabeza

El análisis realizado por el equipo SATMAGAN registra la cantidad de porcentaje en peso de magnetita en las cuatro muestras de arenas, lo cual permite determinar la cantidad de este mineral dentro del porcentaje de óxidos de hierro reportado por QEMSCAN. Estos resultados son calibrados según se muestra en el gráfico 6.5 y compilados en la tabla 6.7.

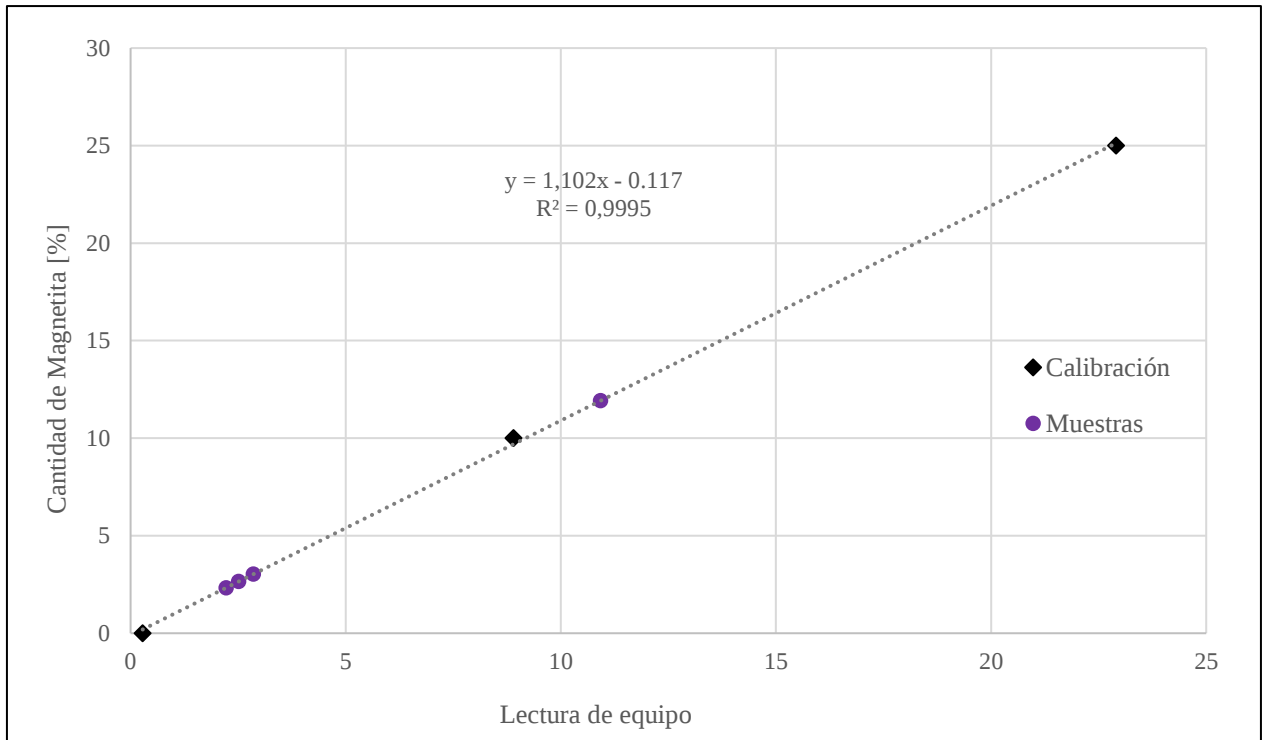


Gráfico 6.5 Determinación de magnetita en SATMAGAN.

Tabla 6.7 Datos de calibración y lecturas de muestras por SATMAGAN

Muestra	Lectura	Magnetita [%wt.]
Calibración 1	0,28	0
Calibración 2	8,9	10
Calibración 3	22,9	25
C1-SS	2,85	3,02
C2-SS	10,92	11,92
C3-SE	2,22	2,33
C4-SE	2,51	2,65

Estos datos indican una cantidad similar de mineral de magnetita para las muestras C1-SS, C3-SE y C4-SE, mientras que la muestra C2-SS es la que concentra la mayor cantidad con casi un 12%. Esto se correlaciona con las observaciones en terreno y la clasificación de niveles (A y B), así como con lo determinado con QEMSCAN. Referente a esto último, estos porcentajes de magnetita se pueden incorporar a los datos de PMA y obtener así que fracción corresponde a solo magnetita y que fracción corresponde a otros óxidos (Tabla 6.8).

Tabla 6.8 Integración entre los datos de magnetita de SATMAGAN y los datos mineralógicos de QEMSCAN (% corresponden a % wt)

Muestra	Lectura	% Magnetita	% FeOx PMA	% FeOx - % Mag
C1-SS	2,85	3,02	2,25	-0,77
C2-SS	10,92	11,92	19,12	7,20
C3-SE	2,22	2,33	1,82	-0,51
C4-SE	2,51	2,65	2,54	-0,11

Los valores negativos en las muestras C1-SS, C3-SE y C4-SE probablemente se deban al porcentaje de error de uno o ambos métodos involucrados, pero indicaría que la gran mayoría del porcentaje de óxidos correspondería a magnetita. Para la muestra C2-SS, el porcentaje de magnetita determinado en SATMAGAN indicaría que más de la mitad del porcentaje de óxidos de hierro son dicho mineral. Por lo tanto, el Fe está contenido principalmente en magnetita. Estos valores son aproximaciones, y queda incorporar el resultado de la concentración elemental por magnetismo.

6.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Los resultados de los análisis por FRX-EAA de las muestras extraídas determinan la concentración elemental en % en volumen para arena cabeza, concentrado y relave, tras separación magnética por DTT.

6.4.1. Elementos mayores en arena cabeza

Se denomina elemento mayor a los elementos químicos en altas concentraciones en la corteza y que están presentes en la cristalización de los minerales formadores de roca. A partir de los análisis, el contenido de óxidos en las arenas cabeza se compila en la tabla 6.9.

Tabla 6.9 Reporte del contenido de óxidos en arena cabeza. Notar que la expresión Fe_2O_3 incluye óxido ferroso y férrico.

Analito [% Vol.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe_2O_3	19,07	31,09	12,06	18,19
SiO_2	45,74	36,55	52,25	46,64
CaO	4,97	3,66	6,71	5,45
MnO	0,29	0,38	0,18	0,26
Al_2O_3	8,53	6,04	14,33	10,33
TiO_2	1,43	4,00	1,22	1,67
MgO	18,48	17,71	8,60	15,24
P_2O_5	0,07	0,08	0,13	0,09
SO_3	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
K_2O	0,50	0,33	0,91	0,60
CuO	0,06	0,05	0,06	0,07
ZnO	0,02	0,04	0,02	0,02
As_2O_3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PbO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Na_2O	1,63	1,10	2,69	1,93
MoO_3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

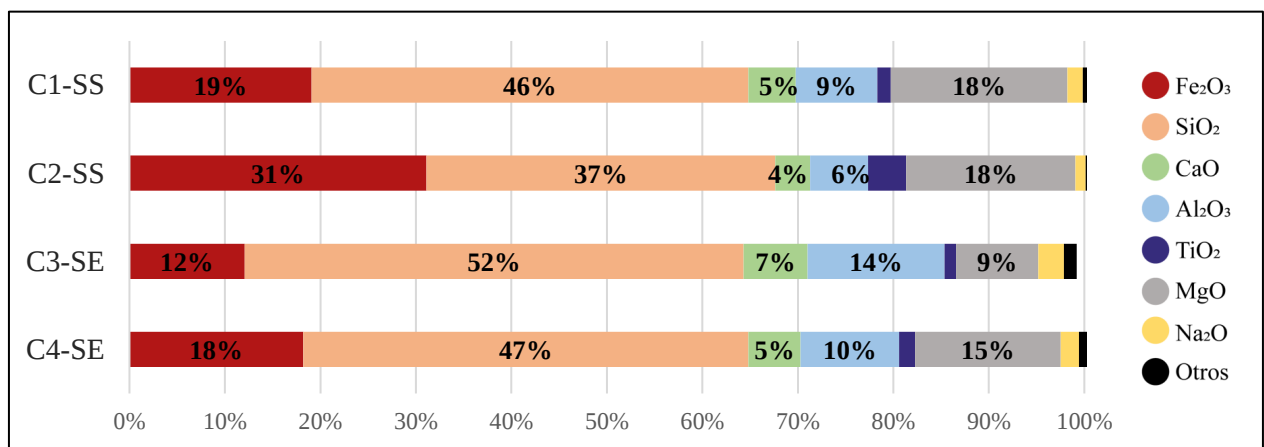


Gráfico 6.6 Proporción del contenido de óxidos principales en arena cabeza.

A partir del gráfico, es posible notar que las muestras C1-SS y C4-SE presentan una composición similar en la proporción de óxidos. La muestra C2-SS posee un mayor contenido de Fe_2O_3 , TiO_2 y

un menor contenido de SiO_2 , siendo lo contrario a C3-SE, la cual además esta enriquecida en Al_2O_3 y empobrecida en MgO . El contenido por elemento revelado por los análisis se registra en la tabla 6.10.

Tabla 6.10 Reporte de contenido de elementos mayores en arena cabeza.

Analito [% Vol.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe	13,33	21,74	8,44	12,72
Si	21,38	17,08	24,42	21,80
Ca	3,55	2,61	4,79	3,89
Mn	0,22	0,29	0,14	0,20
Al	4,51	3,20	7,59	5,47
Ti	0,85	2,39	0,73	1,00
Mg	11,14	10,68	5,18	9,19
P	0,03	0,04	0,06	0,04
S	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
K	0,41	0,27	0,76	0,50
Cu	0,05	0,04	0,05	0,06
Zn	0,02	0,03	0,01	0,02
As	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
P	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Na	1,21	0,81	2,00	1,43
Mo	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

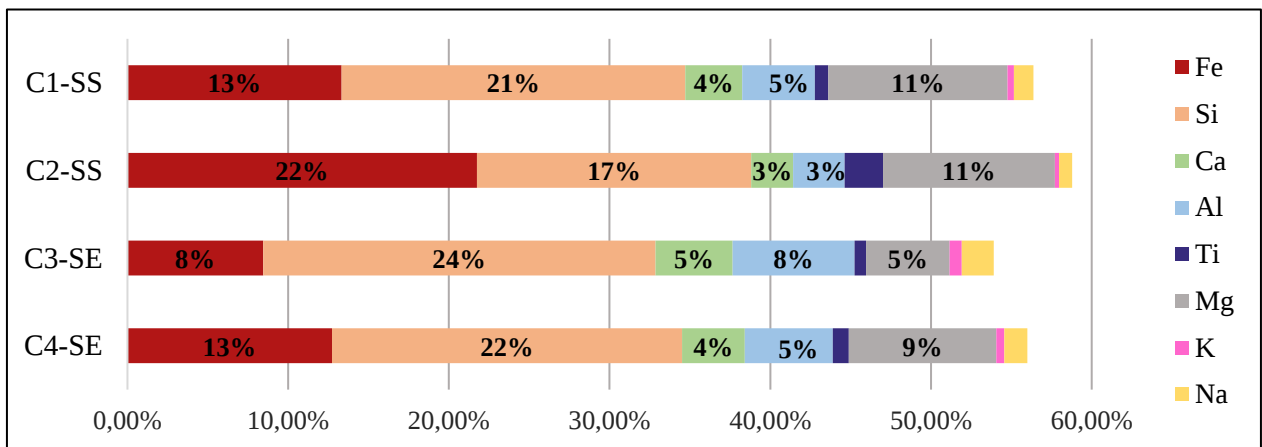


Gráfico 6.7 Proporción del contenido de elementos mayores en la arena cabeza

Como se aprecia en el gráfico 6.8, las concentraciones elementales siguen las mismas tendencias en las cuatro muestras, a excepción del hierro en la muestra C2-SS que pasa a ser el elemento más abundante por sobre la sílice.

6.4.2. Elementos mayores en concentrado

A partir de la separación magnética por DTT, se realizan análisis FRX+EAA a los 4 concentrados generados, registrando el contenido de óxidos de elementos principales en la tabla 6.11. Debido a la baja cantidad de fracción magnética de la muestra C3-SE, no fue posible recopilar los valores de óxidos para esta por parte del laboratorio, ya que no se lograba concentrar suficiente material a partir de los 20 gramos de arena cabeza que admitía el DTT. Debido a esto, solo se logró medir la cantidad elemental de Fe y Ti para esta muestra.

Tabla 6.11 Reporte de contenido de óxidos en concentrado.

Analito [% Vol.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe₂O_{3t}	75,49	81,31	-	76,07
SiO ₂	7,42	2,87	-	6,35
CaO	0,59	0,32	-	0,55
MnO	0,47	0,47	-	0,47
Al ₂ O ₃	2,28	2,29	-	2,34
TiO₂	9,63	10,71	-	10,06
MgO	5,04	3,01	-	4,73
P ₂ O ₅	0,02	<0,02	-	<0,02
SO ₃	<0,02	<0,02	-	<0,02
K ₂ O	0,05	0,02	-	0,05
CuO	0,05	0,05	-	0,06
ZnO	0,09	0,10	-	0,09
As ₂ O ₃	<0,01	<0,01	-	<0,01
PbO	<0,01	<0,01	-	<0,01
Na ₂ O	0,10	<0,08	-	0,11
MoO ₃	<0,01	<0,01	-	<0,01

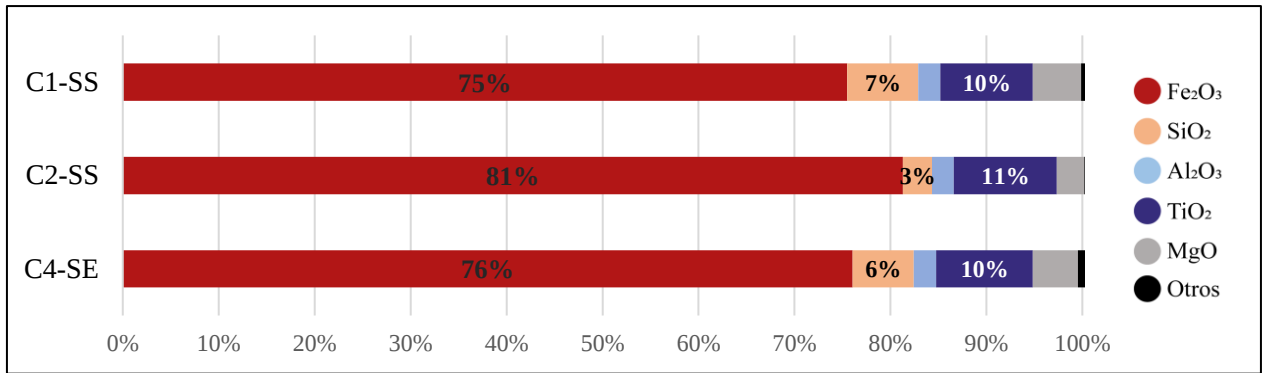


Gráfico 6.8 Proporción de contenido de óxidos principales en concentrado.

Tras la separación magnética, el concentrado se ve enriquecido de Fe y Ti, siendo los dos óxidos más abundantes del mismo. La muestra C2-SS es la que mayor porcentaje tiene de ambos, mientras que C1-SS y C4-SE tienen proporciones similares. El contenido de elementos mayores se recopila en la tabla 6.12.

Tabla 6.12 Reporte de contenido de elementos mayores en concentrado.

Elemento [% Vol.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe	54,17	58,53	51,95	54,74
Ti	5,77	6,42	4,03	6,03
Si	3,47	1,34	-	2,97
Mg	3,04	1,81	-	2,85
Al	1,22	1,21	-	1,24
Ca	0,42	0,23	-	0,39
Mn	0,37	0,36	-	0,36
Na	0,08	0,06	-	0,08
Zn	0,07	0,08	-	0,07
K	0,04	0,02	-	0,04
Cu	0,04	0,04	-	0,04
P	0,01	0,01	-	0,01
S	<0,01	<0,01	-	<0,01
As	<0,01	<0,01	-	<0,01
Pb	<0,01	<0,01	-	<0,01
Mo	<0,01	<0,01	-	<0,01

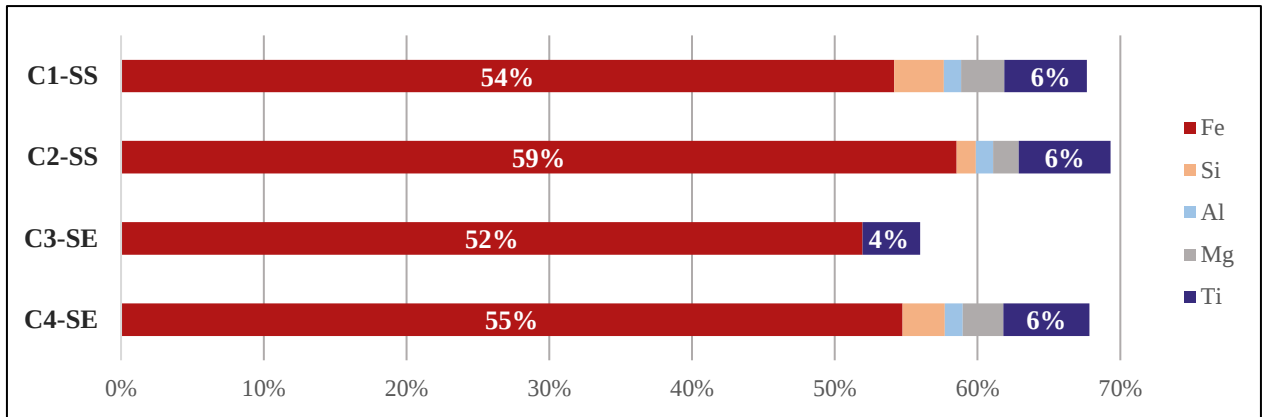


Gráfico 6.9 Proporción de contenido de elementos principales en concentrado.

6.4.3. Elementos mayores en relave

En paralelo con el concentrado, se genera el relave, la fracción de arena no magnéticas de las muestras analizadas. Los datos registrados para óxidos de elementos principales se compilan en la tabla 6.13.

Tabla 6.13 Reporte de contenido de óxidos en relave.

Analito [% Vol.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe₂O_{3t}	17,06	20,52	11,33	15,01
SiO ₂	47,55	44,25	53,24	49,53
CaO	5,11	4,40	6,74	5,70
MnO	0,29	0,36	0,18	0,24
Al ₂ O ₃	8,10	6,49	13,65	10,50
TiO₂	1,05	2,39	1,06	1,14
MgO	19,37	20,71	9,21	15,35
P ₂ O ₅	0,09	0,10	0,13	0,11
SO ₃	<0,02	<0,02	<0,02	<0,06
K ₂ O	0,50	0,40	0,89	0,62
CuO	0,04	0,06	0,02	0,03
ZnO	0,02	0,02	0,02	0,02
As ₂ O ₃	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PbO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Na ₂ O	1,55	1,22	2,62	1,93
MoO ₃	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

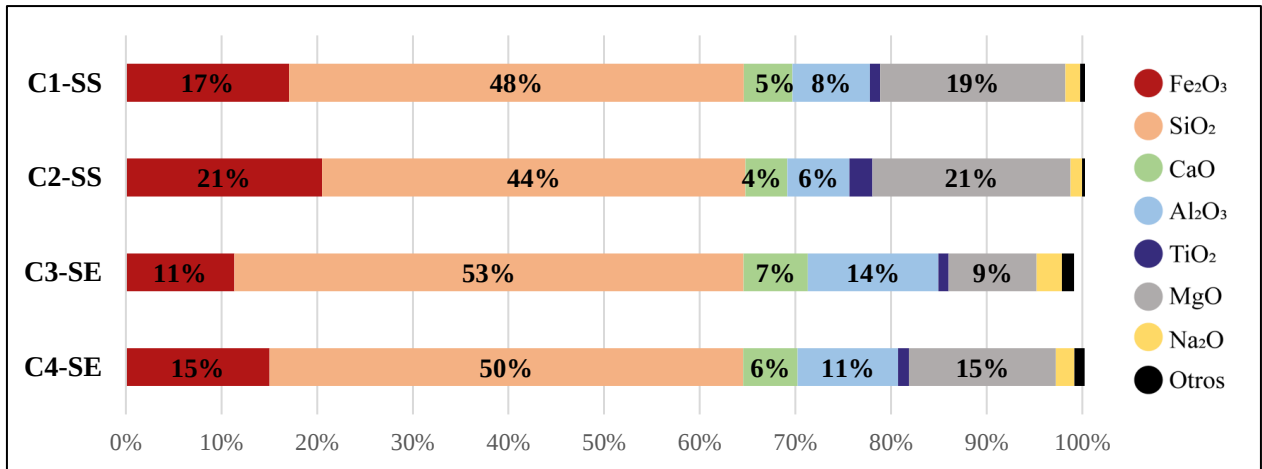


Gráfico 6.10 Proporción de contenido de óxidos principales en relave

Producto de la concentración magnética, esta fracción se ve enriquecida en su proporción de SiO₂, mientras que los demás componentes mantienen la misma tendencia que en la arena cabeza. Los datos por elemento son compilados en la tabla 6.14.

Tabla 6.14 Reporte de contenido de elementos mayores en relave.

Elemento [% Vol.]	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe	11.93	14.35	7.92	10.50
Si	22.23	20.68	24.89	23.16
Ca	3.65	3.15	4.82	4.08
Mn	0.22	0.28	0.14	0.19
Al	4.29	3.43	7.22	5.56
Ti	0.63	1.43	0.64	0.68
Mg	11.68	12.49	5.56	9.26
P	0.04	0.04	0.06	0.05
S	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K	0.41	0.33	0.74	0.52
Cu	0.03	0.04	0.02	0.02
Zn	0.02	0.02	0.01	0.02
As	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Na	1.15	0.91	1.94	1.43
Mo	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

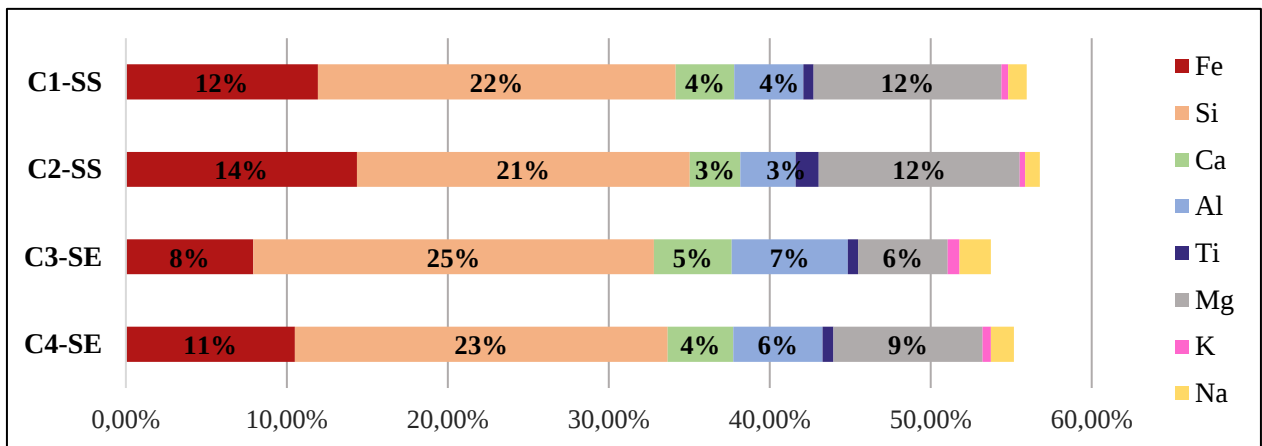


Gráfico 6.11 Proporción de elementos mayores en relave.

6.5. LEY Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS

6.5.1. Ley de Fe-Ti

Con los resultados determinados por la separación magnética DTT y análisis químico FRX+EAA, es posible determinar una ley representativa tanto para la arena cabeza y concentrado, en los dos niveles reconocidos en el placer de playa. En la tabla 6.15 se registran los datos del balance de masas, lo cual permite determinar el valor % DTT para las cuatro muestras (Ecuación 2).

Tabla 6.15 Cálculo de %DTT en el balance de masas por separación magnética. Notar que para la formula del %DTT (Ecuación 2) el C sería la masa de concentrado y H la masa de cabeza analizada.

Muestra	Cabeza Analizada [g]	Concentrado Magnético [g]	Relave No magnético [g]	Perdida [g]	% DTT	Error relativo
C1-SS	45,90	2,00	4149	2,41	4,36	5,25
C2-SS	23,40	3,80	19,21	0,39	16,24	1,67
C3-SE	22,60	0,60	20,90	1,10	2,65	4,87
C4-SE	43,00	1,70	39,02	2,28	3,95	5,30

Con el balance de masas, se compila el balance de hierro y titanio, para los 3 materiales del proceso, siendo la información del hierro resumida en la tabla 6.16.

Tabla 6.16 Reporte de la cantidad y ley de hierro en los sólidos generados por DTT.

Muestra	Cabeza [% Fe]	Concentrado [% Fe]	Relave [% Fe]	Magnetismo	% Fe magnético	Error relativo
C1-SS	13,77	54,17	11,93	17,15	2,36	5,25
C2-SS	21,52	58,53	14,35	44,17	9,51	1,67
C3-SE	9,09	51,95	7,92	15,14	1,38	4,87
C4-SE	12,25	54,74	10,50	17,65	2,16	5,30

De esta manera se determina la ley de Fe para los concentrados, y la ley de Fe para la cabeza, ósea, arena sin separación magnética, valor que corresponde al parámetro % Fe magnético. Por otra parte, se recopila en la tabla 6.17 los valores del balance para el Ti.

Tabla 6.17 Reporte de la cantidad y ley de titanio en los sólidos generados por DTT.

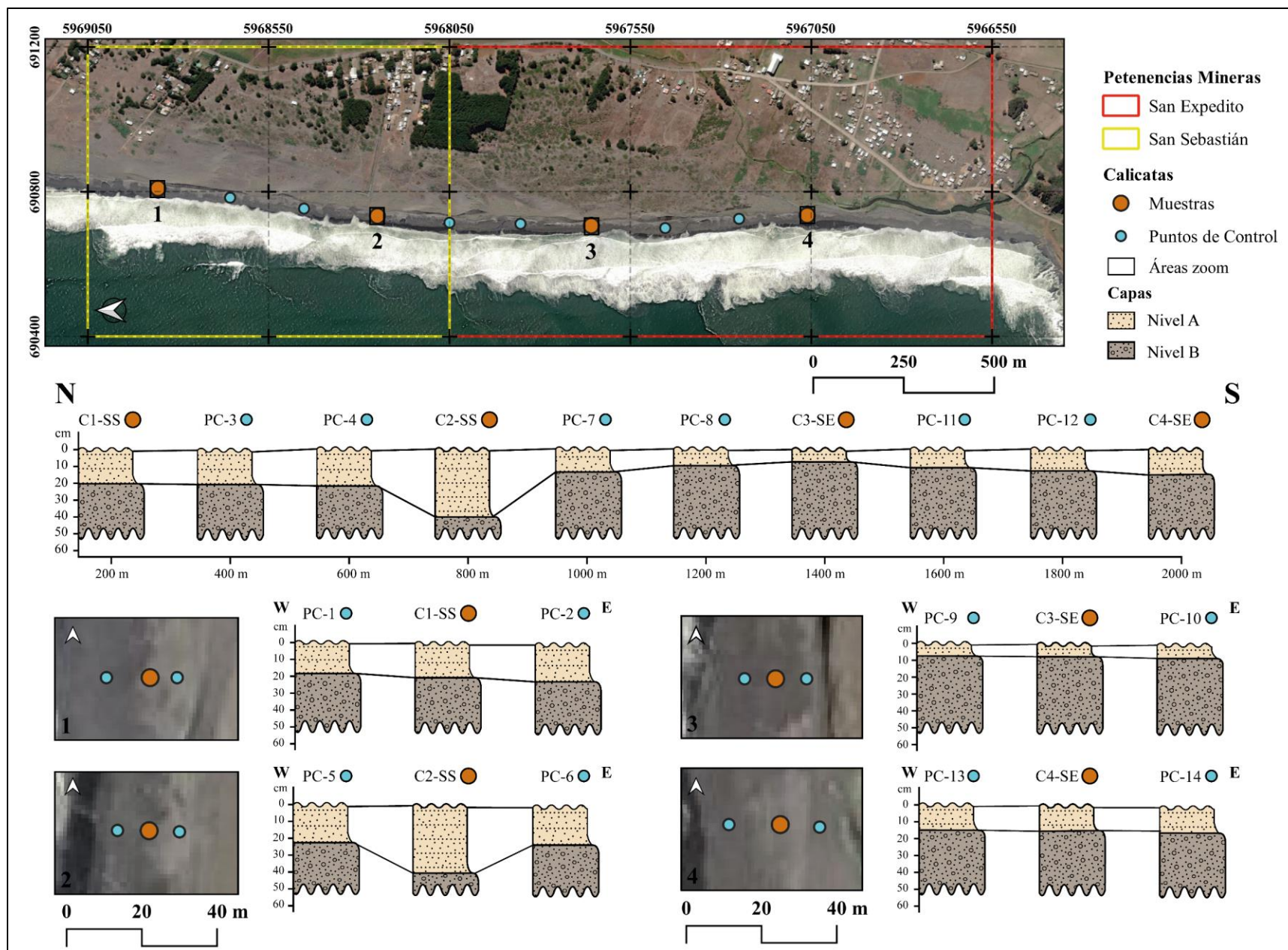
Muestra	Cabeza [% Ti]	Concentrado [% Ti]	Relave [% Ti]	% Ti magnético	Error relativo
C1-SS	0,85	5,77	0,63	0,25	-0,47
C2-SS	2,24	6,42	1,43	1,04	6,26
C3-SE	0,73	4,03	0,64	0,11	0,00
C4-SE	0,89	6,03	0,68	0,24	10,85

Para el titanio en general, su concentración se puede llevar a cabo por métodos gravitacionales y magnéticos, debido a que sus minerales menas son de baja a altamente magnéticos (Valderrama, 2008). Considerando lo anterior, se tiene 3 leyes de Ti a partir de los datos recopilados por los análisis químicos. La primera ley es de la arena cabeza (arena sin tratar) que corresponde a los valores de la segunda columna de la tabla 6.17, donde se considera el titanio contenido tanto en fases magnéticas y no magnéticas. La segunda ley es la del concentrado magnético, en la cual hay un aumento de Ti y corresponden a los valores de la tercera columna de la tabla 6.17. La última ley indica la cantidad de titanio que es posible concentrar a través de separación magnética para la arena cabeza, que corresponde al valor % Ti magnético.

6.5.2. Modelo del depósito

Con la descripción de terreno acerca de las dimensiones del placer, los niveles de arena, integrado a los resultados mineralógicos y químicos, se determina una ley representativa para las distintas secciones del depósito y el tonelaje de este. Se realizó un modelo 3D del yacimiento usando los softwares QGIS y Leapfrog Geo, en el primero se generan los datos vectoriales de geomorfología, datos de topografía con DEM (*Digital Elevation Model*), para importar todo en el segundo, junto con los datos de las calicatas y puntos de control.

La información de las calicatas y puntos de control (Figura 6.7), permite por un modelado de secciones su extrapolación para crear en 3D los dos niveles de arenas A y B descritos anteriormente. Este método de modelado es común para yacimientos mantiformes, en este caso, las arenas en estudio, como en todo ambiente litoral, están depositadas de forma horizontal o subhorizontal, permitiendo aplicar este tipo de metodología.



Con la información de las calicatas interpretada y correlacionada, se traspasa estos datos al software de modelación para generar los volúmenes de los niveles, tanto para los puntos muestreados como para el área circundante. Para el modelado de las zonas interpretadas como extensión de los niveles del placer se estima una potencia promedio para el nivel A de 0,20 m y para el nivel B de 1 m. El modelo del depósito se ilustra en la figura 6.8. En total, el placer litoral expuesto representa un 12,17% del área total de ambas pertenencias mineras juntas, con 243.393 m².

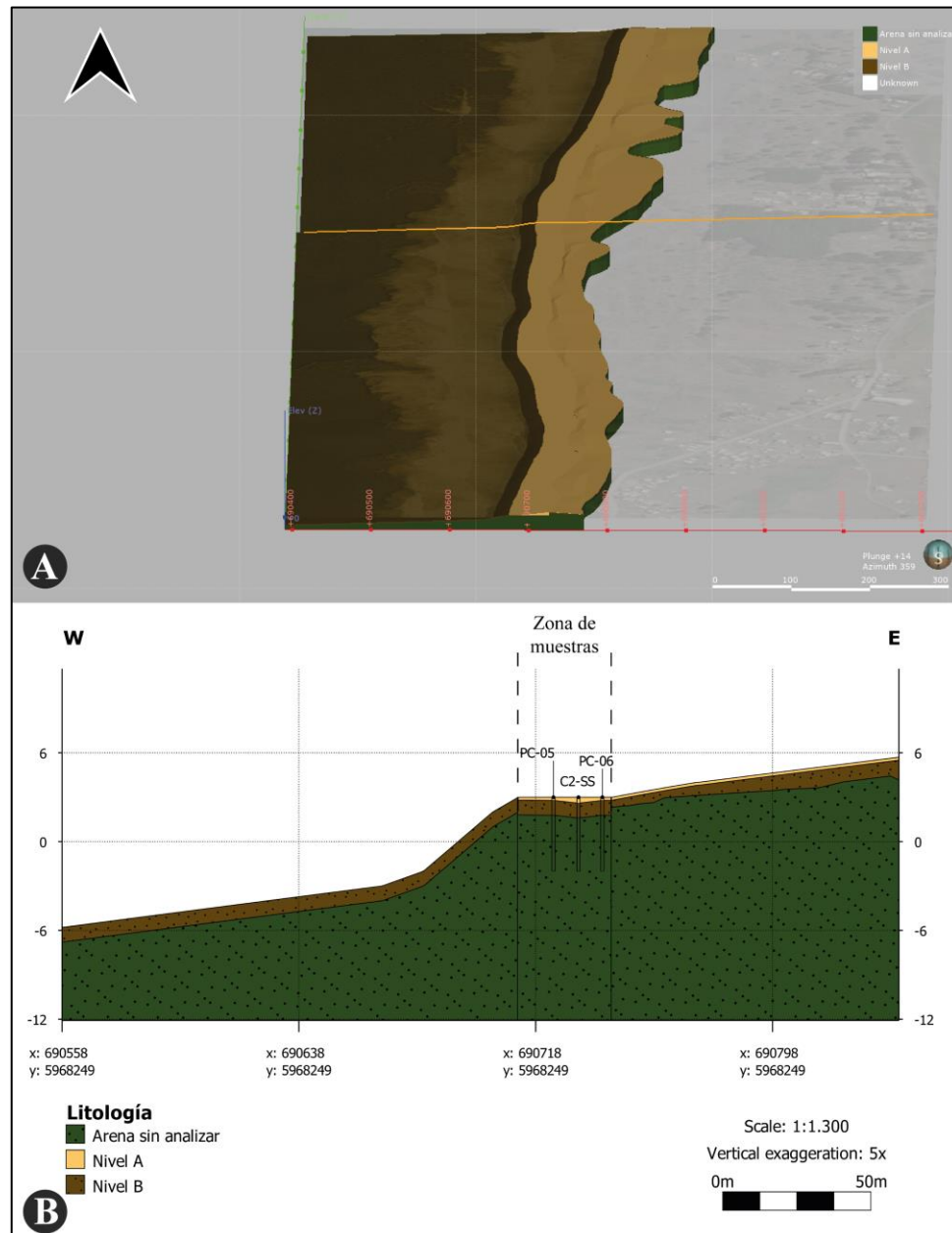


Figura 6.8 Modelo del yacimiento de placer litoral interpretado en el estudio. [A] Cuerpos 3D de las capas identificadas, [B] Sección esquemática del depósito con escala vertical exagerada (5x).

6.5.3. Estimación de recursos

En la exploración de un yacimiento, los resultados pueden ser clasificados como recursos o reservas minerales, siendo una de las etapas más críticas y a la vez más subjetivas de un proyecto minero. A partir de códigos internacionales (USGS, 1980; Miskelly, 2003), se tienen la definición de ciertos conceptos que serán abordados en esta sección.

Un **recurso mineral** es una concentración u ocurrencia de material de interés económico intrínseco en o sobre la corteza terrestre en forma y cantidad en las cuales haya probabilidades en una eventual extracción económica. Los recursos minerales se categorizan a criterio de la confianza geológica de forma ascendente, en las categorías de recurso Inferido, Indicado y Medido (Figura 6.9). Esta clasificación es elaborada a partir de distintos grados de evidencia y conocimientos geológicos del depósito.

Cumulative Production	IDENTIFIED RESOURCES			UNDISCOVERED RESOURCES	
	Demonstrated		Inferred	Probability Range (or)	
	Measured	Indicated		Hypothetical	Speculative
ECONOMIC	Reserves		Inferred Reserves		
MARGINALLY ECONOMIC	Marginal Reserves		Inferred Marginal Reserves		
SUB- ECONOMIC	Demonstrated Subeconomic Resources		Inferred Subeconomic Resources		
Other Occurrences	Includes nonconventional and low-grade materials				

Figura 6.9 Clasificación de recursos y reservas minerales, de acuerdo con USGS (1980).

Una **reserva minera** es la fracción económicamente rentable de un recurso mineral indicado o medido. Se determina a partir de las evaluaciones apropiadas, que pueden incluir estudios de factibilidad y contemplan la consideración de y modificación por factores razonablemente asumidos de extracción, metalúrgicos, económicos, de mercados, legales, ambientales, sociales y gubernamentales. Las reservas mineras se subdividen, en orden creciente de confianza, en Reservas Probables y Reservas Probadas. Los códigos no autorizan declarar reservas a partir de recursos minerales inferidos (Ortiz, 2004).

El nivel de confianza y/o la cuantificación de la incertidumbre requiere de metodologías que permiten categorizar los recursos y reservas en alguna de sus categorías. Para esto se pueden considerar varios criterios, los cuales de forma ideal deberían combinarse para conseguir la clasificación más acertada. Entre los criterios se tiene el **criterio geológico**, que es la comprensión de la continuidad geología del depósito en estudio. El criterio **geométrico** consiste en clasificar en base a la densidad de sondajes o número de muestras, usando como práctica habitual la definición de una distancia máxima de extrapolación. El **criterio geoestadístico** considera la continuidad espacial de las leyes, las cuales presentan anisotropías en distintas direcciones. Todo esto es evaluado por una persona competente, quien define estos grados y asigna las categorías correspondientes.

Aplicado en el caso de este estudio, a partir del modelo 3D interpretado y los análisis de laboratorio, es posible estimar la cantidad de recursos minerales de las pertenencias mineras. El modelo 3D del depósito permite determinar el volumen de las capas con minerales, lo cual es un parámetro necesario para determinar el tonelaje del depósito (Gujar *et al.*, 2008), dada la siguiente formula:

$$R = \frac{A \times P \times D \times L}{100} \text{ o } \frac{V \times D \times L}{100} \quad (\text{Ecuación 4})$$

R: Recursos en toneladas métricas [t]

A: Área del depósito[m²]

P: Potencia del depósito [m]

V: Volumen del depósito (A x E) [m³]

D: Densidad promedio de la arena [t/m³]

L: Ley del mineral y/o elemento [%]

Para efectos de los cálculos, los demás parámetros a utilizar se compilan en la tabla 6.18.

Tabla 6.18 Parámetros para el cálculo de recursos ($\bar{x}$: promedio).

Capa	P $\bar{x}$	D $\bar{x}$	% Fe Mag $\bar{x}$	% Ti $\bar{x}$	% Ti Mag. $\bar{x}$
Nivel A	0,20	3,5273	9,51	2,24	1,04
Nivel B	1,00	3,1447	2,04	0,83	0,21

Los recursos del área de estudio se pueden clasificar en identificados, hipotéticos y especulativos. Para esto dentro de las pertenencias de estudio se definen sectores, las cuales están asociadas al tipo de recurso que contienen (Figura 6.10). A cada sector se le asocia un rótulo a modo de abreviación para así facilitar la compilación datos en las tablas.

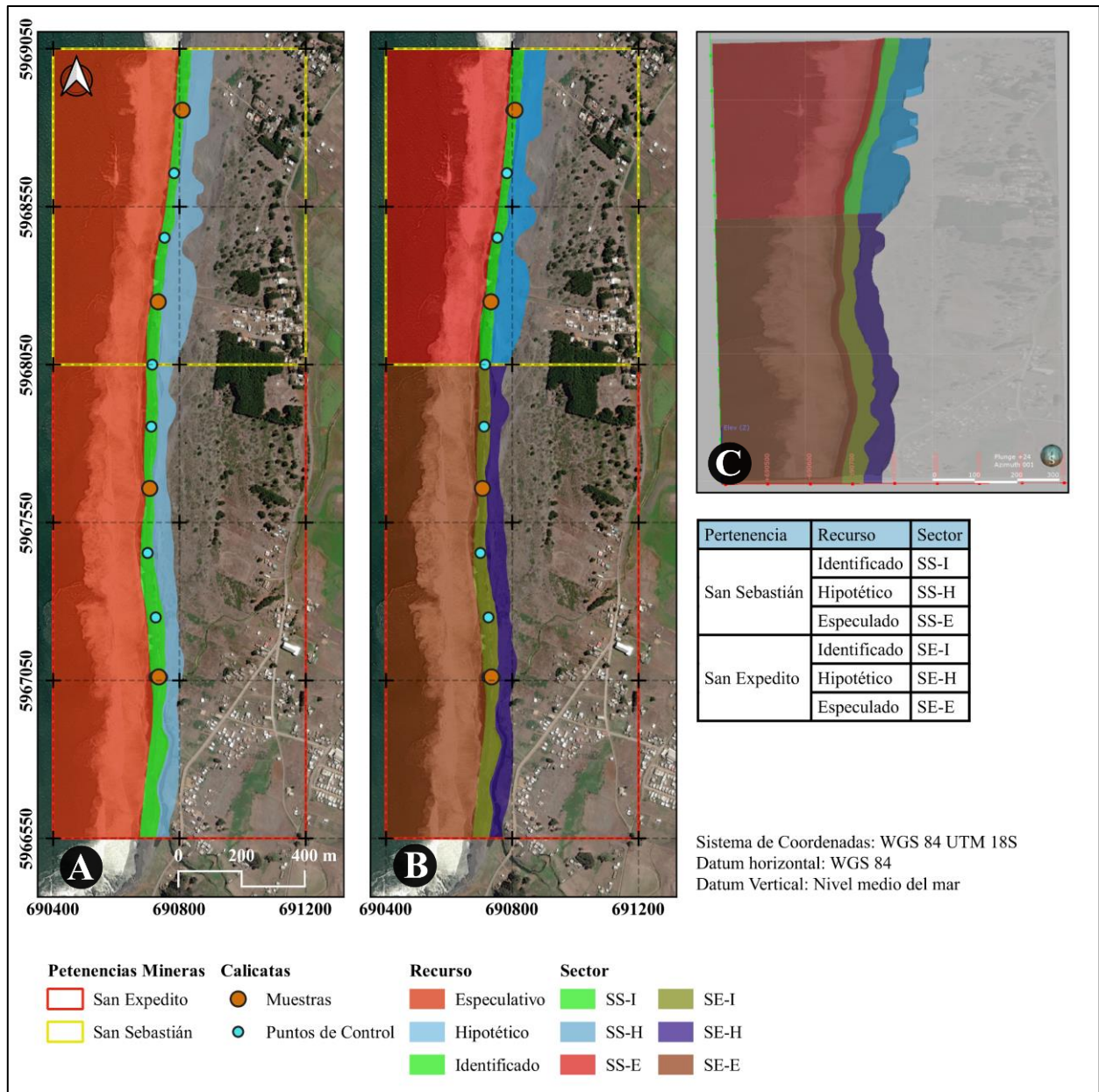


Figura 6.10 Recursos estimados de las pertenencias mineras en estudio. [A] Plano de categoría de recursos, [B] Plano con los sectores definidos según pertenencia y categoría de recurso, [C] Modelo 3D de los sectores definidos.

El volumen y el tonelaje de mineral obtenido para cada uno de los sectores definidos se resume en las tablas 6.19 y 6.20 para hierro y titanio. La primera tabla propone un formato que indica el volumen y tonelaje por sector y capa de arena. La segunda tabla posee un formato que ordena los datos en función del tipo de recurso y pertenencia minera, agregando además subtotales y total de tonelaje.

Tabla 6.19 Reporte de volumen y tonelaje de recurso mineral por sector y capa.

Sector	Capa	Volumen [m ³]	Densidad [t/m ³]	Tonelaje [t]	% Fe Mag.	% Ti
SS-I	Nivel A	6.560	3,5273	23.139	9,51	2,24
	Nivel B	33.123	3,1447	104.162	2,04	0,83
SS-H	Nivel A	14.772	3,5273	52.107	9,51	2,24
	Nivel B	73.862	3,1447	232.274	2,04	0,83
SS-E	Nivel B	350.155	3,1447	1.101.132	2,04	0,83
SE-I	Nivel A	8.452	3,5273	29.813	9,51	2,24
	Nivel B	63.710	3,1447	200.349	2,04	0,83
SE-H	Nivel A	14.694	3,5273	51.830	9,51	2,24
	Nivel B	73.182	3,1447	230.135	2,04	0,83
SE-E	Nivel B	440.720	3,1447	1.385.932	2,04	0,83

Tabla 6.20 Reporte de tonelaje por tipo de recurso y pertenencia minera

Recurso	Pertenencia	Tonelaje [t]	Fe [t]	Ti [t]
Identificado	San Sebastian	127.301	4.325	1.383
	San Expedito	230.162	6.922	2.331
Subtotal		357.463	11.248	3.714
Hipotético	San Sebastian	284.381	9.694	3.095
	San Expedito	281.966	9.624	3.071
Subtotal		566.346	19.318	6.166
Especulado	San Sebastian	1.101.132	22.463	9.139
	San Expedito	1.385.932	28.273	11.503
Subtotal		2.487.065	50.736	20.643
Total		3.410.873	81.301	30.522

7. DISCUSIÓN

7.1. INTERPRETACIONES DEL PLACER LITORAL

7.1.1. Extensión y distribución mineral

Las observaciones de terreno y el análisis de laboratorio de muestras de arena permiten la interpretación de las dimensiones que tienen las capas de arenas con contenido mineral de interés para este estudio. Como se ilustra en la Figura 7.1, la muestra C2-SS posee un mayor contenido de minerales de óxidos de hierro, así como menor sílice y menor tamaño de grano con respecto de las otras tres muestras. Esto se respalda además por la observación que esta muestra es representativa del nivel más superficial de la arena en la zona de berma, nivel que además de ser expuesto a los agentes de oleaje y mareas, queda expuesto a los agentes eólicos, de manera que en su conjunto causan un mayor enriquecimiento de minerales pesados portadores de hierro y titanio.

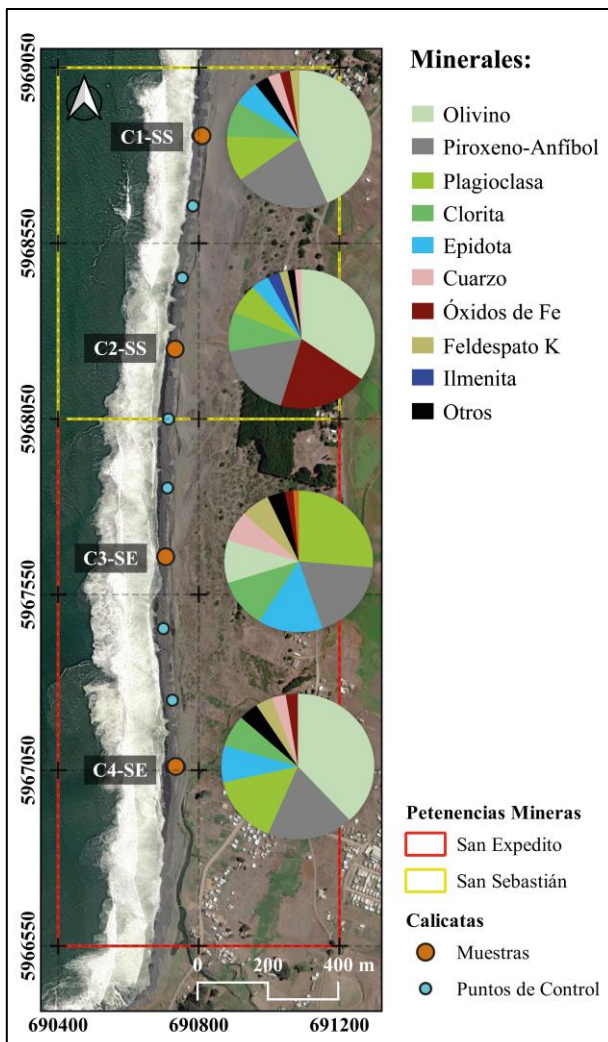


Figura 7.1 Mapa con las gráficas de proporción mineral de cada muestra. Cada gráfico corresponde a la muestra adyacente.

Por su parte, las muestras C1-SS y C4-SE, extremos norte y sur respectivamente del área de muestreo, muestran una composición mineral, contenido químico y potencia de nivel A (~15-20 cm) bastante similar. Correlacionando esto con las observaciones de los puntos de control, se llega a determinar que la potencia media del nivel A es de 0,20 metros a lo largo de las pertenencias mineras.

La muestra C3-SE posee el menor contenido de hierro y titanio, menor potencia de nivel A y mayor contenido de minerales de cuarzo, epidota y plagioclasa. Esto tiene sentido al observar que su nivel A de 0,08 m conlleva a que la calicata de 0,5 m llega a una zona más profunda de la columna en este punto, profundidad que queda aislada de los principales factores naturales que transportan y retrabajan los sedimentos, mismos causantes del enriquecimiento superficial observado en este depósito. La poca potencia de nivel A puede deberse a un desequilibrio en el perfil de playa en este punto, siendo la parte más superficial erosionada y desarrollada más cerca del continente, angostando el desarrollo de berma a esta latitud. Sin embargo, pese a los motivos anteriormente expuestos, no se descarta que a mayor profundidad haya desarrollo de niveles enriquecidos de minerales pesados producto de transgresiones pasadas y la presencia de paleoplaceres como resultado de un régimen de corrientes y mareas diferentes al actual.

En cuanto a las extensiones del placer dentro de las pertenencias, el largo (eje N-S) corresponde a la longitud plena de las pertenencias, un total de 2.500 metros, por un ancho (eje W-E) de zona expuesta de ~30 metros. Estas dimensiones tienen sentido, dado que estos depósitos tienden a ser extensos, debido a que representan líneas de costas que se extienden por muchos kilómetros, siendo alargados y orientados con esta línea contemporánea a su formación (Van Gosen *et al.*, 2014). Los límites Oeste y Este fueron interpretados dado que el área expuesta y muestreada en la zona de estudio corresponden a la parte superior del *foreshore* y *backshore* del perfil de playa. Estos dos rangos son los sectores donde se produce la acumulación de arenas pesadas (Houston & Murphy, 1970 en McLemore, 2017), y la separación entre ambos es complejo, dado que la dinámica de una playa varía las unas con las otras, al punto de que hay estudios que tienen como intención definir un criterio para establecer el límite entre ambas divisiones de playa (Longhitano, 2015). Por lo que el límite Este corresponde a la zona donde comienzan las dunas, marcando así el final de la berma, y el límite Oeste corresponde a la altura de marea alta en condiciones de tiempo normal.

7.1.2. Categorización y cantidad de recursos

La categorización de los recursos en las 3 clasificaciones anteriormente expuestas: identificados, hipotético y especulativo, fueron realizadas a partir de criterios geológicos y geométricos.

El sector definido como **recursos identificados**, como bien indica su nombre, hace énfasis al reconocimiento de los sedimentos a través de la recolección de muestras y cuantificación de su tonelaje a través de análisis de laboratorio. La densidad de muestras y puntos de reconocimiento, sumado al carácter mantiforme que desarrollan los depósitos litorales, permiten asumir su extensión y continuidad N-S por toda la zona de berma y parte de la zona superior del *foreshore*. Para la ley estimada, se asumen valores promedio expuestos en el capítulo de resultados (Tabla 6.8). Esto debido a que para el nivel A, se tienen los resultados de la muestra C2-SS, que, si bien corresponden al análisis de un solo punto, el mismo nivel es reconocido a lo largo de toda la costa de la zona estudiada, variando su potencia a nivel de centímetros. Para el nivel B, se cuenta con los datos basados en el promedio de las 3 muestras restantes, que presentan valores y tendencias similares, salvo el empobrecimiento de minerales pesados de la muestra C3-SE.

El sector asignado como **recursos hipotéticos** responde a criterios geológicos, principalmente referentes a la dinámica de una playa. El área de estudio, que corresponde a la ribera sur de la desembocadura del río Itata, corresponde a un borde costero que presenta una alta dinámica costera. Esta dinámica queda expuesta en los cambios de mareas que ocurren de forma periódica y de forma estacionaria. El perfil de invierno, sobre todo en semanas con condiciones de tormenta, causa que la línea de costa retroceda y que, por ende, el equilibrio de la playa mueva sus zonas hacia el interior del continente. Esto se refleja a través del análisis de imágenes satelitales (Figura 7.2), donde se puede apreciar como el límite Este de la berma, mismo límite Este del sector de recursos identificados, definido en condiciones de clima normal, es invadido por mar en dirección Este. Esta transgresión invernal implica dos hechos principales:

- La zona de *foreshore* y *backshore* son trasladadas hacia el este, generando nuevos límites y que estas nuevas áreas dentro de los nuevos límites se vean influenciadas por las dinámicas de estas zonas, mismas dinámicas que han generado la acumulación de minerales pesados en los sectores SS-I y SE-I. Este hecho implica que se tiene una continuidad lateral

hacia el este permitiendo tener como hipótesis el desarrollo y/o extensión de los niveles A y B en los sectores SS-H y SE-H.

- Las zonas de *foreshore*, *backshore* y el cordón dunar en condiciones de tiempos de tormenta son inundadas y quedan expuestas al retrabajo de zona de *swash* y *surf*, lo cual indica que esta área cada cierto tiempo es cubierta de agua y vuelta a exponer, preservando la capa superficial enriquecida de minerales pesados. Por parte de las dunas, estas colapsan por la acción del mar, perdiendo su condición de barrera y permitiendo la entrada de agua, sin embargo, vuelven a reconfigurar en cuanto las condiciones de invierno/tormenta cesan. Por lo tanto, se asume que sufren 2 episodios de construcción y destrucción al año como mínimo.



Figura 7.2 Cambios estacionales de mareas y perfil de playa. Línea verde marca límite entre *backshore* y dunas. [A] Perfil verano (Imagen Planet 15/01/2023), [A] Perfil invierno (Imagen Planet 17/06/2023).

El sector definido para **recursos especulativos** se basa en criterios geológicos y criterios externos a los hechos desarrollados en el presente estudio. Lo primero que se interpreta en este sector es que, dado su carácter submarino, no se tiene el factor eólico y lavado de olas para el enriquecimiento mineral, por la tanto solo se especula una capa nivel B en su extensión. Como se explicó en párrafos anteriores, el perfil de playa es dinámico en la zona de estudio y los episodios de tormenta causan el aumento de energía del oleaje el cual promueve el transporte de sedimentos desde el *offshore* hacia la costa, acumulando los granos más pesados en la zona superior del *foreshore* (Force, 1991). Esto indica que hay un suministro y depositación de minerales de interés desde el mar hacia la costa, los cuales al aumentar la energía llegan hacia zonas más superficiales, ayudados de las mareas altas y de la deriva litoral (Force, 1991). Por lo cual, es posible especular que, en esta área sumergida dentro de las pertenencias mineras, contenga una cantidad de elementos

de interés cercanas al nivel B, dado las condiciones similares en las que se encuentran en teoría las arenas de ambos sectores. Por otra parte, como hechos externos se tiene el reporte de recolección de muestras por parte de buzos en la zona de rompiente de ola, por pedido de los dueños de las pertenencias. Estas muestras visualmente poseían un alto brillo metálico y una proporción cercana a la mitad de su contenido, reaccionaba magnéticamente ante imán. Si bien no se puede utilizar este hecho como una evidencia sólida que permita confirmar el recurso como identificado, tampoco se debe descartar de lleno, si no que aporta a especular que incluso puede haber zonas sumergidas adyacentes al *foreshore* con enriquecimiento igual o mayor al nivel A de las muestras.

Cabe destacar que los valores determinados para recursos deben ser considerados cantidades de carácter mínimo, ya que una malla de muestras en otras áreas de las pertenencias o la realización de calicatas o sondajes a profundidades mayores pueden revelar niveles o capas de enriquecimiento mineral que por razones lógicas no son reconocidas en superficie, y así aumentar su contenido. Respecto de mayores profundidades, el modelo del depósito (Figura 6.8), se interpreta con una potencia de nivel B de 1 metro, pero en caso de ser mayor, aumentaría de forma significativa el tonelaje de recursos para este nivel. Por otra parte, se desprecia de los cálculos el volumen del campo dunar, ya que en teoría las arenas que componen dunas son sedimentos livianos bien seleccionados, sin embargo, como ha quedado expuesto en este estudio, estas dunas se alzan y derrumban estacionariamente, por lo que podrían tener cantidades variables de minerales de interés en cifras mayores o menores a las capas ya reconocidas y analizadas.

7.1.3. Prefactibilidad de explotación

A partir de los datos de análisis químico, ley y tonelajes, se puede analizar brevemente una eventual explotación de las pertenencias mineras en estudio. Lo primero a comprobar es si el concentrado generado es atractivo y/o cumple con las características requeridas para ser comercial. A través de comunicación personal con representantes de CAP Minería (2023), y datos expuestos en los trabajos de Rojas (2020) y Valderrama *et al.* (2021), se tienen los estándares requeridos para los concentrados de hierro comerciales. Estos datos se comparan con los obtenidos en los concentrados de los niveles A y B de este estudio (Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Estándares de concentrados de hierro comercial y su comparación con los concentrados de las muestras en estudio (verde: cumple, amarillo: valor cercano, rojo: valor lejano)

Elemento [%]	Requisito		Muestra			
	Límite	Valor	C1-SS	C2-SS	C3-SE	C4-SE
Fe	Min	62,50	54,17	58,53	51,95	54,74
P	Max	0,10	0,01	0,01	-	0,01
S	Max	0,10	0,01	0,01	-	0,01
SiO ₂	Max	5,00	7,42	3,01	-	6,35
Al ₂ O ₃	Max	1,50	2,28	2,29	-	2,34
CaO	Max	2,00	0,59	0,32	-	0,55
MgO	Max	2,00	5,04	2,87	-	4,73
Na ₂ O + K ₂ O	Max	0,40	0,15	0,1	-	0,16
Húmedad	Max	3,00	-	-	-	-
+ 10 mm	Max	0,00	0	0	0	0
+ 6 mm	Max	10,00	0	0	0	0

La información compilada da a entender que, de las muestras analizadas, la que mejor cumple con las características requeridas por los compradores es la muestra C2-SS, satisfaciendo 7 de 11 límites establecidos. Esto se correlaciona al hecho de que esta muestra expone el contenido del nivel A del depósito, que es la capa de mayor enriquecimiento identificada.

La cantidad de hierro mínima no es alcanzada en los 4 concentrados, siendo el valor más cercano 58,53 %. Hay que considerar que este concentrado es generado por el DTT, dispositivo que tiene sus restricciones y límites, tales como tamaño de grano (325 malla Tyler) y cantidad de material *input* (20 g). Se aprecia una relación directamente proporcional entre el porcentaje de Fe magnético de la muestra y la ley de Fe del concentrado generado. Se postula la idea, de que, utilizando otro método de concentración magnética de tipo industrial, como tambor magnético, se pueda obtener un concentrado con leyes mayores de hierro, a costa de consumir un poco más de material de alimentación, permitiendo de esta manera cumplir con las cantidades mínimas requeridas. El hecho de lograr concentrar una mayor cantidad de minerales de Fe debería ser acompañado de una disminución en las cantidades de Al, Si y Mg, elementos presentes en minerales no fuertemente magnéticos como olivino, piroxenos, clorita, feldespatos, etc.

Logrando aumentar las cantidades de hierro, otro aspecto a considerar son los costos de inversión y de ganancia de una posible explotación. Tomando como referencia los datos expuestos por GESEMEX (2011), se conoce que para una planta que produzca 40.000 TM/mes de concentrado de hierro la inversión de construcción, montaje y puesta en marcha es de USD\$ 2.000.000. Para este caso, dado los valores de volumen y tonelaje de las pertenencias mineras San Sebastian y San Expedito, la producción se estima en 1.000 TM/mes (pequeña minería), por lo tanto, el valor de inversión mencionado se empleará como un monto máximo de inversión, ya que se necesitará de menor infraestructura, equipos y personal.

Esta inversión del proyecto de GESEMEX (2011), incluye 5 camiones tolva, 3 cargadores frontales, 2 tambores magnéticos montados en 2 plantas semimóviles, oficinas modulares, paneles solares para la alimentación eléctrica y contratos externos para el abastecimiento de combustible, agua potable, transporte. Se estima que, para el funcionamiento de las pertenencias en estudio, bastarían de 1-2 camiones tolva, 1-2 cargador frontal, 1 tambor magnético (capacidad de procesamiento de 400 tm/h), 1 planta semimóvil y correas transportadoras. Otro factor importante para considerar es el transporte del producto final a puerto para su exportación, ya que a través de comunicación personal con gente de CAP Minería (2023), esta distancia no debe superar los 100 km o complica la viabilidad del proyecto minero. En este caso, desde Vegas de Itata se tiene una distancia de 47-76 km al puerto de Penco, y de 86 km al puerto de Talcahuano, no superando este límite ambos destinos. La cadena de procesos sería de la siguiente forma (Figura 7.3):

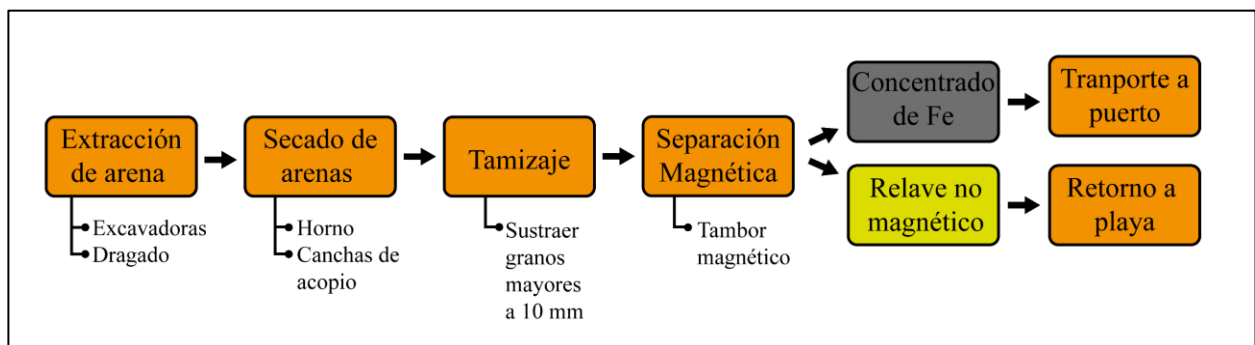


Figura 7.3 Esquema para cadena de procesos en la recuperación de Fe

Logrando llevar el concentrado a puerto, se vende ya sea al mercado nacional o internacional, generalmente asiático. Tomando en cuenta los tonelajes descritos en la sección anterior, se estima

la ganancia aproximada en un escenario favorable, con el precio del hierro hoy en día (Tabla 7.2). También se calcula el valor de venta del titanio, debido a que hay interés de empresarios por este elemento sin discriminar en qué fase este contenido. Ambos valores se comparan con una inversión inicial de USD\$ 2.000.000.

Tabla 7.2 Valores de venta estimados en función de los datos de tonelaje y precio de los metales a fecha de marzo 2024 (precios consultados en el sitio price.metal.com)

Mineral	Recurso [t]			Precio USD/TM	Valor venta según Recurso USD			Total USD
	Identificado	Hipotético	Especulado		Identificado	Hipotético	Especulado	
Fe	11.248	19.318	50.736	\$110	\$1.237.280	\$2.124.980	\$5.580.960	\$8.943.220
Ti	3.714	6.166	20.643	\$2.290	\$8.505.060	\$14.120.140	\$47.272.470	\$69.897.670
Total	14.962	25.484	71.379		\$9.742.340	\$16.245.120	\$52.853.430	\$78.840.890

Respecto del hierro cabe destacar que su precio va fluctuando constantemente en el mercado, registrando un máximo de USD\$ 219 y mínimo de USD\$ 85 desde 2021 a la actualidad. Si solo se consideran recursos identificados e hipotéticos, se tiene un valor de venta de USD\$ 3.362.260, dejando inicialmente más de un millón de margen positivo con respecto al monto de inversión máximo propuesto. Referente al titanio, su precio es aún mayor que el hierro, pero sus métodos de concentración difieren. La recuperación de titanio requiere de otros tipos de procedimientos, como concentración gravitacional y separación electroestática (Valderrama, 2008), por lo que el monto de inversión debería ser mayor, lo cual es un antecedente para tomar en cuenta a la hora de proyectar un sistema de recuperación de este metal. Por otra parte, solo es atractivo económicamente un concentrado de titanio que cumpla con un valor superior al 45% de TiO_2 .

Si el método de recuperación permite cumplir con los estándares exigidos en el comercio para los concentrados de hierro y titanio, hecho que se debe corroborar realizando una fase de planta piloto, las pertenencias mineras poseen un tonelaje atractivo para su explotación.

7.2. POSIBLE FUENTE DE LAS ARENAS FERROSAS

7.2.1. Composición geoquímica de las arenas

El principal factor para indicar el origen o proveniencia de los sedimentos de la playa en estudio son los minerales no magnéticos y las concentraciones químicas reportadas en la arena de cabeza

y/o relave. Al sumar los componentes mineralógicos de las 4 muestras y obtener un promedio para cada especie mineral (figura 7.3), las 5 con mayor presencia corresponden a olivino, piroxeno-anfibol, plagioclasa, clorita y epidota.

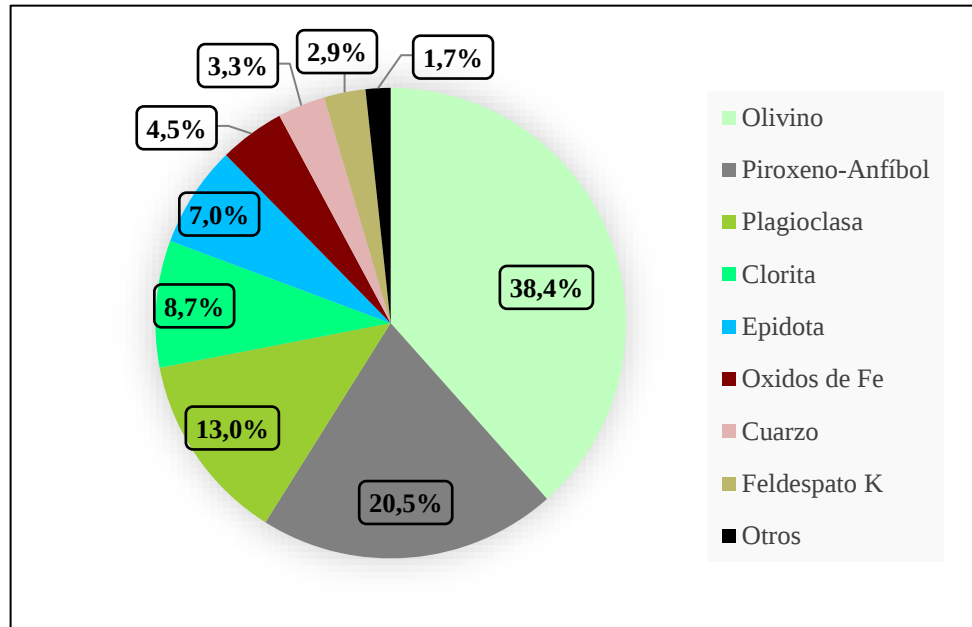


Figura 7.4 Cantidad mineral promedio entre las cuatro muestras de arenas

Las tres primeras especies minerales son formadores de roca, cuya génesis está vinculada a contextos de altas temperaturas. La clorita se desarrolla en roca metamórficas de bajo grado, y también como alteración de minerales ferromagnesianos en rocas ígneas, a partir de biotita, anfibol y piroxenos. La epidota se origina de forma primaria en rocas metamórficas de facies anfibolita-epidota y como mineral accesorios en roca ígneas. También se desarrolla como producto de alteración en plagioclasas, hecho observado en los cortes transparentes de las arenas.

En cuanto a la mineralogía metálica, los principales componentes son magnetita, hematita, ilmenita, con cantidades menores de rutilo. Los óxidos de hierro tienen una génesis magmática, metasomática e hidrotermal. Los óxidos de titanio ocurren como mineral accesorio en rocas metamórficas e ígneas. Esta asociación de silicatos ferromagnesianos, minerales de alteración y metálicos, es típica de rocas volcánicas básicas, la cuales son abundantes en la Cordillera de los Andes, donde las coladas de lava varían en rango desde basálticas a riolíticas, predominando la composición andesítica (Gajardo, 1981). Este hecho es apoyado por la observación de líticos

volcánicos en las 4 muestras, a través del análisis microscópico, confirmando de esta manera la conexión y transporte entre los sedimentos de la cordillera andina y estos depósitos litorales.

Otra fuente de información clave es la composición química del relave de cada muestra (Figura 7.5). La proporción de elementos mayores en el relave permite comparar estos valores con otras rocas o en diagramas para tener una aproximación del tipo de roca del que derivan los sedimentos estudiados.

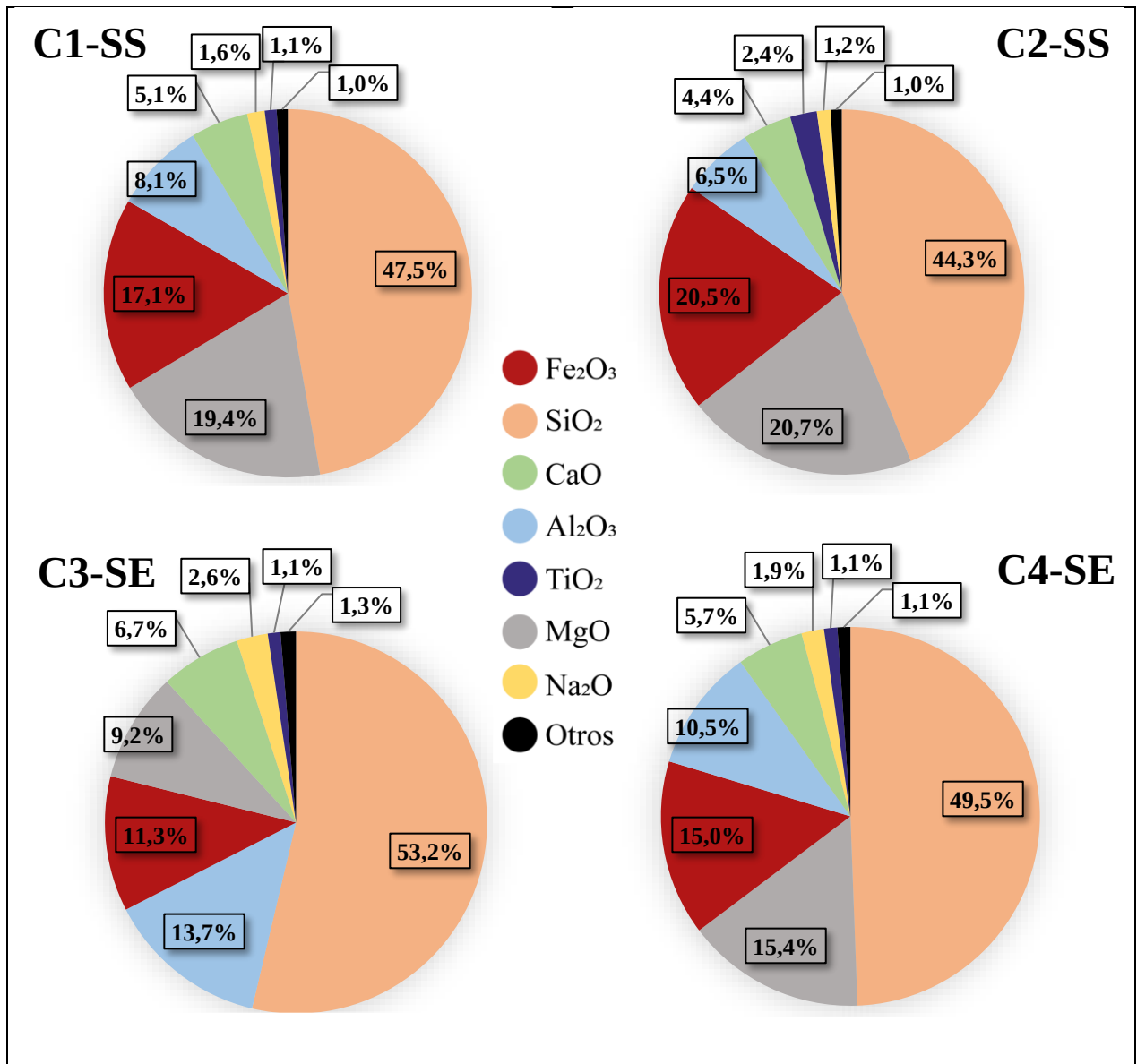


Figura 7.5 Gráficos de cantidad de óxidos de elementos mayores en relaves.

Esta mineralogía es la mejor aproximación a la roca fuente o procedencia de los sedimentos, ya que el relave reúne en su mayoría a minerales formadores de roca, mientras que los granos metálicos son retenidos en el concentrado. El diagrama TAS (Le Bas *et al.*, 1986), permite discriminar de manera preliminar a que roca pertenece un material en comparación a la composición de la corteza terrestre. Considera el contenido de SiO_2 y la suma de las concentraciones de NaO y K_2O , valor considerado álcalis total. Realizando el cálculo para cada muestra, el diagrama (Figura 7.6) muestra que los sedimentos abarcan un rango de rocas volcánicas que va de picro-basalto a andesita basáltica, siendo las andesitas basálticas las más cercanas a la mayoría de las rocas volcánicas de la cordillera andina.

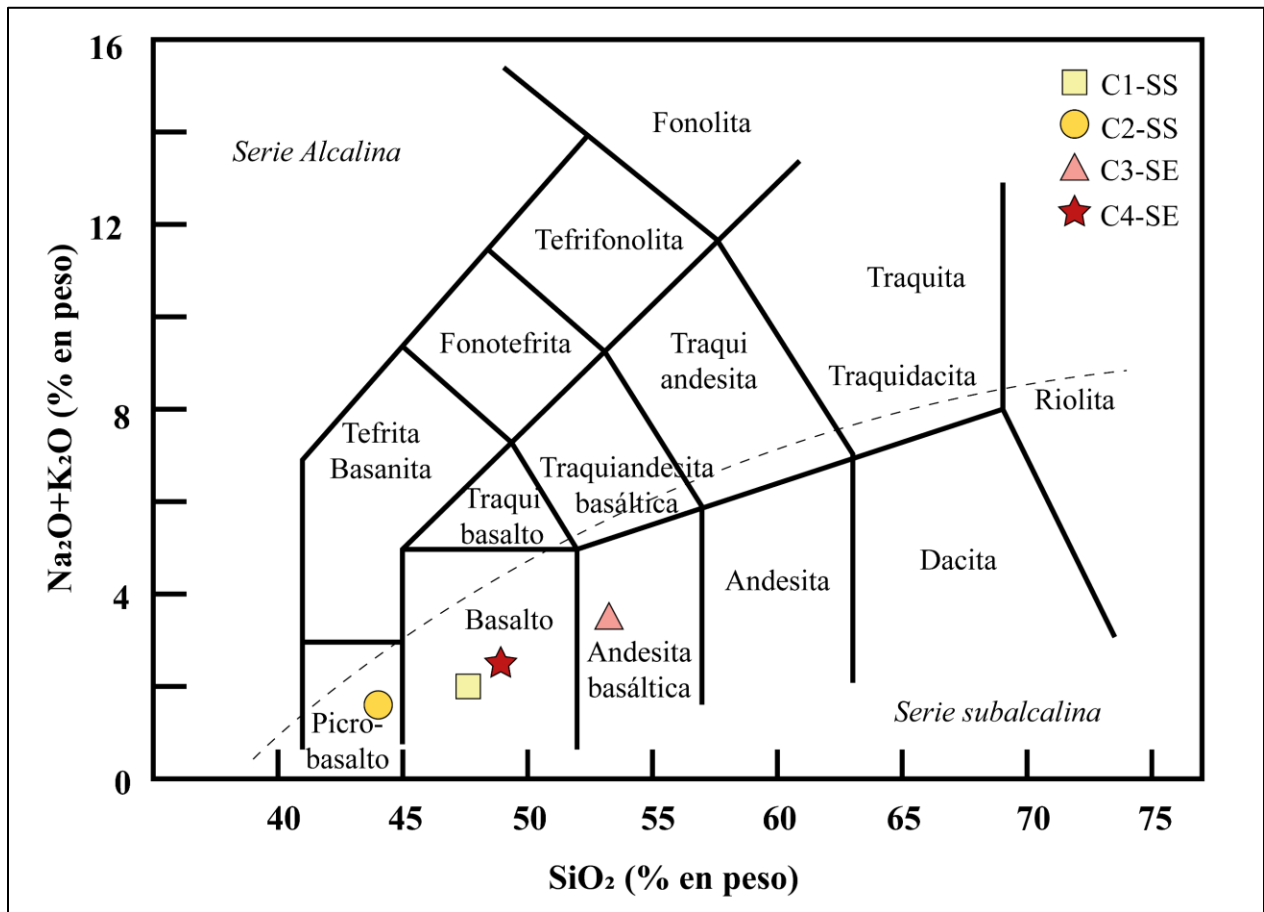


Figura 7.6 Diagrama TAS con la ubicación de las muestras de arenas fracción relave (Le Bas *et al.*, 1986).

También se puede corroborar el tipo de sedimento al que corresponden las arenas, mediante la clasificación de rocas sedimentarias por el diagrama de Herron (1988). Este diagrama clasifica las muestras según su relación de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ y $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. La primera relación se puede interpretar

como un indicador de estabilidad mineralógica, ya que representa el vínculo entre los fragmentos líticos y feldespatos, de manera que mientras más alto sea este valor, más estable es el contexto de los sedimentos. La segunda relación indica la madurez mineralógica y el tamaño de grano de los sedimentos, mientras más alto se este valor, mayor es el grado de madurez mineralógica de los sedimentos, ya que el sílice tiene una alta resistencia a ser meteorizado y alterado. En la figura 7.7 se grafican las muestras, clasificando los sedimentos como arenas de hierro para las muestras C2-SS y C1-SS, y como lutitas de hierro para las muestras C3-SS y C4-SS. Se aprecia una tendencia decreciente en cuanto al grosor de Nivel A, ya que en los puntos que este nivel tiene mayor potencia, las muestras incrementan su valor en ambas componentes del diagrama.

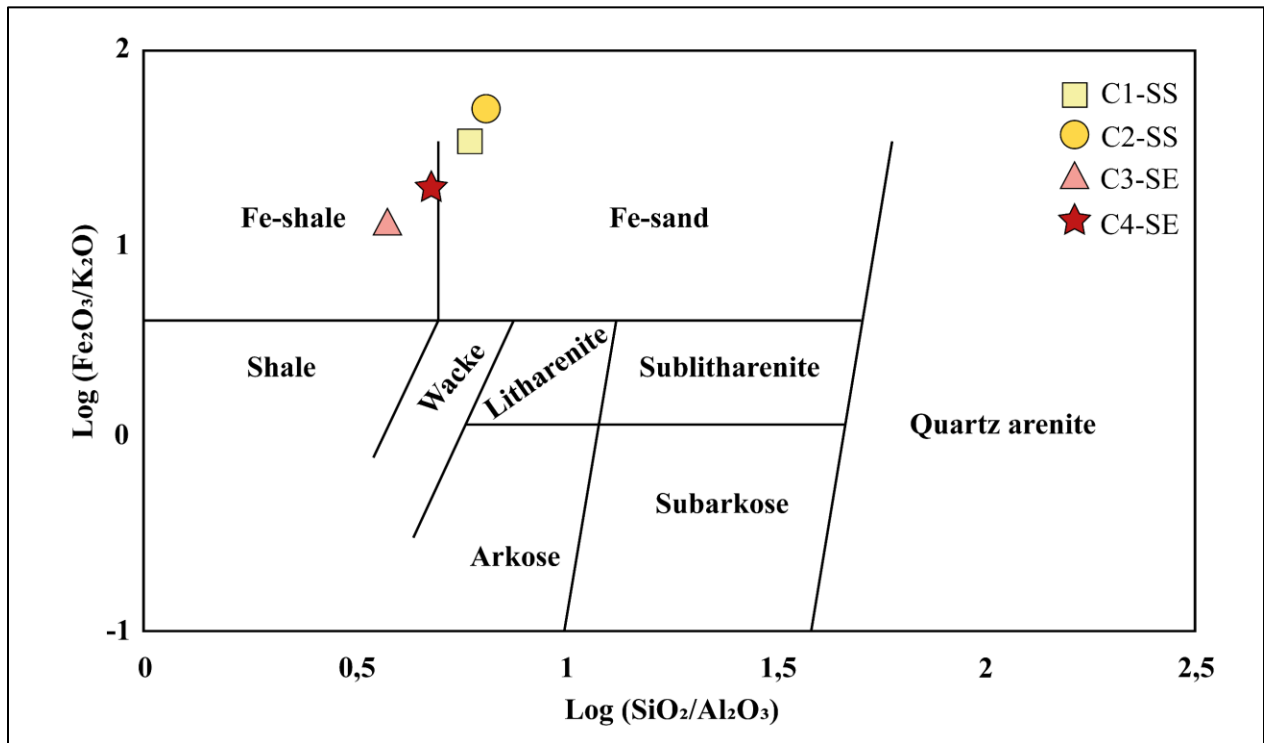


Figura 7.7 Diagrama de Herron (1988), para clasificación de sedimento.

7.2.2. Factores geológicos al interior de la cuenca del Itata

Los sedimentos que conforman las playas son transportados en su mayoría por los ríos desde la cordillera hasta la costa, por lo que la revisión de las rocas que conforman la cuenca del río Itata es un parámetro que limita la procedencia de fuentes litológicas de los granos minerales erosionados y transportados hasta el sector litoral.

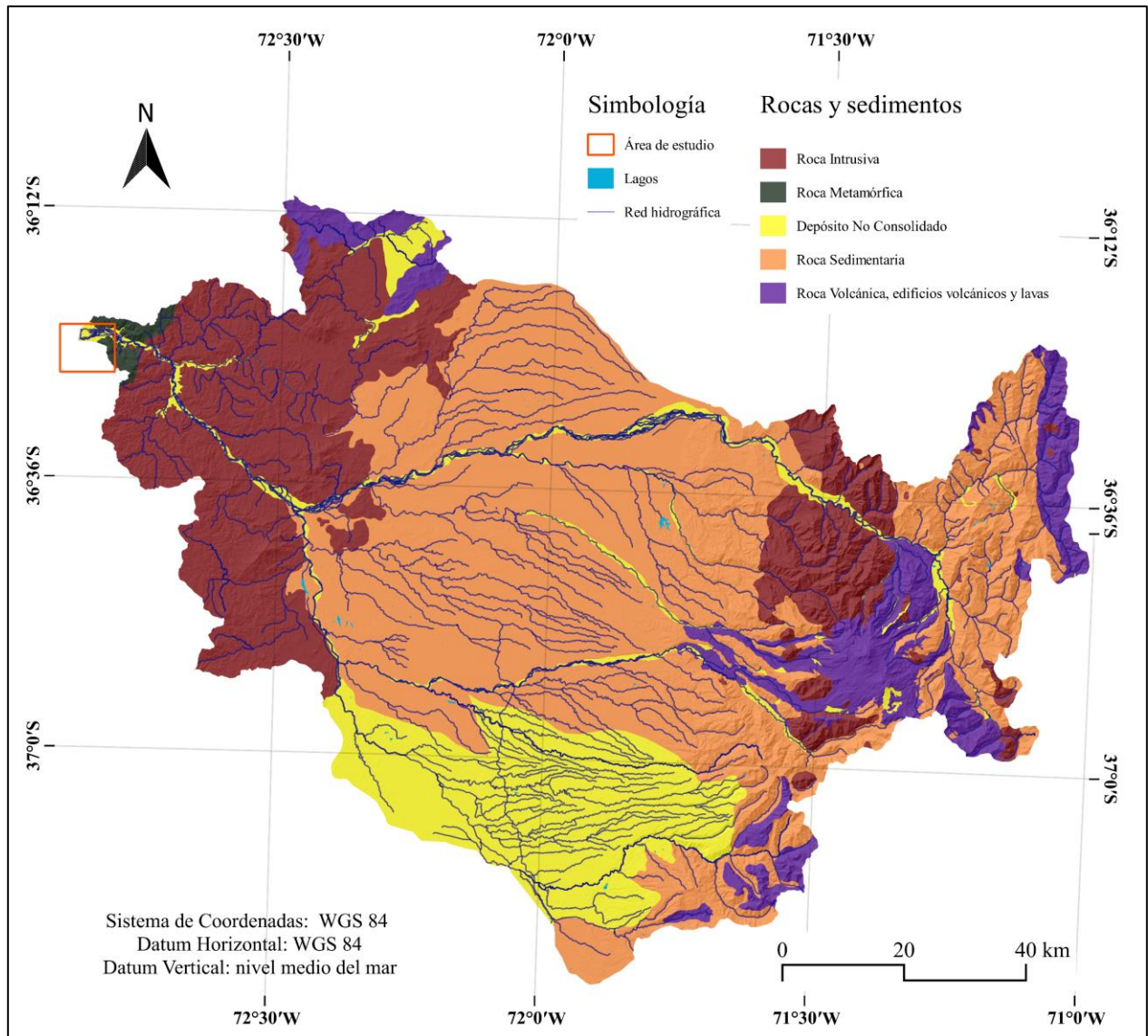


Figura 7.8 Tipos de rocas presentes en la cuenca del Itata.

La información geológica expuesta de la cuenca del Itata (Figura 7.7), permite cuantificar que, dentro de la cuenca, aproximadamente 61 km² corresponden a rocas metamórficas (0,54 %), ~ 2.728 km² corresponden a rocas intrusivas (24,12%), ~5.647 km² son rocas sedimentarias (49,93%), ~996 km² corresponden a rocas volcánicas (8,81%) y ~1878 km² es depósito no consolidado (16,60%).

Realizando el análisis en dirección eje W-E, la roca más cercana a la desembocadura corresponde a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico. Esta litología forma parte del borde costero como de la Cordillera de la Costa, por lo tanto, tiene aporte directo de sedimento en el ambiente litoral

por abrasión de las olas, y aporte por el transporte fluvial. De acuerdo con ciertos autores, estas rocas pueden aportar minerales como ilmenita y rutilo, siendo las rocas de facies sillimanita una importante fuente de estos óxidos (Force, 1979)

Las rocas ígneas que forman parte de la Cordillera de la Costa constan del Batolito Costero del Sur y los intrusivos jurásicos, que, dada su composición similar, se agrupan bajo una misma interpretación para el aporte de granos. El Batolito Costero del Sur se encuentra en contacto con la Serie Oriental formando ambas partes de la citada cordillera, zona altamente expuesta a la erosión y aportadora de material al cauce fluvial. La composición de las rocas en el sector varía de rangos medios a félsicos, siendo sus principales minerales plagioclasas, cuarzos, feldespatos potásicos y micas. Esto es lo que probablemente se refleja en el tono claro que poseen los sedimentos en los bancos de arena del cauce del río Itata llegando a la desembocadura, que contrastan con el tono oscuro de las arenas en el sector de playa y dunas (Figura 7.9). Sumado a lo anterior, pueden aportar como mineral de alteración granos de epidota, clorita y sericita, y como mineral accesorios ilmenita, magnetita y hematita (Van Gosen *et al.*, 2014).



Figura 7.9 Desembocadura del río Itata, donde se ve el contraste entre arenas claras del río y arenas oscuras de la costa (Imagen Planet 15/01/2023).

Siguiendo hacia el valle central, el conjunto de rocas sedimentarias aquí aflorantes no reúne las características para ser una fuente importante de los sedimentos presentes en las pertenencias mineras, ya que son rocas subordinadas a otra fuente primaria de donde provengan los granos que la componen. Además, su poco relieve promueve que solo el área inmediatamente adyacente a los

flujos de ríos aporte cantidades significativas de sedimento. Las rocas volcano-sedimentarias tienen en su fracción volcánica composición andesítica, entiéndase Estratos de Pocillas y Formación Trapa-Trapa, y sus afloramientos se encuentran en la Cordillera de la Costa y la cordillera andina, respectivamente.

Las rocas extrusivas, ubicadas en la Cordillera de los Andes, son las rocas cuya composición es la más compatible con el perfil geoquímico de los sedimentos en estudio. La litología que predomina son andesitas y andesitas basálticas. Cabe destacar que, en la Formación Cola de Zorro, se tienen litologías básicas hasta el rango de basaltos (Muñoz & Niemeyer, 1984), las cuales son altamente similares al perfil geoquímico de las muestras de arenas. Por los demás, en ninguno de los centros volcánicos activos de la cuenca o cercanos a ella se hayan lavas de composición netamente basálticas.

7.2.3. Factores geológicos externos a la cuenca del Itata

Complementando a las dos secciones anteriores, se tienen antecedentes interesantes en depósitos litorales al sur de la zona de estudio, a lo largo de la costa de la Región del Biobío, los cuales permiten obtener características que contribuyen a la interpretación general del depósito y origen de sedimentos.

Como parte del análisis acerca de qué rocas podrían aportar los sedimentos encontrados en las acumulaciones de minerales ferrosos del borde costero, es importante mencionar el aporte de rocas sedimentarias que corresponden a paleoplaceres. Estas rocas son formadas en un pasado geológico por acumulación de sedimento enriquecido en minerales de interés (hierro, titanio, oro, REE), siendo preservadas, litificadas y posteriormente exhumadas. Cuando estas rocas afloran en el borde costero o riberas de ríos, se meteorizan, provocando su erosión y el aporte de minerales pesados al ambiente, actuando en su origen como placeres y posteriormente como fuente de estos granos (Harraz, 2013; Van Gosen *et al.*, 2014). Son reportadas en tres sitios:

- Sector Playa Blanca, Coliumo. Se observó un nivel de conglomerado polimíctico, que sobreyace a los depósitos litorales, con una pobre selección y matriz arenosa. La matriz es de tono oscuro, tamaño de grano arena media, elevado peso específico y reacciona

fuertemente a imán. Los clastos eran líticos de ~10-20 cm, entre los que se observó Fm. Quiriquina (Biró-Bagóckzky, 1982) y Basamento Metamórfico.

- Al NW de Tomé. Se reporta por parte del profesor Ramiro Bonilla (comunicación verbal, 2023), la existencia de un afloramiento de areniscas oscuras, de la cuales se cuenta con una muestra de mano y corte transparente. Esta arenisca tiene una selección moderada a buena, tamaño de grano medio a fino, alto peso específico y reacciona magnéticamente de manera intensa. Por geología de ese sector, y paleoambiente, se puede presumir que debe ser parte de Fm. Curanilahue (Tavera, 1942), miembro Intercalación, de edad Paleoceno Superior-Eoceno Inferior.
- Sector Punta Tucapel, Lebu. De acuerdo con Collao *et al.* (1982), se reporta en esta zona bloques de areniscas ferro-titaníferas esparcidos por una franja estrecha de ~1 km. Posee ilmenita (19,3%), titanomagnetita (1,6%) y rutilo (0,3%). Son atribuidas a la parte superior de la Formación Boca Lebu (Muñoz-Cristi, 1956), de edad Eoceno inferior.

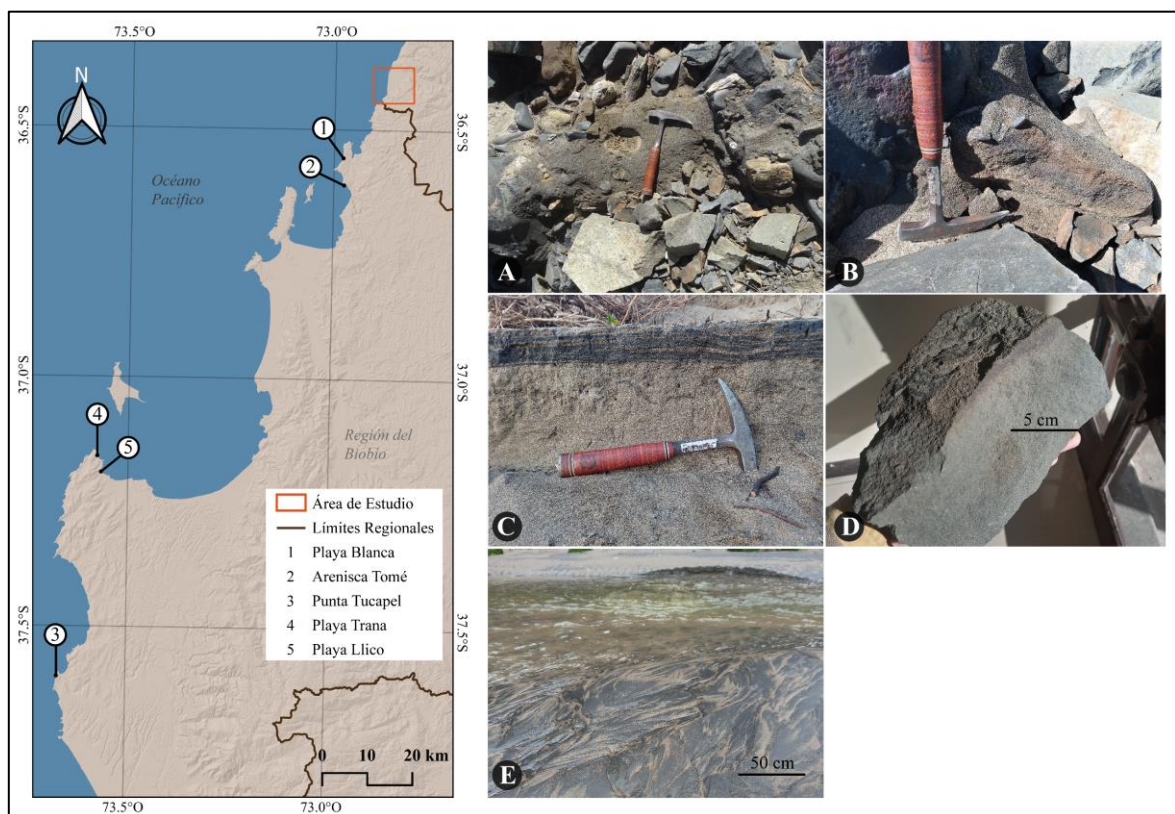


Figura 7.10 Ubicación de factores geológicos externos a la cuenca del Itata mencionados en el estudio. [A] Afloramiento de conglomerado polimítico con matriz ferrosa en Playa Blanca, Coliumo; [B] Sección fresca del conglomerado ferroso, Playa Blanca de Coliumo, [C] Capas centimétricas de arenas ferro-titaníferas en un nivel de terraza, Playa Blanca de Coliumo, [D] Muestra de mano de arenisca ferrosa de Tomé, [E] Lentes actuales de arenas ferrosas en Playa de Llico, Arauco.

En la península de Coliumo, en Playa Blanca, además del conglomerado observado, existen depósitos litorales de arenas claras, las que contienen capas centimétricas de arenas negras magnéticas, las cuales han sido descritas como arenas ferro-titaníferas, por su contenido de titanomagnetita, ilmenita, magnetita, etc. (Collao *et al.*, 1982). En este depósito la acumulación probablemente está dada por ciclos de tempestad, los cuales han generado las capas enriquecidas de minerales oscuros, minerales que resaltan de la masa de arena que los albergan. De forma macroscópica, la fracción clara de las arenas no representa una procedencia volcánica, sino más bien provienen de las rocas que conforman la costa de la citada península, en este caso, rocas granitoides, sedimentarias y metamórficas. Por ende, en primera instancia, se puede especular que este placer litoral no tendría un origen principal de tipo volcánico y sería una diferencia con respecto al placer en estudio.

Continuando la línea sobre sedimentos de origen volcánico, al sur del área de estudio, a la altura de Concepción, la desembocadura del río Biobío es otro ejemplo de una red fluvial que transporta sedimentos desde la cordillera andina hasta el océano. Estas arenas negras por numerosos trabajos e informes de Geología de Campo II de la universidad de Concepción son asociadas al Volcán Antuco, formando las conocidas arenas Biobío. Sin embargo, no hay observaciones de acumulaciones de minerales pesados, ni menos de arenas ferro-titaníferas en las áreas adyacentes. Las texturas de estas arenas son de media a gruesa, y son distintas a las observadas en el terreno de este estudio y a las arenas de Playa Blanca.

Por otra parte, se tienen observaciones de la situación contraria, playas donde no desembocan ríos conectados con la cordillera andina, y en las cuales hay pequeñas acumulaciones, lentes y capas de minerales ferrosos. Esto se observa en playas de la península de Coliumo, entre ellas Playa Blanca, y en las Playas de Trana y Llico, península de Arauco (Figura 7.10). Este hecho corrobora el aporte de minerales ferrosos y/o ferro-titaníferos por parte de rocas que conforman la Cordillera de la Costa, que corresponden al Basamento Metamórfico y Batolito Costero del Sur, además de rocas sedimentarias que afloran en sus costas.

7.2.4. Ocurrencia del placer litoral: ¿Fuente muy enriquecida de Fe-Ti o mecanismos particulares del ambiente litoral?

Los datos minerales y químicos de las arenas de las pertenencias mineras en estudio indican una proveniencia de primer orden volcánica. La revisión de las rocas de la cuenca del río Itata apoya esta génesis, ya que en la cordillera andina se desarrollan cauces de ríos en secuencias volcánicas antiguas y recientes. Sin embargo, ninguna de estas rocas se ha descrito con una composición básica como para aportar los grandes volúmenes de olivino y óxidos de hierro encontrados en las muestras analizadas, e incluso, lo esperable sería una tendencia al aumento del contenido de sílice hacia la costa, debido a la cercanía con granitos y rocas metamórficas de la Cordillera de la Costa, y a la alta estabilidad que poseen minerales como el cuarzo. Este hecho también se ve influenciado por la remoción de mineralogía “liviana” que realiza la acción de las olas, mareas y viento de la zona. Las grandes cuencas fluviales actuales de Chile conectan el transporte de sedimentos desde la Cordillera de los Andes hasta el océano Pacífico, característica presente en la cuenca del río Itata y la cuenca del río Biobío. Sin embargo, la segunda no tiene antecedentes de concentraciones mayores de minerales pesados, ni en el transcurso de su cauce ni en su desembocadura. Por lo tanto, las rocas volcánicas que actualmente afloran en este rango sur de la cordillera de los Andes no justifican por si solas el origen de los enriquecimientos de *heavy sands* en la costa.

Una de las dos teorías que se pueden formular a partir de los antecedentes revisados en este estudio, es de la existencia de una fuente enriquecida de Fe-Ti en un pasado geológico, la cual hoy en día se encuentra erosionada, idea que ya ha sido propuesta de forma similar anteriormente por otros autores (D’ Aubarede, 1968). Estas rocas fuentes podrían ser secuencias volcánicas de composición química basálticas o más básicas, las cuales se habrían erosionado a la fecha, liberando todos sus granos al curso fluvial que desemboca en el océano, material que actualmente es transportado desde la zona de *offshore* a la costa. Apoyándose de las fotomicrografías obtenidas e imágenes SIAMS, es posible observar que los líticos volcánicos poseen un tamaño de grano medio a grueso, alta esfericidad y son subangulares a angulares, lo cual puede indicar que la fuente de estos estuvo cercana a la costa. Similar pasa con los olivinos que poseen un tamaño de grano medio, con alta esfericidad y subangulares. Esta idea de la fuente enriquecida es apoyada por la observación de litologías fuertemente magnéticas, que corresponden a las areniscas observadas en Punta Tucapel de Lebu, por Collao *et al.* 1982, y a la arenisca magnética de sector Tomé (Bonilla comunicación

personal, 2023). Ambas litologías son interpretadas como secuencias sedimentarias de ambiente de plataforma intermareal y/o deltaico, y se les asigna una edad de Paleoceno Superior-Eoceno Inferior. Esto permite inferir que ya había aporte hacia la costa de material enriquecido en hierro desde al menos el Paleoceno inferior.

Sumado a lo anterior, es compatible con esta idea el hecho de que los sedimentos actuales del río Itata son diferentes a los depósitos de arena que hay en la costa (Figura 7.9), lo que implicaría que la mayoría de los minerales pesados ya fueron erosionados y transportados, siendo actualmente retrabajados por los agentes de la costa, desde la zona de *offshore* hasta la planicie litoral. Complementario a estos antecedentes, hay evidencia de actividad volcánica pre mesozoica, tanto en la región del Ñuble como en la del Biobío, por el desarrollo de secuencias volcánicas de edades triásicas, que corresponden rocas de Fm. Santa Juana (Ferraris, 1981) y Estratos de Pocillas (Gajardo, 1981). Pese a lo expuesto, sin un estudio más profundo y complejo, que involucre geoquímica de las rocas mencionadas, reconstrucción de paleo ambientes y dataciones isotópicas, no es posible afirmar la teoría de esta fuente enriquecida antigua como un hecho.

La segunda teoría propone que no es la existencia de una fuente rica en metales de interés el principal factor que causa la formación de placeres hacia la costa, si no el conjunto de condiciones del ambiente litoral que favorecen la acumulación de estos granos:

- a) **Dinámica de mareas y oleaje de alta energía:** Como se expuso anteriormente, las condiciones de alta energía en el océano promueven el retrabajo y transporte de los sedimentos alojados en el *offshore* hacia la costa. Esta zona podría cumplir con un rol de “almacén” de minerales pesados los cuales son transportados a zona más superficiales a través de corrientes y el oleaje. Los ciclos de tormenta y/o invierno implican estas condiciones, que son exhibidas en el área de estudio a través de las imágenes satelitales (Figura 7.2), donde se aprecia el aumento del nivel de mareas y la transgresión marina. Esto implica tres consecuencias directas con la teoría: la removilización de sedimentos desde zonas de mar profundo, el retrabajo de sedimentos en la planicie litoral en zonas más alejadas de la línea de costa favoreciendo el enriquecimiento de minerales pesados, y la

preservación de la capa superficial enriquecida en tiempos de condiciones normales, que queda sumergida durante estos eventos.

- b) Corrientes del litoral:** La deriva litoral que opera en la desembocadura del Itata tiene una dirección aproximadamente Norte. Este hecho queda reflejado a través de imágenes satelitales, en condiciones normales donde el oleaje llega oblicuo a la costa (Figura 2.5), y en época de invierno, cuando la desembocadura del río Itata transporta altas cantidades de sedimento al océano (Figura 7.11). Este hecho implica que las corrientes inmediatas a la ribera sur de la citada desembocadura promueven que la mayoría del sedimento actual, que se interpreta que no es la fuente contenedora de minerales pesados, sea movilizado hacia el norte, causando así que este tipo de mineralogía no se mezcle con las capas enriquecidas que se generan sobre la berma, hecho que si se exhibe en playas de la ribera norte.

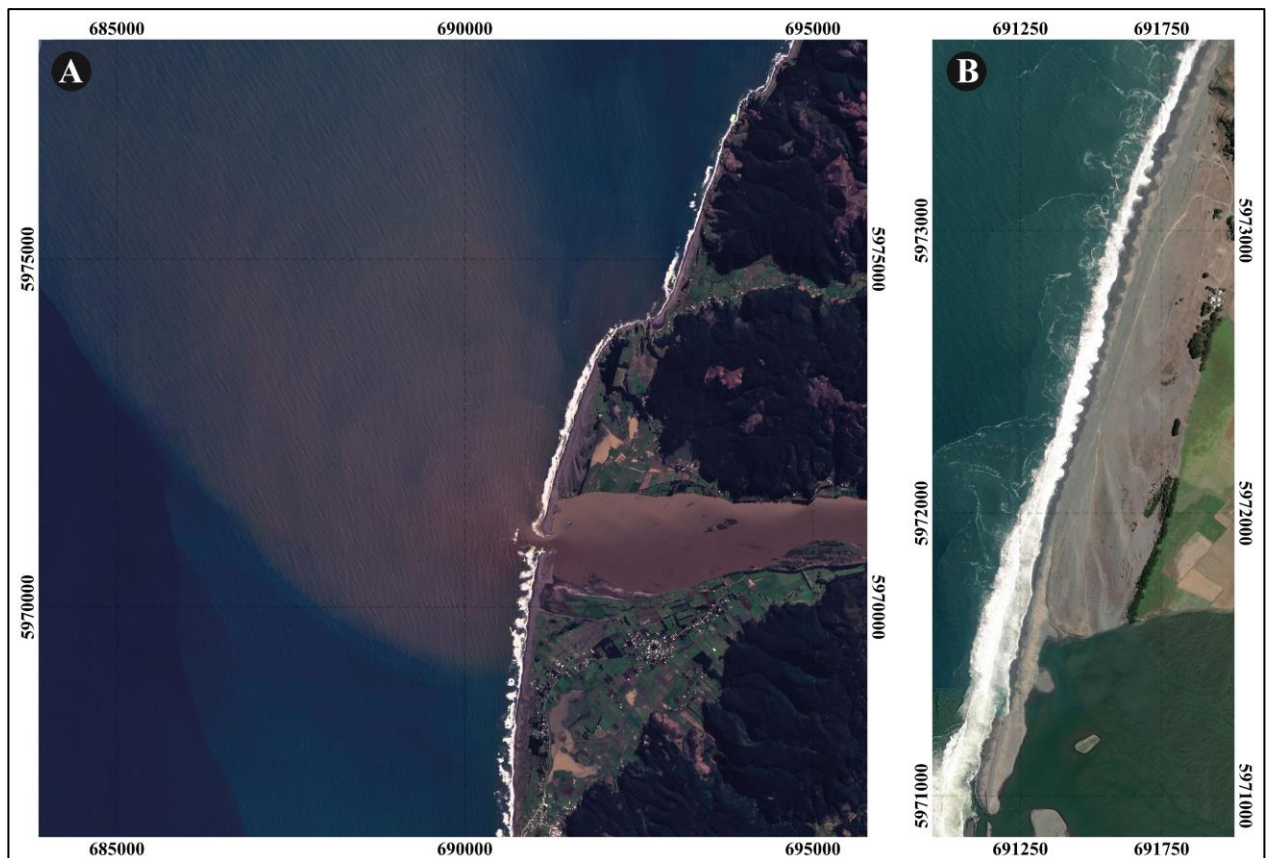


Figura 7.11 Imágenes satelitales de la desembocadura del río Itata. [A] Transporte de sedimentos con tendencia norte durante época de invierno, [B] Lentes de arenas claras en ribera norte de la desembocadura mencionada.

- c) **Forma y dimensiones de la costa:** La planicie litoral que se desarrolla en la desembocadura del río Itata posee una gran extensión, tanto en el eje N-S como en el W-E. Esto permite al oleaje tener una gran área de donde retrabajar sedimento ya depositado. La playa que se forma es paralela o casi paralela a la línea de costa, lo que favorece la gran extensión longitudinal de la berma y de todas las zonas del perfil de playa. La potencia de la columna de océano en el límite oeste de las pertenencias es de ~10 m, lo cual si se complementa con los ~500 m de distancia horizontal con la línea de costa, se tiene una zona de playa sumergida relativamente plana, lo que favorece el movimiento de sedimento desde zonas interiores del mar a exteriores.
- d) **Río con múltiples fuentes de sedimento:** El análisis de la geología de la cuenca del río Itata, muestra que se tiene aporte sedimentario de todas las rocas presentes de océano a cordillera. Por lo que los minerales acumulados en la costa poseen un origen combinado. Los líticos volcánicos, granos de olivino y óxidos de hierro probablemente provienen en su mayoría de rocas volcánicas, las cuales se desarrollaron o desarrollan en la cordillera andina. Esto es compatible con lo descrito por Del Campo (2010), quien obtiene datos químicos que sugieren que la principal fuente sedimentaria del río Ñuble (alto Itata), son las rocas volcánicas andesíticas a basálticas de las Formaciones Cola de Zorro, Trapa-Trapa y Cura-Mallín. Por su parte, los óxidos de titanio, y en menor proporción de hierro, probablemente son originados en su mayoría a partir de rocas intrusivas y metamórficas, hecho que es apoyado por la génesis de estos minerales (Van Gosen *et al.*, 2014; García *et al.*, 2020), como por la observación de capas enriquecidas de estos minerales en playas que tienen solo aporte de granos de la Cordillera de la Costa. Textualmente, al observar las microfotografías e imágenes SIAMS, se puede notar que la mineralogía metálica posee un menor tamaño de grano con respecto a los minerales formadores de roca y líticos volcánicos. Esto tendría sentido, pensando que a partir de los líticos volcánicos se liberan la mayoría de minerales como magnetita y hematita. Respecto a la esfericidad y grado de redondez, la primera varía de altamente a bajamente esférica, mientras que la segunda característica varía de angulares a subredondeados. Si bien una fuente lejana a la costa, más el retrabajo costero, deberían implicar una alta madurez textural, estas variaciones pueden justificarse a que el transporte de los ríos en Chile es corto, debido a la distancia entre

océano y cordillera. Sumado a esto, el hecho de que los granos van quedando atrapados en capas en las distintas zonas del litoral: *offshore*, *shoreface*, *foreshore* y dunas, o en las morfologías del sistema fluvial como barras o llanura de inundación, puede influir en la reducción de la madurez textural de los sedimentos. Tampoco se debe descartar que estos minerales sean trasladados por corrientes marinas desde latitudes más al norte del país, dado que las corrientes que actúan en el borde costero chileno, como la CCC (*Chile Coastal Current*), es descrita con flujo en dirección sur (Strub *et al.*, 1998).

Esta segunda teoría implica menos suposiciones que la primera e involucra una serie de características que se dan en la realidad. Por lo que, puestas en comparación, tendría más sentido de ser probable. Pese a ello, al igual que se comentó anteriormente, sin un estudio específico que analice estos factores de una manera más detallada, solo quedan como sugerencias y no se puede asegurar que efectivamente sucedan de la forma que se han descrito.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo realizado y expuesto en el presente estudio, se concluye lo siguiente:

1. El área de estudio se destaca por corresponder a un amplio sector de costa depositacional, correspondiente a la ribera sur del río Itata. En esta área se ubican las pertenencias mineras San Sebastian y San Expedito. Este sector está caracterizado geológicamente como un depósito de tipo placer, mayoritariamente en la zona de berma, en el cual se han desarrollado y/o desarrollan acumulación de arenas pesadas, altamente magnéticas y de brillo metálico.
2. Las calicatas realizadas más los análisis de laboratorio permiten identificar que la concentración de minerales pesados es mayor en la capa superficial de arena, denominada Nivel A, que posee una potencia de 20 cm en promedio. Infrayace a este nivel, otro nivel menos enriquecido, que tiene una continuidad espacial de como mínimo 1 m de potencia, denominado Nivel B.
3. La granulometría de las arenas es en promedio de tamaño arena media (0,35-0,5 mm), mientras que los granos de minerales metálicos pertenecen mayoritariamente a la fracción de arena fina (0,125-0,35 mm).
4. La caracterización mineralógica realizada en este depósito indica que los principales constituyentes minerales corresponden, en orden decreciente, a olivinos, piroxenos, plagioclasas, epidotas y cloritas. El nivel A posee mayor enriquecimiento en óxidos de hierro y titanio, mientras que el nivel B tiene mayor contenido de líticos volcánicos. La principal fase mineral portadora de hierro es la magnetita (12%wt.) seguido de hematita, mientras que para el titanio se identifican ilmenita (2,7%wt.), seguido de cantidades menores de titanita y rutilo.
5. La separación magnética (DTT) junto a la química de las arenas demuestran que el concentrado generado alcanza leyes de hasta ~59% de hierro y ~6% de titanio, con bajas cantidades de sílice y azufre.
6. El modelo 3D elaborado para el depósito de placer en el área de las pertenencias mineras, determina tonelajes interesantes para las leyes calculas del concentrado, lo que haría viable su explotación previa fase de planta piloto que obtenga concentrados de hierro y titanio comercialmente atractivos.

7. El origen geológico de estas arenas es resultado de la acción conjunta de mecanismos particulares de alta energía de la zona costera de la desembocadura del río Itata, entre ellos las corrientes litorales y marejadas de invierno; más el aporte de sedimentos de una amplia variedad de litologías presentes en la cuenca, principalmente de rocas volcánicas de la Cordillera Andina, más rocas metamórficas e intrusivas de la Cordillera de la Costa.
8. Como sugerencia, se propone el estudio de detección y cuantificación de elementos trazas y REE, tanto para la zona de berma como para los sedimentos que se ubican en las zonas sumergidas de ambas pertenencias mineras.

9. PERSPECTIVAS Y PROYECCIONES

Dada que la naturaleza del depósito analizado en el presente estudio corresponde a un placer litoral, los factores geomorfológicos adquieren una importancia fundamental a la hora de localizar e identificar zonas de acumulación mineral de interés. En la figura 2.2 se ilustra un reconocimiento y mapeado de las principales unidades geomorfológicas del área de estudio, en base al sistema fluvial identificado y su interacción con el océano. Este último punto posee una gran relevancia, ya que el mapa geomorfológico del área de estudio es una muestra de la configuración actual que tiene la desembocadura en este sector, y como se explicó en el capítulo de discusión, el transporte de los materiales de interés ocurrió en un pasado geológico. Reconstruir dicha interacción río-océano y/o poder estudiar más a fondo la evolución de la desembocadura del área permitiría tener un mayor grado de exactitud y confianza para estimar recursos minerales en las pertenencias mineras.

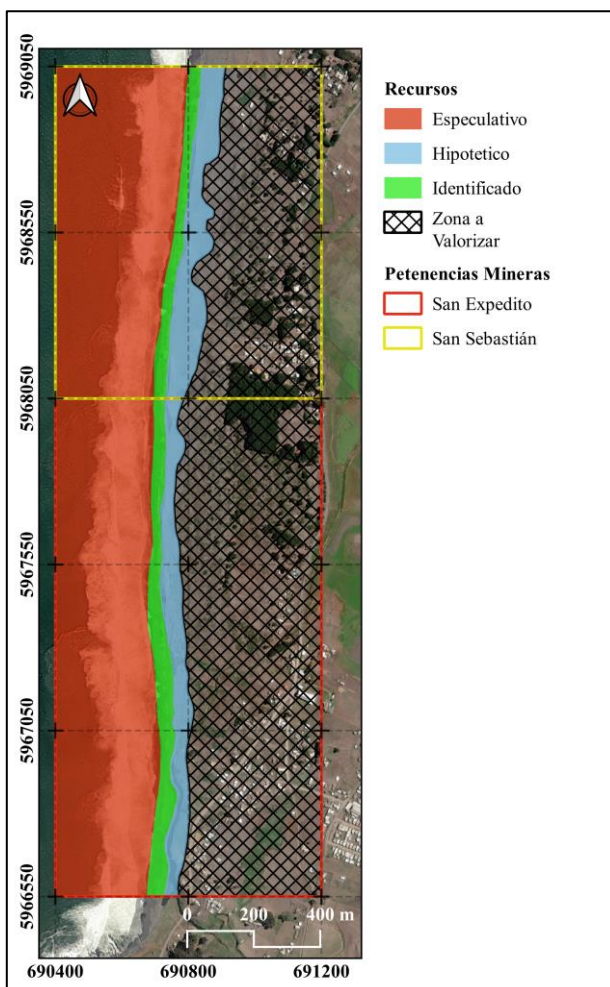


Figura 9.1 Plano con zona valorizable tras estudio morfodinámico del área.

Por la anterior expuesto, se admite la utilidad y es altamente recomendable realizar un estudio morfodinámico del área de estudio. Este tipo de estudio analizaría la dinámica del sistema fluvial y como ha variado en el tiempo, permitiendo reconocer paleo geomorfologías, como paleo canales, teniendo énfasis dentro del área de las pertenencias mineras. La acertada interpretación de estas características pasadas del sistema fluvial junto con características de ambientes de desembocadura (estuarios, deltas, barras), hará posible llegar a mejores aproximaciones de lugares de acumulación de minerales pesados. Esto permitirá asignar una valoración a toda el área oriental de las pertenencias mineras, las cuales no clasifican como dunas o playa, delimitadas por los límites norte, sur, este de las pertenencias mineras y la zona de recursos hipotéticos (Figura 9.1). Categorizar los depósitos no consolidados de esta área como estéril o de interés, ya sea como arenas ferrosas, concentrados de otro mineral, o áridos, permitiría aplicar el concepto de economía circular, aprovechando de manera eficiente todos los sectores dentro de la concesión minera para el manejo adecuado del material. Todo esto de forma global se traduce en permitir a la estimación de recursos acotar o extender zonas de interés.

Por otra parte, integrando lo debatido en el subcapítulo de origen de las arenas, se puede proyectar acerca de un parámetro presente a la hora de explotar un depósito de este tipo: el suministro sedimentario de material. Si es considerada la primera opción de origen planteada, una roca enriquecida en hierro y titanio ya erosionada, el suministro de material no posee recarga, debido a que la hipotética fuente ya no existe. Bajo este contexto, los recursos estimados serían la totalidad de recursos de las pertenencias mineras. Si se considera el segundo origen planteado, una combinación de mecanismos del litoral junto al aporte de rocas de la cuenca, si se puede considerar una recarga del suministro de material, ya sea actualmente desde el río en su desembocadura, cañones submarinos, zona del *offshore* y/o corrientes litorales. Cuantificar esta recarga requiere de modelos y simulaciones que escapan de los alcances del presente estudio, sin embargo, cabe destacar la gran implicancia que tendría, bajo este contexto de origen, determinar una tasa de reposición del material a explotar para la estimación de recursos y reservas.

10. REFERENCIAS

- AGUIRRE, L.; HERVÉ, F. & GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*. Vol. **9** (1): 7-19. Praga.
- ALFARO, G. & GAJARDO, A. 1980. Carta Metalogénica de la VIII Región Administrativa de Chile y Provincia de Malleco, IX Región. Congreso Geológico Argentino N°7. Vol. **1**: 171- 184. Neuquén.
- ANAVALÓN, A. 2018. Evolución tectonosedimentaria de los depósitos plio-pleistocenos del valle central de Chile, entre los 36°50's y 38°50'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 89 pp. Concepción.
- AYALA, N. 2022. Identificación mineralógica y geoquímica de sedimentos, en búsqueda de metales preciosos en Magallanes, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Inédito): 158 pp.
- BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile: Tomo II Geomorfología. Instituto Geográfico Militar.
- CARTES, N. 2004. Petrografía y ambiente de depositación de las metapelitas paleozoicas con huellas fósiles entre Tomé y Lirquén VIII Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 115 pp. Concepción.
- CARVAJAL, D. 2018. Estudio del Potencial Económico para desarrollo de pequeña y mediana minería del prospecto Cayucupil, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de las ciencias de la tierra (Inédito): 77 pp. Concepción.
- CHARRIER, R. 1979. El Triásico en Chile y regiones adyacentes de Argentina: una reconstrucción paleogeográfica y paleoclimática. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Comunicaciones **26**: 1-37.
- CHARRIER, R.; RAMOS, V.; TAPIA, F. & SAGRIPANTI, L. 2015. Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen between 31 and 37°S (Chile and Western Argentina). Geological Society, *Special Publication* **399**: 13-61. Londres.
- COLLAO, S.; FRUTOS, J.; HELLE, S. & PINCHEIRA, M. 1982. Mineralogía y aspectos texturales de la fracción metálica de un paleoplacer y placer de playa Fe-Ti, Región del Biobío, Chile. Congreso Geológico Chileno N° 3. Actas **F**: 236-255. Concepción.
- COLLAO, S.; STANGE, F.; HERNÁNDEZ, L. & URIBE, M. 2019. Mineralogy of a Radioactive-Rare Earth Elements Occurrence in the Paleozoic Batholith, South-Central Chile. *International Journal of Geosciences*, Vol. **10** (6): 632-651.
- COLLAO, S.; ALFARO, G.; CECIONI, A.; GONZÁLEZ, A. & QUINZIO-SINN, L. 2000. Evaluación de los recursos metálicos de la Región del Biobío. Proyecto Fondo Nacional de Desarrollo Regional. Vol. **1**: 80 pp. Concepción.
- CREIXELL, C. 2001. Petrología y geotermobarometría de las rocas intrusivas de la cordillera de la Costa entre los 36° 30'S y 38° 00'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp. Concepción.
- CUADRA, W. 2015. Certificación de la información base para la evaluación de recursos geológicos. Presentación para CAP Minería: 38 pp.
- D'AUBAREDE, G. & LILLO, F. 1968. Evaluación de los conocimientos existentes sobre: asbesto, bentonita, boratos, carbonato de sosa, diatomita, magnesio, sulfato sódico, titanio.

- CORFO: Instituto de Recursos Naturales. Programa de desarrollo de las Naciones Unidas. Publicación N° 12: 203-252. Santiago.
- DECKART, K.; HERVÉ, F.; FANNING, C.; RAMÍREZ, V.; CALDERÓN, M. & GODOY, E. 2014. U-Pb Geochronology and Hf-O isotopes of zircons from the Pennsylvanian coastal batholith, South-Central Chile. *Andean geology*. Vol. **41** (1): 49-82. Santiago.
- DEL CAMPO, F. 2010. Tasa de transferencia sedimentaria en la cuenca del río Ñuble: estimación basada en disequilibrios de la serie del uranio-238. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 120 pp. Santiago.
- DÉRUELLE, B. & DÉRUELLE, J. 1974. Los volcanes cuaternarios de los Nevados de Chillán (Chile Central) y reseña sobre el volcanismo cuaternario de los Andes chilenos. *Estudios Geológicos*, Vol. **30**: 91-108.
- DGA. 2014. Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile. Informe Técnico. S.D.T N° 364. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación: 54 pp. Santiago.
- DGA. 2019. Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de las regiones de Ñuble y del Biobío. S.D.T N° 418. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Dpto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos: 197 pp. Santiago.
- DGA-AQUATERRA. 2011. Estudio hidrogeológico cuencas Biobío e Itata. Cuenca Itata. Informe final. S.I.T N° 258. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Tomo I: 362 pp. Santiago.
- DGA; GEO-SAFE LIMITADA; RHYMA INGENIERIA. 2018. Prospección geofísica sector rural déficit hídrico valle del Itata. S.D.T N°433. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Dirección Regional de Aguas-Región del Biobío: 471 pp. Concepción.
- DIXON, H.; MURPHY, D.; SPARKS, J.; CHÁVEZ, R.; NARANJO, A.; DUNKLEY, N.; YOUNG, R.; GILBERT, S. & PRINGLE, R. 1999. The geology of Nevados de Chillán volcano, Chile. *Revista Geológica de Chile*, Vol. **26** (2): 227-253. Santiago.
- EL KHALLOUFI, M.; DREVELLE, O. & SOUCY, G. 2021. Titanium: An Overview of Resources and Production Methods. *Minerals*, Vol. **11** (12): 22 pp.
- ENCINAS, A.; SAGRIPANTI, L.; RODRÍGUEZ, M.; ORTOS, D.; ANAVALÓN, A.; GIROUX, P.; OTERO, J.; ECHAURREN, A.; ZAMBRANO, P. & VALENCIA, V. 2021. Tectonosedimentary evolution of the Coastal Cordillera and Central Depression of south-Central Chile (36°30'-42°S). *Earth-Science Reviews*, Volume **213**.
- FERRARIS, F. 1981. Hoja Los Ángeles-Angol escala 1:250.000, Región del Bío-Bío. Instituto de Investigaciones Geológicas, Mapas Geológicos Preliminares de Chile N°5: 26 pp. Santiago.
- FLYNN, J.; CHARRIER, R.; CROFT, D. A.; GANS, P.; HERRIOTT, T.; WERTHEIM, J. & WYSS, A. (2008). Chronologic implications of new Miocene mammals from the Cura-Mallín and Trapa Trapa formations, Laguna del Laja area, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, **26** (4): 412–423.
- FOLGUERA, A.; RAMOS, V.A.; HERMANN, R. & NARANJO, J. 2004. Neotectonics in the foothills of the southern most Central Andes (37°-38°S): Evidence of strike-slip displacement along the Añatir-Copahue fault zone. *Tectonics* **23**: 23 pp.
- FORCE, E. 1991, Geology of titanium-mineral deposits. Geological Society of America, *Special Paper* **259**: 112 pp.

- GAJARDO, A. 1981. Geología de la hoja Concepción-Chillán escala 1:250.000, Región del Biobío. Instituto de Investigaciones Geológicas. Mapas Geológicos Preliminares de Chile N°4: 32 pp. Santiago.
- GARCÍA, M.; CORREA, J.; MAKSAEV, V.; TOWNLEY, B. 2020. Potential mineral resources of the Chilean offshore: an overview. *Andean Geology* **47** (1): 1-13.
- GARCÍA-SANSEGUNDO, J.; RUBIO, A.; HEREDIA, N.; SANTOS-MARTÍNEZ, J.; PALAPE, C.; CUESTA, A.; FARÍAS, P.; GALLASTEGUI, G.; GARCÍA-MORENO, O.; MARTÍN-GONZÁLES, F. & HYPPOLITO, T. 2018. La estructura de la Serie Oriental en la zona del río Maule, Constitución (Chile). XV Congreso Geológico Chileno, Artículo de Congreso: 4 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2013. Geología del sector Tomé-Vegas de Itata entre los 36°22'-36°44' y 73°00'-73°43', Región del Biobío, Chile. Informe requerido de la asignatura. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 79 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2021. Geología del sector costero de la provincia de Concepción entre los 36°33'35"-37°02'03" latitud sur y 73°00'09"-73°17'38" longitud oeste, Región del Biobío, Chile. Informe requerido de la asignatura. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 142 pp. Concepción.
- GESEMEX (2011). Extracción, procesamiento de arenas ferrosas, poder de compra y exportación de mineral de hierro. APC Minerals, Declaración de Impacto Ambiental: 75 pp.
- GLODNY, J.; ECHTLER, H.; FIGUEROA, O.; FRANZ, G.; GRÄFE, K.; KEMNITZ, H.; KRAMER, W.; KRAWCZYK, C.; LOHRMANN, J.; LUCASSEN, F.; MELNICK, D.; ROSENAU, M. & SEIFERT, W. 2006. Long-term geological evolution and mass-flow balance of the south-central Andes. *The Andes: Active Subduction Orogeny*. Oncken, O.; Chong, G.; Franz, G.; Giese, P.; Götze, H.; Ramos, V.; Strecker, M. y Wigger, P. editors. Springer: 401-428. Berlín.
- GONZÁLEZ, O. & VERGARA, M. 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 sur. Universidad de Chile, Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Vol. **19** (19):19-121. Santiago.
- GONZÁLEZ-BONORINO, F. & AGUIRRE, L. 1970. Metamorphic facies series of the crystalline basement of Chile. *Geologische Rundschau*. Vol. **59** (3): 979-994.
- GOTTLIEB, P.; WILKIE, G.; SUTHERLAND, D.; HO TUN, E.; SUTHERS, S.; PERARA, K.; JENKINS, B.; SPENCER, S.; BUTCHER, A. & RAYNER, J. 2000. Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications, Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. Microtextural Mineralogy. Testing & Analysis. Vol. **52** (4): 24-25.
- GUJAR, A.; AMBRE, N.; MISLANKAR, P. & IYER, S. 2008. Ilmenite, Magnetite and Chromite beach placers from south Maharashtra, Central west coast of India. *Resource Geology*, Vol. **60**(1): 71-86.
- HARRAZ, H. (2013). Placer Mineral Deposits. Tanta University, Presentación Digital, Tópico 7: 23 pp. Egipto.
- HERRON, M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. Journal of Sedimentary Petrology, Vol. **58** (5): 820-829.
- HERVÉ, F. 1977. Petrology of the crystalline basement of the Nahuelbuta mountains, south-central Chile. Comparative Studies on the Geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. Ishikawa, T. y Aguirre, L. editors. *Japan Society for the Promotion of Science*: 1-51. Tokio.

- HERVÉ, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in southern Chile. *Episodes Journal of International Geoscience*. Vol. **11** (3): 183-188. Seúl.
- HERVÉ, F., & MUNIZAGA, F. 1978. Evidencias geocronológicas de un magmatismo intrusivo Triásico Superior-Jurásico en la cordillera de la costa de Chile entre los 35°30', y 36°30' L.S. Actas, VII Congreso Geológico Argentino **11**: 505-607. Neuquén
- HERVÉ, F.; GODOY, E.; PARADA, M.; RAMOS, V.; RAPELA, C.; MPODOZIS, C. & DAVIDSON, J. 1987. A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early history. Circum-Pacific Orogenic Belts and Evolution of the Pacific Ocean Basin. Monguer, J. y Francheteau, J. editors. *American Geophysical Union*: 97-113. Washington D. C.
- HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; PARADA, M.; BROOK, M.; PANKHURST, R.; SNELLING, N. & DRAKE, R. 1988. Granitoids of the coast range of central Chile: geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1** (2): 185-194.
- HYPPOLITO, T.; JULIANI, C.; GARCÍA-CASCO, A.; MEIRA, V.; BUSTAMANTE, A. & HERVÉ, F. 2014. The nature of the Palaeozoic oceanic basin at the southwestern margin of Gondwana and implications for the origin of the Chilenia terrane (Pichilemu, central Chile). *International Geology Review*. Vol. **56** (9): 1.097-1.121.
- IIG; MMAJ. 1981. Informe de reconocimiento geológico de la región Andina situada al este de la ciudad de Concepción: fase III (Inédito). Realizado por Instituto de Investigaciones Geológicas y Metal Mining Agency of Japan, 110 pp. Santiago.
- JENKINS, O. 1964. Geology of placer deposits. Division of Mines and Geology, *Special Publication* N° 34: 27 pp. California.
- JORDAN, T.; MATTHEW, W.; VEIGA, R.; PÁNGARO, F.; COPELAND, P.; KELLEY, S. & MPODOZIS, C. 2001. Extension and basin formation in the southern Andes caused by increased convergence rate: A mid-Cenozoic trigger for the Andes: *Tectonics* **20**: 308-324.
- KLEIN, C. & HURLBUT, C. 1996. Manual de Mineralogía: basado en la obra de J.D. Dana. Editorial Reverté, Vol. **I**: 392 pp.
- KOMAR, P. 1998. Beach Processes and Sedimentation. Prentice-Hall, Englewood-Cliff. 2^d Edition: 555 pp.
- LAGNO, L. 1981. Geología del cuadrangular Pocillas, Cauquenes, VII Región, Chile. Tesis para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 150 pp. Santiago.
- LE BAS, M.; LE MAITRE, R.; STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total álcali-silica diagram. *Journal of Petrology*, Vol. **27**: 745-750.
- LOHMAR, S. 2000. Estratigrafía, petrografía y geoquímica del Volcán Antuco y sus depósitos (Andes del Sur, 37°25'S). Memoria para optar al Título de Geólogo, Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 184 pp.
- LONGHITANO, S. 2015. Short-Term Assessment of Retreating vs. Advancing Microtidal Beaches Based on the Backshore/Foreshore Length Ratio: Examples from the Basilicata Coasts (Southern Italy). *Open Journal of Marine Science* **5**:123-145. <http://dx.doi.org/10.4236/ojms.2015.51011>
- MARTINEZ, P.; SINGER, B.; ROA, H. & JICHA, B. 2018. Volcanologic and petrologic evolution of Antuco-Sierra Velluda, Southern Andes, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **349**: 392-408.

- MCLEMORE, V. 2017. Heavy mineral, beach-placer sandstone deposits at Apache Mesa, Jicarilla Apache Reservation, Rio Arriba County, New Mexico, in *The Geology of the Ouray-Silverton Area*, Karlstrom, Karl E.; Gonzales, David A.; Zimmerer, Matthew J.; Heizler, Matthew; Ulmer-Scholle, Dana S., *New Mexico Geological Society, Guidebook*, 68th Field Conference: 123-132.
- MELNICK, D.; & ROSENAU, M.; FOLGUERA, A. & ECHTLER, H. 2006. Neogene tectonic evolution of the Neuquén Andes western flank (37–39°S). *Geological Society of America, Special Paper* **407**: 73-95.
- MISKELLY, N. 2003. Progress on International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves. Chairman, Combined Reserves International Reporting Standards Committee (CRIRSCO), *Reston Paper*: 22 pp.
- MORALES, E.; WINCKLER, P.; HERRERA, M. 2020. Costas de Chile. Medio Natural, Cambio Climático, Ingeniería Oceánica, Gestión Costera. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile: 182 pp. Valparaíso.
- MORENO, H.; HERVÉ, F.; GODOY, E.; PARADA, N. 1976. Reconocimiento geológico del área de Pocillas (Cauquenes, VII Región). Universidad de Chile, Departamento de Geología (Inédito): 9 pp. Santiago.
- MORENO, H.; VARELA, J.; LAHSEN, A. & VERGARA, M. 1984. Estudio Geológico del Grupo Volcánico Antuco-Sierra Velluda. Departamento de Geología y Geofísica. Universidad de Chile. Contrato OICB-03. ENDESA. Informe Inédito. 164 pp.
- MORENO, H.; THIELE, R.; LAHSEN, A.; VARELA, J.; LOPEZ, L. & VERGARA, M. 1986. Geocronología de rocas volcánicas cuaternarias en los Andes del Sur entre las latitudes 37 y 38 S, Chile, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Tomo **XL** (3-4): 297-299. Buenos Aires.
- MUÑOZ, J. & NIEMEYER, H. 1984. Hoja Laguna del Maule escala 1:250.000. Regiones del Maule y Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería: Carta Geológica de Chile N°64.: 96 pp. Santiago
- MUÑOZ-CRISTI, J. 1960. Contribución al conocimiento geológico de la cordillera de la Costa de la zona central. *Revista Minerale*. Vol. **15** (69): 28-47. Santiago.
- NARANJO, J.; GILBERT, J.; SPARKS, R. 2008. Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán escala 1:50.000, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N° 114: 28 pp. Santiago.
- NIEMEYER, H. & MUÑOZ, J. 1983. Hoja Laguna del Laja escala 1:250.000. Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería: Carta Geológica de Chile N°57: 52 pp. Santiago.
- NWAILA, G.; ZHANG, S. & FRIMMEL, H. 2019. Local and Target Exploration of Conglomerate-Hosted Gold Deposits Using Machine Learning Algorithms: A Case Study of the Witwatersrand Gold Ores, South Africa. *Natural Resources Research* **29**: 135–159.
- ORRIS, G. & GRAUCH, R. (2002) Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences. U.S. Geological Survey, *Open-File Report* 02-189: 26 pp. Tucson.
- ORTIZ, J. & EMERY, X. 2004. Categorización de recursos y reservas mineras. 1st International Conference on Mining Innovation MINIM, *Conference Paper*: 198-208.
- PINEDA, V.; CONTARDO, X.; ALFARO, G. & HELLE, S. 2002. Caracterización textural, mineralógica y geoquímica de sedimentos del canal Beagle, bahía Nassau. Magallanes, Chile. *Crucero CIMAR 3 Fiordos*. Ciencia y Tecnología del Mar, Vol. **25** (1): 5-21.

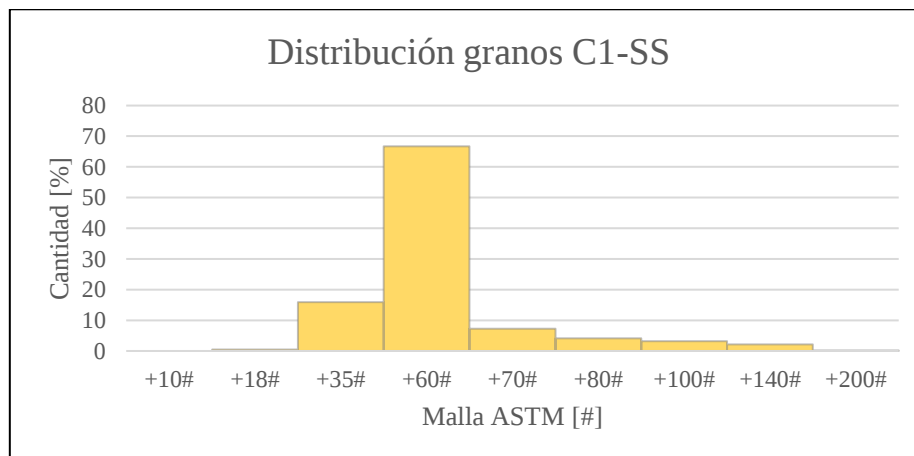
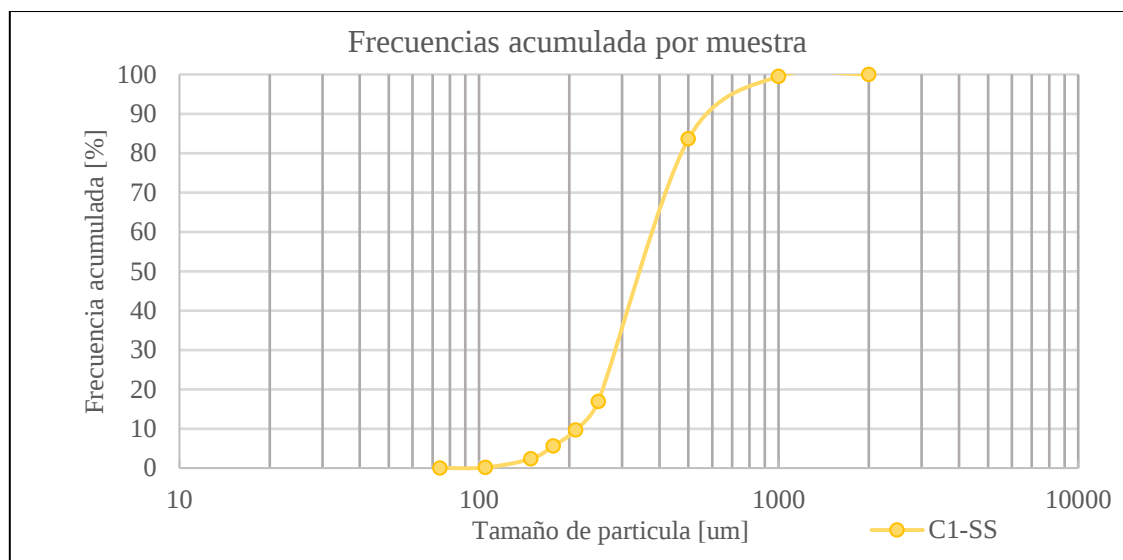
- PROTHERO, D. & SCHWAB, F. 2013. Sedimentary Geology. An Introduction to Sedimentary rocks and stratigraphy. W.H. Freeman, 3ª Edición: 593 pp. Nueva York.
- RADIC, J.; ROJAS, L.; CARPINELLI, A. & ZURITA, E. 2002. Evolución tectónica de la cuenca terciaria de Cura-Mallín, región cordillerana chileno argentina (36°30'-39°00'S). Congreso Geológico Argentino, No. 15, Actas 3: 233-237. Calafate.
- SERNAGEOMIN. 2023. Anuario de la Minería de Chile 2022. Servicio Nacional de Geología y Minería: 235 pp. Santiago.
- STERN, C. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. Revista Geológica de Chile, Vol. 31 (2): 161-206. Santiago.
- STRUB, P.; MESÍAS, J.; MONTECINO, V.; RUTLLANT, J. & SALINAS, S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. Chapter 10. En *The Sea: The global coastal ocean, regional studies and synthesis*, Vol. 11: 273-313. A.R. Robinson & K.H. Brink.
- SUÁREZ, M.; EMPARÁN, C. 1997. Hoja Curacautín escala 1:250.000, Regiones de La Araucanía y del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N°71: 105 p. Santiago.
- TARBUCK, E. & LUTGENS, F. 2005: Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física. Pearson Prentice Hall, 8ª Edición: 710 pp.
- THIELE, R.; MORENO, H.; ELGUETA, S.; LAHSEN, A.; REBOLLEDO, S. & PETIT-BREUILH, M. 1998. Evolución geológico-geomorfológica cuaternaria del tramo superior del valle del río Laja. Revista Geológica de Chile, Vol. 25 (2): 229-253. Santiago.
- TORRES, I. 2019. Relación Petrográfica de las Menas de Hierro y su Impacto en los Procesos Metalúrgicos: Proyecto Alcaparra A, Región de Atacama. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 65 pp. Concepción.
- URPÍ, F. 2019. Titanio. Anales de Química. Universidad de Barcelona, Vol. 115 (2): 84 p.
- URRUTIA, P. 2018. Identificación, caracterización y cuantificación del patrimonio geológico de la zona sur de la reserva de la biósfera corredor biológico Nevados de Chillán - Laguna del Laja, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp. Concepción.
- USGS, 1980. Principles of a resource/reserve classification for minerals. United States Geological Survey, Circular 831: 5 pp.
- USGS. 2023. Mineral commodity summaries. United States Geological Survey: 210 pp.
- VALDERRAMA, L. 2008. Concentración de minerales de titanio contenidos en las arenas de playas de la región de Atacama, Chile. IDICTEC, Universidad de Atacama. *Holos*, Año 24, Vol. 1: 119-130.
- VALDERRAMA, L.; POBLETE, R. & CONTRERAS, C. 2005. Caracterización y Concentración de Muestras de Arenas de Caldera, Región de Atacama. Universidad de Atacama, Revista de la Facultad de Ingeniería, Vol. 19: 38-44.
- VALDERRAMA, L.; HERRERA, O.; RIVERA, A. 2022. Relevancia de los resultados de pruebas de laboratorio para predecir la recuperación de hierro a nivel industrial. Información Tecnológica, Vol. 33 (1): 169-180. La Serena.
- VAN GOSEN, B.; FEY, D.; SHAH, A.; VERPLANCK, P. & HOEFEN, T. 2014. Deposit model for heavy mineral sands in coastal environments: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–L, 51 p.

- VARELA, J. & MORENO, H. 1982. Los depósitos de Relleno de la Depresión Central de Chile entre los ríos Lontué y Biobío. Congreso Geológico Chileno N°3, Actas F: 282-305. Concepción
- VARELA, J., MORENO, H., LAHSEN, A. & VERGARA, M. 1988. Los depósitos de relleno Cuaternario del curso superior del río Laja (VIII Región). Congreso Geológico Chileno N° 5, Actas, Vol. 2: 159-177. Santiago.
- VÁSQUEZ, P. 2001. Petrología y geotermobarometría del Basamento Metamórfico de la cordillera de la Costa entre los 36°30'S y 38°00'S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 170 pp. Concepción.
- VELÁSQUEZ, R.; COLLAO, S. & FIGUEROA, O. 2012. Zonación mineralógica de la Pegmatita Poñén en el Batolito Costero del Sur, región del BioBío - Chile. Congreso Geológico Chileno N°13, Acta: 345-347. Antofagasta.
- VERGARA, C. 1968. Estudio de las arenas costeras de la región Tomé-Dichato. Geoandes. Vol. 1 (54): 517-527.
- VERGARA, M. & KATSUI, Y. 1969. Contribución a la Geología y Petrología del Volcán Antuco, Cordillera de los Andes, Chile Central. Universidad de Chile, Instituto de Geología, Publicación, No. 35, 25-47.
- VERGARA, M. & MUÑOZ, J. 1982. La Formación Cola de Zorro en la alta cordillera andina chilena (36°-39°lat. S), Sus características petrográficas y petrológicas: una revisión. Revista Geológica de Chile, Vol. 17: 31-46. Santiago.
- WALKER, R. & PLINT, A. 1992. Wave- and Storm-Dominated Shallow Marine Systems. In: Walker, R. & James, N., Eds., *Facies Models: Response to Sea Level Change*, Geological Association of Canada, Newfoundland: 219- 238.
- WENTWORTH, C. 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Geology*, Vol. 30: 377-392.
- WILLNER, A.; THOMSON, S.; KRÖNER, A.; WARTH, J.; WIJBRANS, J. & HERVÉ, F. 2005. Time markers for the evolution and exhumation history of a late Palaeozoic paired metamorphic belt in north-central Chile (34°-35°30' S). *Journal of Petrology*. Vol. 46 (9): 1.835-1.858.

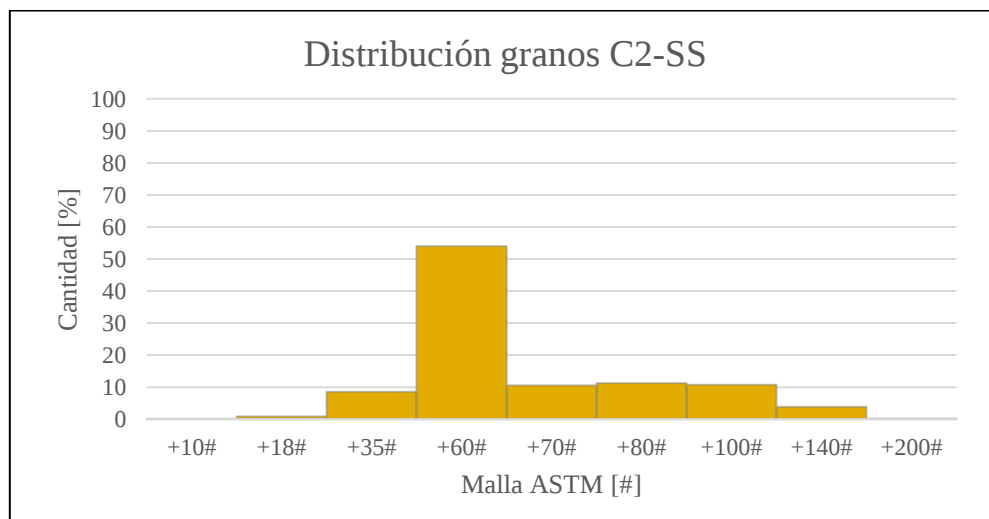
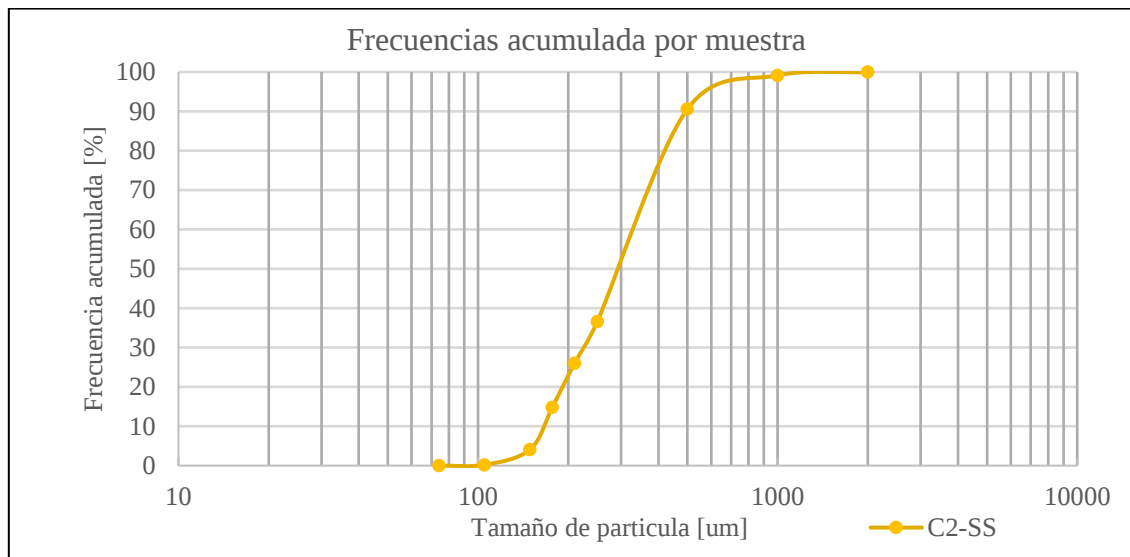
ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO CON DETALLE POR MUESTRA

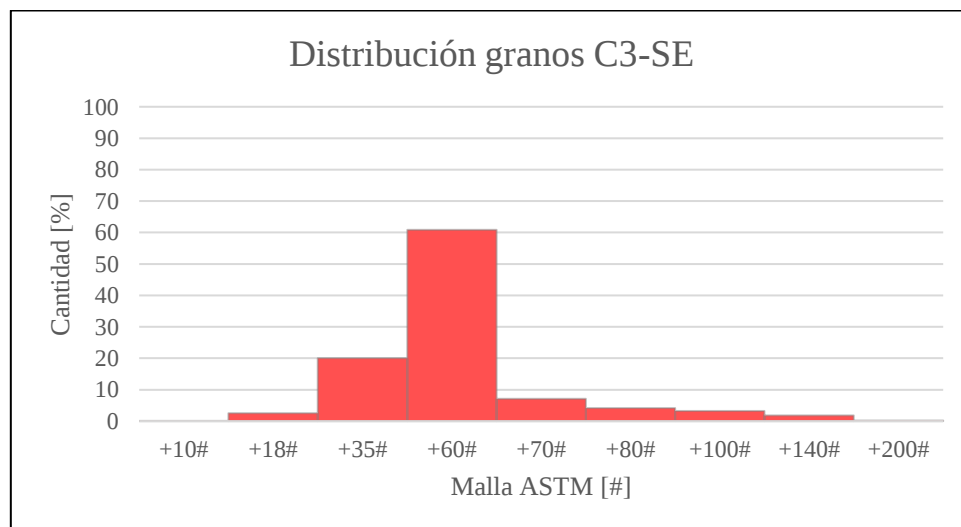
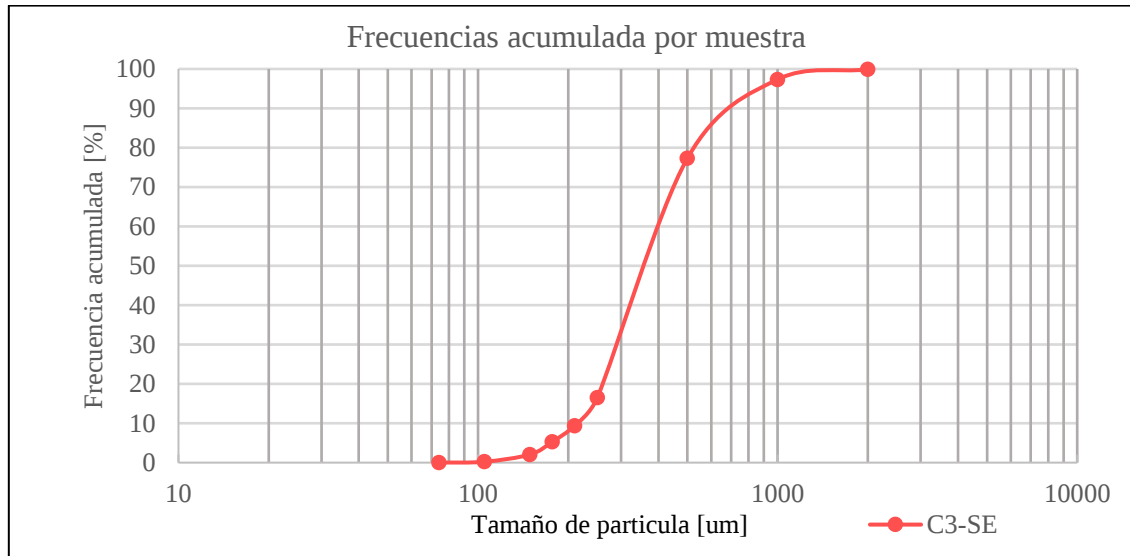
C1-SS				
Malla ASTM	Tamaño, μm	Retenido, grs	Retenido, %	Pasante, %
+10#	2000	0.00	0.00	100.00
+18#	1000	6.86	0.49	99.51
+35#	500	221.92	15.90	83.60
+60#	250	930.36	66.68	16.93
+70#	210	101.24	7.26	9.67
+80#	177	57.09	4.09	5.58
+100#	149	45.12	3.23	2.35
+140#	105	30.62	2.19	0.15
+200#	74	2.13	0.15	0.00
-200#	74	0.00	0.00	
Total		1395.34	100.00	



C2-SS				
Malla ASTM	Tamaño, μm	Retenido, grs	Retenido, %	Pasante, %
+10#	2000	0.23	0.02	99.98
+18#	1000	12.08	0.86	99.12
+35#	500	119.45	8.54	90.58
+60#	250	755.81	54.01	36.58
+70#	210	147.55	10.54	26.03
+80#	177	156.90	11.21	14.82
+100#	149	150.63	10.76	4.06
+140#	105	54.13	3.87	0.19
+200#	74	2.68	0.19	0.00
-200#	74	0.00	0.00	
Total		1399.46	100.00	



C3-SE				
Malla ASTM	Tamaño, μm	Retenido, grs	Retenido, %	Pasante, %
+10#	2000	1.73	0.12	99.88
+18#	1000	35.39	2.54	97.33
+35#	500	278.54	20.00	77.33
+60#	250	847.35	60.85	16.49
+70#	210	98.78	7.09	9.39
+80#	177	57.16	4.10	5.29
+100#	149	45.03	3.23	2.06
+140#	105	25.51	1.83	0.22
+200#	74	3.11	0.22	0.00
-200#	74	0.00	0.00	
Total		1392.60	100.00	



C4-SE				
Malla ASTM	Tamaño [μm]	Retenido, grs	Retenido, %	Pasante, %
+10#	2000	2.82	0.21	99.79
+18#	1000	59.35	4.41	95.38
+35#	500	386.54	28.74	66.64
+60#	250	728.68	54.18	12.45
+70#	210	64.48	4.79	7.66
+80#	177	47.53	3.53	4.13
+100#	149	40.10	2.98	1.14
+140#	105	14.72	1.09	0.05
+200#	74	0.66	0.05	0.00
-200#	74	0.00	0.00	
Total		1344.88	100.00	

