



UNIVERSIDAD
MAYOR

para espíritus emprendedores

Facultad de Ciencias
**ESCUELA DE
GEOLOGÍA**

“DINÁMICA COSTERA INTRA-ANUAL DE LA PLAYA LAGUNA VERDE, REGIÓN DE VALPARAÍSO, MEDIANTE SENSORES REMOTOS Y MORFOMETRÍA DE PLAYA.”

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para optar al Título de Geólogo

ÁLVARO NICOLÁS MILLAMÁN HUENCHUL

Profesor Guía:

Idania Briceño de Urbaneja

Profesor Co-Guía:

Raúl Ugalde Peralta

Integrante de Comisión:

Waldo Pérez Martínez

Santiago, Chile

2021

SOLO USO ACADÉMICO

*“Petu chillkatuken inche
Chillkatufegen, choyugen waria mew, welu
newentu trepen
Amulepe taiñ trekan, kuifike mogen
Feymu ta müley fawpüle, taiñ kuifikecheyem.*

*Ingkakeiñ, taiñ kimün nor mogen, femayaiñ
Witrapaiñ fill püle mapu azkintuiñ
Tamün koila zugu feymu weichatuaiñ,
wirakeiñ.”*

Luanko

Agradecimientos

En primera instancia, mencionar que este trabajo ha sido financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del FONDEF IDeA I+D 2019 – Desafío País Adaptación al Cambio Climático y Desastres Naturales. Código Proyecto ID19110361.

Agradecimiento a los profesores Josep Pardo Pascual y Jesús Palomar Vázquez de la Universidad politécnica de Valencia (UPV) quienes contribuyeron con la extracción automática de las líneas de costa, a los practicantes de Escuela de Geología de la Universidad Mayor por su colaboración en la toma de datos en campo y procesamiento de datos sedimentarios, Catalina Cerda, Nicolás Rodríguez, a los/las asistentes, Natalia Medina, Maximiliano Parrao, Walter Tapia, Roxana Mansilla y al IHC Cantabria que nos ha cedido datos de oleaje y marea de la zona.

A los profesores guías Idania Briceño y Raúl Ugalde, por la dedicación en responder las diversas inquietudes en momentos de dudas, en la entrega de consejos para el desarrollo óptimo de este proyecto y los buenos momentos que se generaron en las diversas campañas de terreno, muchísimas gracias.

A todos los que estuvieron en este proceso desde los inicios y a quienes se fueron sumando durante el proceso que son varios, tales como, el joven Aaron, Braulio, Benja, Beltrán, los chicos del Barco, Sergio, Nacho y una cantidad de gente, que se haría eterna la lista, muchas, pero muchas gracias.

A mis padres por el apoyo incondicional durante el transcurso del tiempo, apoyando las diversas facetas que he desarrollado durante la vida con su granito de arena, agradecimiento eterno.

A toda mi familia que ha estado al tanto de mi desarrollo profesional mandando buenas vibras a distancia, como a su vez a las personas que ya no están, pero que se les recuerda en todo momento, un beso y abrazo al cielo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Estado del Arte	2
1.3.	Justificación del estudio	4
1.4.	Planteamiento del problema	5
1.5.	Hipótesis del proyecto	5
1.6.	Objetivos	5
1.6.1	Objetivo General	5
1.6.2	Objetivos Específicos	6
1.7.	Ubicación y vías de acceso	6
1.8.	Caracterización climática	7
1.8.1.	Sobre la mega sequía en Chile Central y sus efectos en la costa	7
1.9.	Geología y geomorfología de la bahía de Laguna Verde	9
1.9.1	Unidades geomorfológicas	12
1.9.2	Unidades geológicas	14
1.9.2.1.	PZMV. Complejo metamórfico Valparaíso	14
1.9.2.2.	PZMG. Unidad Mirasol	14
1.9.2.3.	Jlv. Unidad Laguna Verde	14
1.9.2.4.	Js. Unidad Sauce	15
1.9.2.5.	Tn. Formación Navidad	15
1.9.2.6.	TQPA. Estratos de Potrero Alto	15
1.9.2.7.	Qa. Depósitos fluvioaluviales	15
1.9.2.8.	Qe. Depósitos litorales y eólicos actuales	15
2.	Metodología	16
2.1.	Trabajos de terreno:	16
2.1.1.	Perfiles de playa	16
2.1.2.	Análisis sedimentológico	18
2.1.3.	Delimitación de línea de costa	21
2.2	Análisis de datos	22
2.2.1.	Extracción de línea de costa con imágenes de satélite	22
2.2.2.	Datos de marea, oleaje y condiciones ambientales	25

3.	Resultados.....	26
3.1.	Trabajos de terreno.....	26
3.1.1.	Perfiles de playa.....	26
3.1.2.	Análisis granulométrico.....	28
3.2.	Trabajos realizados en gabinete.....	37
3.2.1.	Análisis de datos climáticos.....	37
3.2.2.	Análisis de la variación de la línea de costa mediante DSAS.....	40
3.2.3.	Base cartográfica satelital y variabilidad de la línea de costa.....	46
4.	Discusiones.....	52
4.1.1.	Sobre la efectividad de la metodología con sensores remotos.....	52
4.1.2.	Variación de la línea de costa.....	53
4.1.2.	Agentes dinámicos preponderantes en la Playa Laguna Verde.....	55
4.1.3.	Efectos antrópicos en la Playa Laguna Verde.....	55
5.	Conclusiones.....	57
6.	Bibliografía.....	59
7.	Anexo.....	63

SOLO USO ACADÉMICO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio, zona de Chile Central a la latitud de 33°5' Sur. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.	6
Figura 2: Precipitaciones anuales en milímetros desde el año 2015 a 2020, fuente: DGAC. La línea roja corresponde a las precipitaciones anuales y la línea azul corresponde a la regresión polinomial de 4°	8
Figura 3: Periodo de recurrencia en años de eventos de sequía de tres o más años de duración para Chile Central. Modificado de CR2 (2010)	8
Figura 4: Mapa morfo-estructural de los Andes del Sur. Modificado de Charrier et al. (2007).	10
Figura 5: Mapa geológico de la región de estudio. Modificado de Gana et al. (1996). Se mantiene la representación cartográfica según los autores con respecto a la simbología.	11
Figura 6: Rasgos geomorfológicos presentes en la zona de estudio. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.	12
Figura 7: Remoción en masa del tipo deslizamiento traslacional en el fondo y caída en el frente, ubica en la zona norte del área de estudio.	13
Figura 8: Mapa de ubicación de los perfiles de playa bajo metodología Emery. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.	17
Figura 9: Transectos de muestreo en el sector de Laguna Verde. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.	18
Figura 10: Zonas y elementos del perfil de playa, donde se presentan los diversos subambientes.	19
Figura 11: Equipos utilizados en el procesamiento de tamizaje mecánico de las muestras de arena. A) Fotografía de la izquierda muestra las diversas grillas empleadas durante el proceso tamizado, ubicados en el laboratorio de simulación de la Escuela de Geología de la Universidad Mayor, Campus Manuel Montt. B) Fotografía de la derecha presenta el horno empleado para el secado de las diversas muestras, cuyas dimensiones corresponden a 600x550x1700 mm.	20
Figura 12: Equipo topográfico geodésico empleado durante las campañas de terreno. a) Fotografía de la izquierda muestra el GPS diferencial empleado para delimitar la línea de costa durante las campañas de terreno. b) Fotografía de la derecha muestra la colectora de datos que almacena los datos recolectados.	21
Figura 13: Distribución temporal de las imágenes Landsat 8 representados en rombos azules y Sentinel 2 representados en puntos naranjas (Briceño et al., 2021).	22
Figura 14: Diagrama de Flujo para la obtención de líneas de costas a partir de imágenes satelitales Oli Landsat 8 y Sentinel 2 en el software Shorex. Modificado de Palomar-Vásquez et al. (2018).	23
Figura 15: Conjunto de líneas de costas que incluye datos de la Línea Base (negro), Transecto (gris), y las líneas de costa (multicolor) para ilustrar la relación entre las estadísticas de cambio de la línea de costa: Movimiento Neto de la Línea de Costa (MNL), Tasa de Punto Final (TPF) y la Envolvente de Cambio de la Línea de Costa (ECLC).	24
Figura 16: Conjunto de líneas de costas que incluye datos de la línea base (negro), transecto (gris), y las líneas de costa (multicolor) para describir la relación entre los datos de tiempo y espacio en el mapa, y cómo se presenta en forma gráfica como la distancia de la línea de base frente a la fecha de cada línea de costa. La TRL se determina trazando la posición de intersección de la línea de costa con respecto al tiempo y calculando la ecuación de regresión lineal.	25

Figura 17: Perfiles de elevación que muestran los anchos a lo largo de la costa y los ambientes presentes, se destaca una notoria reducción del ancho de la playa representados en los perfiles 1 y 4. Fecha de levantamiento, 26 de enero del 2020.	27
Figura 18: Gráfico de frecuencia del perfil 1, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	29
Figura 19: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 1, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	29
Figura 20: Gráfico de frecuencia del perfil 3, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	32
Figura 21: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 3, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	32
Figura 22: Gráfico de frecuencia del perfil 5, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	35
Figura 23: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 5, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	35
Figura 24: Agentes de transporte predominantes en distintas porciones de la playa Laguna Verde. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.	36
Figura 25: Gráfico que muestra el avance al mar (M) o el retroceso al continente (C) durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, en las diversas estaciones del año entre 2015 al 2020. La línea media corresponde a la altura de la ola y la línea inferior corresponde al nivel del mar en metros. Fuente: Universidad de Cantabria, España.	38
Figura 26: Serie de presión atmosférica superficial en hectopascales en el eje de las ordenadas durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, que comprende desde el año 2015 hasta 2020 en el eje de las abscisas. Fuente: DGAC.	38
Figura 27: Variación de la temperatura ambiental promedio en grados Celsius en el eje de las ordenadas durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, que comprende desde el año 2015 hasta 2020 en el eje de las abscisas. Fuente: DGAC.	39
Figura 28: Variación de la precipitación en milímetros que ha caído en la zona de estudio en el eje de las ordenadas durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, que comprende desde el año 2015 hasta 2020 en el eje de las abscisas. Fuente: DGAC.	39
Figura 29: Las figuras muestran la ECLC en la playa de Laguna Verde, obtenidas a partir del software Shorex y DGPS. a) La imagen superior muestra las distancias que ha experimentado la línea de costa durante los años 2015 a 2020, imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2. b) La imagen inferior muestra en un trazo rectilíneo la variación de la línea de costa en los últimos cinco años.	41
Figura 30: Las figuras muestran el MNLC en la playa de Laguna Verde, obtenidas a partir del software Shorex y DGPS. a) La imagen superior muestra el desplazamiento que ha experimentado la línea de costa más reciente con la más reciente durante los años 2015 a 2020 en metros, imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2. b) La imagen inferior muestra en un trazo rectilíneo la variación de la línea de costa en metros con respecto a la línea base en los últimos cinco años.	42
Figura 31: Las figuras muestran la TPF en la playa de Laguna Verde, obtenidas a partir del software Shorex y DGPS. a) La imagen superior muestra las tasas de avance o retroceso que ha experimentado la línea de costa durante los años 2015 a 2020, imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2. b) La imagen inferior muestra en un trazo rectilíneo la variación de la línea de costa en metros/año con respecto a la línea base en los últimos cinco años.	43

Figura 32: Modelo de regresión lineal, que relaciona la distancia de la línea de costa con respecto a la línea base en el eje de las ordenadas y el periodo que comprende desde el año 2015 a 2019 en el eje de las abscisas.	44
Figura 33: Modelo de regresión polinómica de 4°, que relaciona la distancia de la línea de costa con respecto a la línea base en el eje de las ordenadas y el periodo que comprende desde el año 2015 a 2019 en el eje de las abscisas.	45
Figura 34: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2015. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.	47
Figura 35: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2016. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.	48
Figura 36: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2017. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.	49
Figura 37: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2018. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.	50
Figura 38: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2019. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.	51
Figura 39: Gráfico de frecuencia del perfil 2, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	63
Figura 40: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 2, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	63
Figura 41: Gráfico de frecuencia del perfil 4, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	64
Figura 42: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 4, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de campañas de terreno realizadas durante el año 2020. Comprende desde el mes de enero hasta mediados de septiembre de dicho año.	16
Tabla 2: Número de grilla con su respectivo número de apertura.	19
Tabla 3:Tabla resumen de las imágenes satelitales obtenidas por los diferentes años.....	46
Tabla 4:Tabla comparativa sobre las ventajas y desventajas que presentan las imágenes satelitales contra las imágenes aéreas.	52
Tabla 5: Tabla de precipitaciones mensuales en milímetros durante el año 2020, fuente: DGAC. ..	54
Tabla 6: Tabla de precipitación promedio mensual en milímetros desde el 2015 hasta 2020, fuente: DGAC.....	56

SOLO USO ACADÉMICO

1. Introducción

1.1. Introducción

La zona costera es un ambiente de transición entre un ambiente continental y uno marino, donde interactúan procesos geológicos, geomorfológicos, oceánicos, climáticos, bióticos, entre otros (Davis & Duncan, 2004; Kale & Acarli, 2019; Mentaschi et al., 2018; Mishra et al., 2019). Actualmente, las costas arenosas han experimentado retroceso, mostrando una pérdida aproximada de 28000 km² a nivel mundial (Mentaschi et al., 2018). La erosión costera se ha identificado en el 80% de las playas en la región de Chile central, en el cual se destacan las playas de Algarrobo y Santo Domingo con presencia de erosión (Winckler et al., 2019). En esta zona, se desarrollan diversas actividades que ocasionan una gran variedad de impactos, los cuales se perciben a corto, mediano o largo plazo (Short & Jackson, 2013).

Los cambios en las costas arenosas son promovidos por factores naturales y antrópicos (Mishra et al., 2019). Se clasifican en escalas temporales de corto, mediano y largo plazo. Los cambios a corto plazo se evidencian en las zonas más activas de la playa, siendo el viento y el oleaje los agentes dominantes. Se destacan los cambios cíclicos determinados por las temporadas de invierno-verano, donde las tormentas y las marejadas tienen un gran impacto, debido a que afectan los balances sedimentarios y la morfología de las playas (Short & Jackson, 2013). A mediano plazo, los cambios a escala espacial se miden en kilómetros y a escala temporal de varios años (Sánchez-Arcilla & Jiménez, 1994). Los agentes principales son el oleaje y el aporte sedimentario de los cauces, sean ríos o esteros. Este dominio puede quedar definido por las celdas sedimentarias litorales (Short & Jackson, 2013). A largo plazo, los cambios en las costas están definidos en ámbitos costeros regionales más amplios y, en algunos casos, tenderán a fenómenos de escala global, afectados por el cambio climático. Los agentes que producen los procesos varían desde el aporte de sedimentos por parte de ríos hasta las variaciones del nivel del mar debido de la marea (Sánchez & Jiménez, 1994).

Las variaciones cíclicas de la costa se han implementado nuevas metodologías, a fin de cuantificar de manera más precisa estas fluctuaciones. Entre ellas destaca el uso de sensores remotos, que permite obtener un monitoreo constante de la bahía (Acciarri et al., 2016). En el caso nacional, estas herramientas han experimentado un importante aumento en la aplicación en el último tiempo (Briceño et al., 2021), el cual otorga una mayor precisión en comparación a las metodologías empleadas a fines del siglo XX, dado que entregaba información con sobrestimación sobre la variación de la línea de costa (Martínez & Salinas, 2009).

El presente trabajo pretende estudiar la dinámica costera de la playa de Laguna Verde, ubicada en la Región de Valparaíso, Chile Central, con el uso de sensores remotos y estudios de campo. Así, se busca comprender su variabilidad en el periodo de cinco años.

1.2. Estado del Arte

Wright & Short (1984), establecen al menos tres tipos de estados, en relación con su estado energía. El de menor energía se denomina estado reflectivo. En caso contrario, se denomina estado disipativo que representa el estado de mayor energía, con la presencia de varios estados intermedios (Sánchez-Arcilla & Jiménez, 1994; Wright & Short, 1984). Sánchez-Arcilla & Jiménez (1994) exponen las diferentes características que presentan las costas arenosas y sus problemas asociados, además explican los diversos modelos predictivos que son empleados para establecer un punto de referencia ante las variaciones en el tiempo. Adicionalmente explican las diversas limitantes que presentan cada uno de los modelos al ejecutarlos.

Boak & Turner (2005) explican los métodos para poder detectar la línea de costas con sensores remotos, imágenes hiperespectrales, fotografías aéreas, fotografías históricas y sistemas de posicionamiento global (GPS).

Los sensores remotos se han utilizado como una importante herramienta en la adquisición de información (Kale & Acarli, 2019; Mentaschi et al., 2018), presentan acervos de información desde 1972 y están disponibles en los portales de varias agencias espaciales importantes entre ellas servicio geológico de Estados Unidos (USGS), y la Agencia espacial europea (ESA)(Vos et al., 2019). Existe una diversidad de escalas espaciales y temporales con las que se estudian las costas, desde técnicas fotogramétricas hasta técnicas de precisión centimétricas como es el uso de VANT (vehículo aéreo no tripulado)(Talavera et al., 2018).

Los sensores remotos se han utilizado por diferentes autores para estimar la variación de la línea de costa, comprender cuales son los factores que afectan y controlan dicha variación. Esta herramienta tiene un ventaja por sobre las técnicas convencionales de mapeo de la costa (Acciarri et al., 2016; Ataol et al., 2019; Kale & Acarli, 2019; Mentaschi et al., 2018; Mishra et al., 2019; Qiao et al., 2018)

Ojeda et al. (2009) emplean una metodología desarrollada por el Servicio geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey o USGS por sus siglas en inglés) que cuantifica la sensibilidad de las costas de Andalucía frente a la erosión. Para ello los autores emplean las siguientes variables que influyen en la dinámica costera: geomorfología, tasa de erosión, pendiente, altura del oleaje, cambio relativo del mar, rango mareal medio. En base a esta metodología logran denotar las posibles zonas afectadas por el aumento del nivel base en las costas de Andalucía. Posteriormente Abuodha & Woodroffe (2010) replican el estudio en las costas de Australia e incorporan 3 variables adicionales a la metodología planteada anteriormente, que son el tipo de roca, tipo de barrera y la exposición de la costa. Los resultados demuestran que la incorporación de las variables mencionadas calibra y precisa de mejor forma las zonas, con una mayor probabilidad de sufrir erosión.

La implementación de sensores remotos y los sistemas de información geográfica (SIG), proporcionan nuevas técnicas y tecnologías en las investigaciones de monitoreo de costas (Kale & Acarli, 2019; Ojeda & Cabrera, 2006).

Lea (2018) menciona el avance de tecnologías basadas en preceptos de *Big Data* cuyo ejemplo es Google Earth Engine (GEE), esta plataforma tiene un gran potencial dado que no necesita de equipos de alto costo para hacer procesos de imágenes, solamente requiere acceso a internet.

Los patrones sedimentarios en las costas, permiten caracterizar los tamaños de grano de las arenas y visualizar las variaciones de facies presentes en la costa (Cabezas et al., 2017; Fernández et al., 2004). Los estudios del tamaño de grano de los sedimentos de las playas proporcionan una gran cantidad de información sobre las propiedades intrínsecas de los sedimentos y su entorno depositacional (Rajganapathi et al., 2013). Además, ayudan a profundizar en la naturaleza y el flujo de energía de los múltiples agentes que transportan los sedimentos.

Harley et al. (2019) realizan un monitoreo de las costas de Australia con imágenes fotográficas de teléfonos inteligentes que cuentan con un nivel de precisión aceptable. Esta nueva metodología presenta algunas ventajas, por ejemplo, su bajo costo y la participación de la comunidad o turistas de la zona con el aporte de imágenes a la base de datos a través de redes sociales o correo electrónico. Los resultados afirman que esta metodología es capaz de monitorear costas desde 100 m a 1 km de extensión, logrando relevar las variaciones que presenta antes y después de un evento climático extremo.

Phillips et al. (2019) analizan el comportamiento de la playa después de la ocurrencia de tormentas en las costas de Australia, donde estima un tiempo aproximado de 2 a 3 meses para la recuperación total de la playa después de una tormenta e identifica al menos 4 modos de recuperación de la berma durante este periodo, destacando la progradación como el mecanismo más recurrente.

En Chile, el estudio de las playas ha sido de interés para Araya-Vergara (Araya-Vergara, 1982; 1971; 1983; 2003) el cual ha caracterizado los distintos factores que influyen en las costas chilenas y cómo la geomorfología controla la sedimentología en las costas arenosas.

La composición de las arenas de varias playas en la Región de Valparaíso, están compuestas por un 90% de material terrígeno y un 10% de material biogénico, y la fuente principal de las arenas corresponde a las rocas del basamento cristalino costero (Thornburg, 1985; Valenzuela et al., 1979).

Araya-Vergara (1986) describe la geometría de los perfiles de acreción, erosión y mixtos por medio de observaciones realizadas en campañas de terreno, donde señala que los perfiles de acreción son formados por elementos convexos – cóncavos. En cambio, los perfiles erosivos presentan elementos cóncavos y los perfiles mixtos son formados por ambos, tanto por elementos convexos-cóncavos y elementos cóncavos.

Martínez (2007), que implementa un modelo de espiral logarítmico, basado en el propuesto por (Sánchez-Arcilla & Jiménez, 1994), en las bahías de Concón y Algarrobo. Esto con el fin de establecer un nivel de referencia para cuantificar las variaciones espacio-temporales en las costas para las series históricas analizadas. Martínez & Cortez (2007) realizan estudios en el estuario del Río Aconcagua, en donde establecen que este ambiente presenta al menos dos energías principales que controlan el ambiente: la costa y el río. La afirmación se basa tanto en análisis granulométricos como en la implementación de sensores remotos para observar su variación durante el tiempo (Martínez & Cortez, 2008).

Figuroa (2008) menciona la importancia económica, demográfica y turística de la zona costera y las repercusiones que presentan estas actividades a este ambiente. En base a dicha problemática, propone la implementación de una ley de costas que proteja los humedales y la administración de

áreas marinas y costeras protegidas. Incluso la actualización del plan regulador de la región, que data de 1990.

Martínez & Salinas (2009) analizan la variación espacio-temporal en la playa de Tunquén durante 50 años y concluyen que existe una fuerte estabilidad en la línea litoral. Esto se explica porque la metodología empleada solo enfatiza en analizar la variación en periodo estival, omitiendo el periodo invernal.

Rojas et al. (2015) realizan estudios en diversos humedales en las cercanías de Concepción, donde evalúan como la urbanización afecta dichos cuerpos de agua en base a tres indicadores, la naturalidad que es un indicador que mide la perturbación e intervención del humedal, la riqueza de macropelidópteros y la diversidad de plantas. Los autores demuestran que los humedales con una menor perturbación por acción antrópica son aquellas que se ubican en zonas protegidas o reservas naturales. En caso contrario a los humedales, que se encuentran cercanos a centros urbanos o carreteras.

Martínez et al. (2018) investigan sobre la relación que existe entre los eventos climáticos extremos y la erosión de las costas, e incluye el fenómeno del ENSO (El Niño - Oscilación del Sur), que afecta la recurrencia de estos fenómenos climáticos. En base a los antecedentes expuestos por los autores, se afirma que la recurrencia de estos eventos ha aumentado de 5 eventos por año en la década de 1960 hasta 20 eventos en la actualidad y posiblemente sería el principal factor de erosión que afecta a las costas chilenas. Además, la presencia del fenómeno ENSO en su fase cálida o El Niño, generaría un aumento relativo del mar en aproximadamente 30 cm con respecto a un año normal.

1.3. Justificación del estudio

La erosión de las costas es el resultado de varios factores naturales y antrópicos que interactúan en este entorno. Se destaca el cambio climático como el factor que provoca el aumento del nivel base y por ende la erosión de las costas, al igual de factores locales de la región como el bajo aporte de sedimento de los cursos fluviales, agentes erosivos y la antropización (Ionian Adriatic, 2015; Martínez et al., 2018; Mishra et al., 2019; Rojas et al., 2015). Estudios más recientes, destacan que la erosión de las costas corresponden a eventos climáticos extremos, debido al aumento en la frecuencia de marejadas y la intensidad con que afecta a las costas si los eventos coinciden con la fase cálida de la oscilación climática El Niño oscilación Sur ENSO (Martínez et al., 2018).

Actualmente en Chile no existe un monitoreo continuo de la línea costera, replicar los estudios existentes implican grandes inversiones en tiempo, equipos y desplazamientos. Con esta investigación, el uso de imágenes satelitales de resolución media Landsat 8 y Sentinel 2 constituyen un gran aporte a los estudios en entornos marino-costeros.

1.4. Planteamiento del problema

Dado que las playas corresponden a depósitos no consolidados recientes en la escala de tiempo geológico (Pleistoceno – Holoceno), representan una mayor susceptibilidad a modificaciones por agentes erosivos como el oleaje, viento, eventos extremos, entre otros, en comparación a las costas rocosas presentes en las ensenadas o acantilados (Abuodha & Woodroffe, 2010).

La dinámica costera en territorio nacional ha estado encabezada por dos posturas últimamente. Por una parte, se afirma que el retroceso de las bahías ha experimentado una alta tasa de retroceso durante los últimos años, estimada en cientos de metros (Araya Vergara, 1982). Por otro lado, se estima que las bahías presentan un equilibrio o estabilidad durante los últimos 50 años, con variaciones relativamente pequeñas a escala métrica (Martínez, 2007; Martínez et al., 2018; Martínez & Cortez, 2007; Martínez & Salinas, 2009).

Martínez et al. (2018) plantea que la erosión que presenta las costas en la zona central del país, están afectadas principalmente por una mayor ocurrencia de fenómenos climáticos extremos y los efectos que presenta la configuración tectónica actual del margen occidental del continente. Los autores destacan un aumento significativo de estos eventos climáticos extremos, resaltando la recurrencia de 5 eventos en la década de los 60' a más de 20 en los últimos años. Además, señalan que las fases cálidas del ENSO provocan un aumento del nivel base del mar de hasta 30 cm, efecto similar a las diversas estimaciones mundiales para fines del presente siglo (Ojeda et al., 2009; Qiao et al., 2018).

La erosión costera es una amenaza que afecta de manera directamente las playas arenosas, las infraestructuras que sobre ella se emplazan y las actividades económicas en estas áreas. Los cambios que se evidencian en corto plazo, son impulsados por los fenómenos climáticos extremos como es el caso de las marejadas, los cuales corresponden al factor erosivo de mayor jerarquía en las costas chilenas (Martínez et al., 2018). El presente estudio pretende analizar la variación de la línea de costa de la playa Laguna Verde con imágenes satelitales, datos en campo y patrones sedimentarios.

1.5. Hipótesis del proyecto

A partir de la información contenida en los sensores remotos OLI Landsat 8 y Sentinel-2, se estimará la erosión en los últimos cinco años en la playa de Laguna Verde, Región de Valparaíso.

1.6. Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Determinar la dinámica costera intra-anual de la playa Laguna Verde en la Región de Valparaíso para los últimos cinco años mediante sensores remotos y perfiles de playa.

1.6.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la morfología de la playa en las distintas estaciones del año 2020.
2. Identificar la granulometría de las arenas y sus variaciones a lo largo de la playa.
3. Determinar el tipo de transporte del sedimento en cada periodo.
4. Releva la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos en los últimos 5 años.
5. Determinar las tasas de retroceso y avance de la línea de costa.
6. Comparar la variación de la playa en el tiempo con la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos.

1.7. Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se ubica en la localidad de Laguna Verde, ubicada en la latitud 33°5' S y longitud 71°40' O (en coordenadas geográficas WGS 84), aproximadamente 20 km al sur de la ciudad de Valparaíso, Región de Valparaíso (Figura 1). Se sitúa en la zona litoral y está inmersa en el dominio morfoestructural de la Cordillera de la Costa, la que se enmarca en el cuadrángulo 1:100.000 de la Carta Geológica de Valparaíso y Curacaví de Gana et al. (1996).

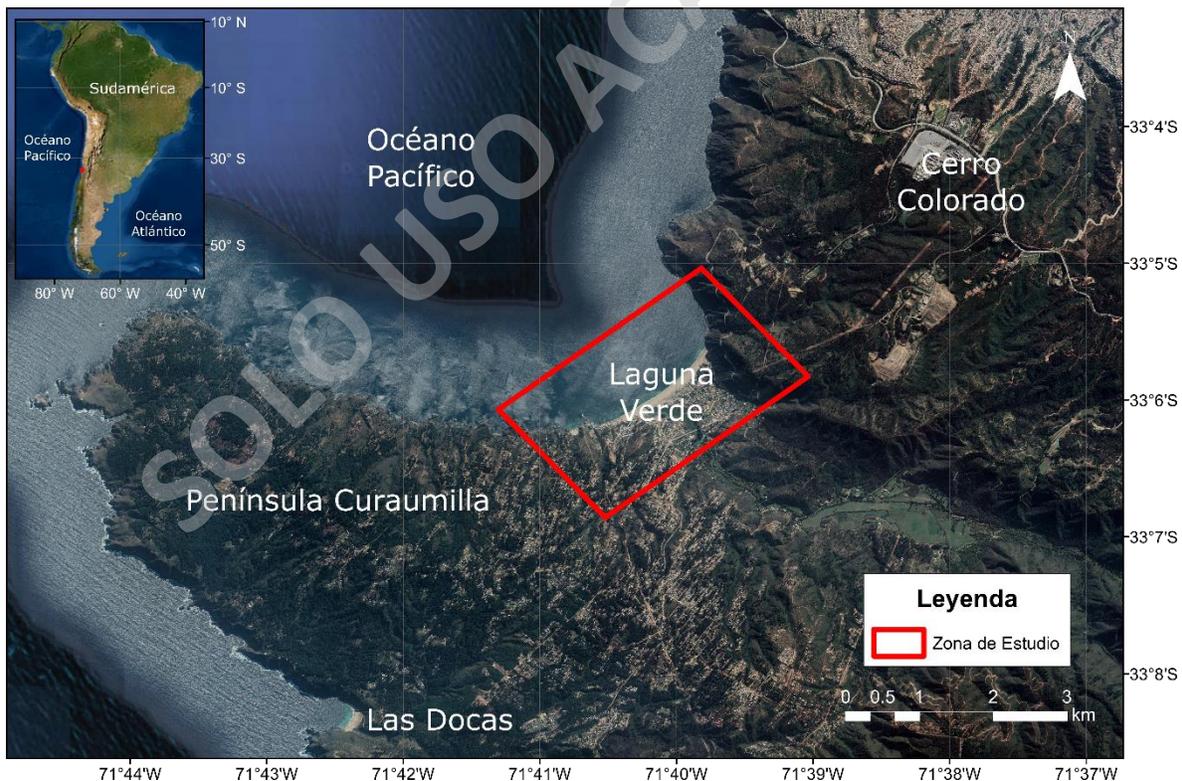


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio, zona de Chile Central a la latitud de 33°5' Sur. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.

1.8. Caracterización climática

Las costas de Chile central se encuentran en un régimen de olas que está influenciado por el Anticiclón del Pacífico Sur, que genera vientos dominantes S-SW durante el año. Estas condiciones se intensifican durante el periodo invernal dado que el Anticiclón del Pacífico se desplaza hacia el norte, provocando fuertes tormentas durante dicho periodo (Martínez et al., 2018). Además, esta área se encuentra afectada por el impacto continuo del oleaje generado a distancia desde el SW-WSW (Araya Vergara, 1971; Martínez, 2007).

La región presenta un clima mediterráneo, que se caracteriza por un régimen estacional de precipitaciones y temperaturas, con una estación invernal fría y húmeda, y un periodo estival cálido y seco. La zona de estudio se enmarca en el bioclima costero que se caracteriza por temperaturas moderadas, con un promedio anual de 14.5°C y precipitaciones relativamente altas para la región continental, con valores medios de 458 mm (Luebert & Pliscoff, 2012).

La bahía de Laguna Verde tiene una extensión aproximada de 1500 m en una dirección NNE y anchos variables desde 30 a 140 m. Además, cuenta con la desembocadura del estero El Sauce, el cual aporta sedimento en la parte central de la playa (Valenzuela et al., 1979). Asimismo, en la zona se encuentra un campo de dunas costeras con una extensión aproximada de 50 m, la cual presenta intervención antrópica.

1.8.1. Sobre la mega sequía en Chile Central y sus efectos en la costa

Para el caso de la Playa Laguna Verde, el periodo de estudio coincide con al menos tres eventos ENSO, cuyo pico se desarrolló durante el periodo 2015/2016 denominado El Niño Godzilla (Garreaud, 2018). Este evento no produjo precipitaciones en la región de Chile Central, caso opuesto al norte del país donde se produjeron tormentas importantes (CR2, 2010).

Estudios de Sarricolea & Meseguer (2016) muestran que la región Metropolitana y de Valparaíso han enfrentado un nivel de sequía generalizada durante la última década, debido al aumento en la temporalidad entre rachas de precipitaciones, especialmente en las zonas cercanas a la costa (Figura 46). La Tabla 6 muestra un periodo seco de 6 a 9 meses en el año y un periodo lluvioso acotado al menos a 3 meses. Se aprecia una reducción en las precipitaciones a partir del año 2015 hasta la actualidad, con una reducción al menos del 20% con respecto al 2015 (Figura 2).

Por otra parte, el CR2 (2010) destaca que en su mayoría, los periodos de sequía están relacionados a alteraciones climáticas de origen naturales, sin embargo los autores añaden que la alteración climática de origen antrópica ha generado un cuarto del déficit histórico y que aumentara con el transcurso del tiempo (Figura 3). En relación a lo expuestos por los autores, se proyecta que a mediados del presente siglo el déficit hídrico será igual o peor que en la actualidad. Las proyecciones para la zona de estudio (Figura 2), actualmente presenta un comportamiento cíclico con una alta variabilidad, que se puede modelar en una regresión polinómica de 4° con una tendencia a la baja en el tiempo.

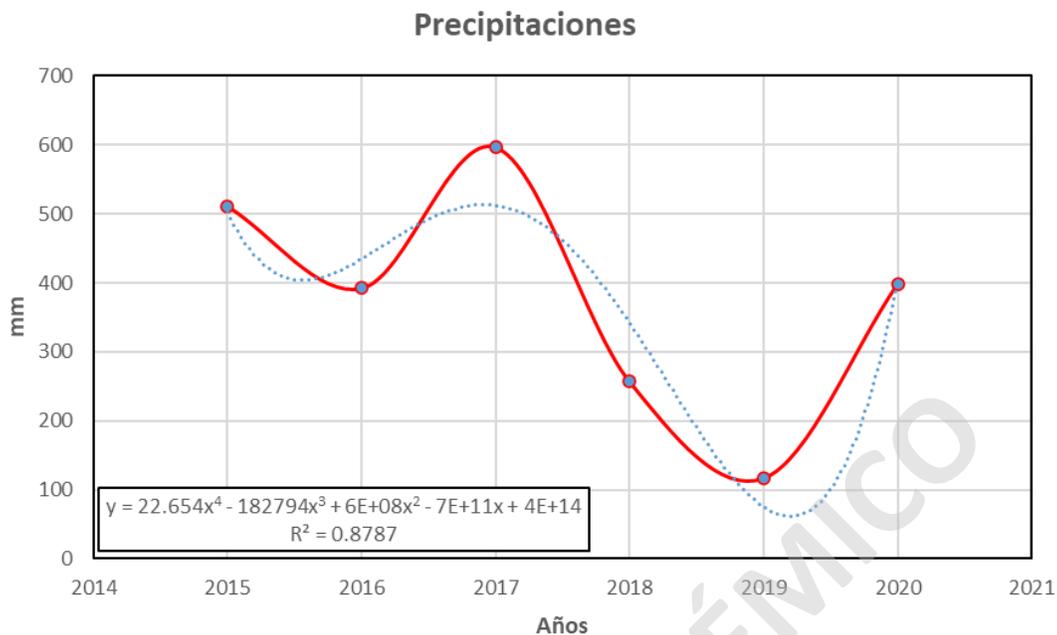


Figura 2: Precipitaciones anuales en milímetros desde el año 2015 a 2020, fuente: DGAC. La línea roja corresponde a las precipitaciones anuales y la línea azul corresponde a la regresión polinomial de 4°.

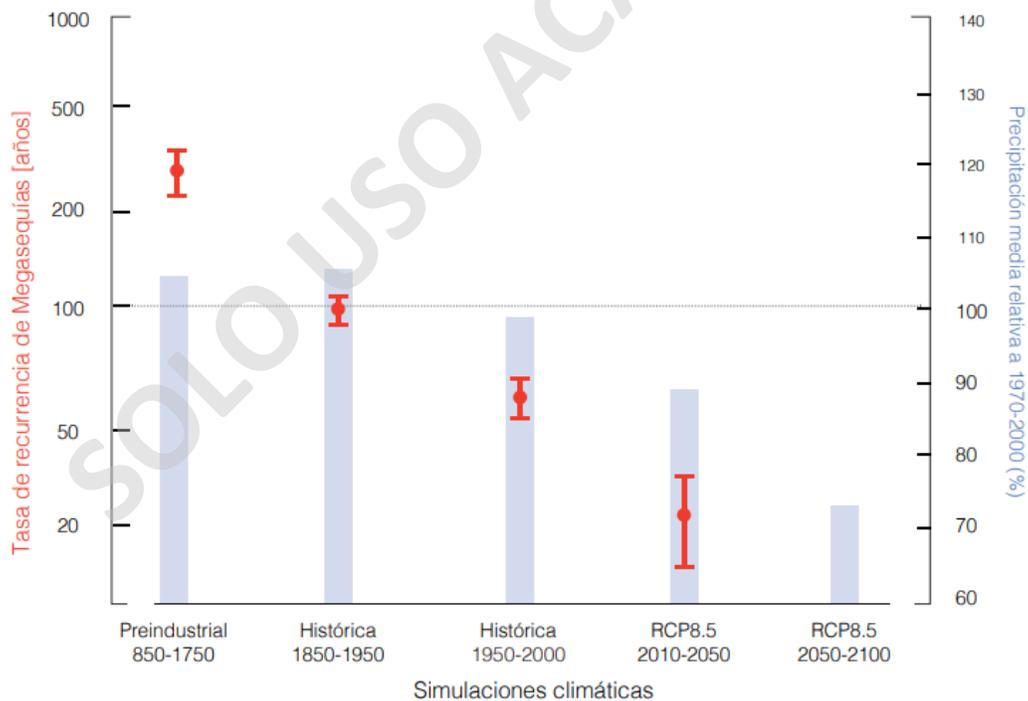


Figura 3: Periodo de recurrencia en años de eventos de sequía de tres o más años de duración para Chile Central. Modificado de CR2 (2010)

1.9. Geología y geomorfología de la bahía de Laguna Verde

Las costas chilenas son el resultado de eventos geológicos de escala regional, que se han desarrollado desde el Paleozoico hasta la actualidad (Charrier et al, 2007). La configuración actual del margen occidental de Chile corresponde a procesos de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, que se desarrolló desde el Mesozoico hasta el presente, en un proceso conocido como el Ciclo Andino (Charrier et al, 2007)

A la latitud de los 33°S de la Región de Valparaíso, los Andes Centrales están conformados por al menos tres dominios morfoestructurales mayores, los que se ubican de oeste a este y se denominan como la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal (Charrier et al., 2007) (Figura 4).

La región de estudio se ubica en el dominio de la Cordillera de la Costa, con orientación general NNE-SSO y caracterizado por varios niveles de terrazas de abrasión marina del Mioceno y un borde costero afectado por tectónica de solevantamiento (Díaz & Frutos, 2010; Gana et al., 1996).

Esta zona (Figura 5) se caracteriza por afloramientos del basamento cristalino y metamórfico, que varían en edad desde el Paleozoico Superior hasta el Jurásico Superior (Gana et al., 1996). Estas rocas se encuentran afectadas por numerosas fallas y se disponen de manera erosiva bajo la cobertura cenozoica sub-horizontal a levemente inclinada, localmente deformada (Gana et al., 1996).

En general, las rocas estratificadas del Cenozoico corresponden a rocas sedimentarias continentales y marinas, asociadas a la unidad Estratos de Potrero Alto y Formación Navidad (Gana et al., 1996) que se encuentran en pequeña porción sobre las riberas del Estero El Sauce. Por otra parte, las otras unidades cenozoicas corresponden a depósitos del Pleistoceno-Holoceno que se ubican en bajo topográficos o valles presentes en la zona y que cubren en discordancia erosiva a las rocas pre-cenozoicas (Gana et al., 1996).

El sistema estructural presente en el dominio corresponde al del tipo bloques, limitado por fallas de dirección NO y NE, con desplazamiento vertical de edad relativa post-pliocena. Estas fallas se han superpuesto a un movimiento de rumbo con rotación de bloques que, en parte, afectan a las unidades cretácicas de la Cordillera de la Costa (Gana et al., 1996).

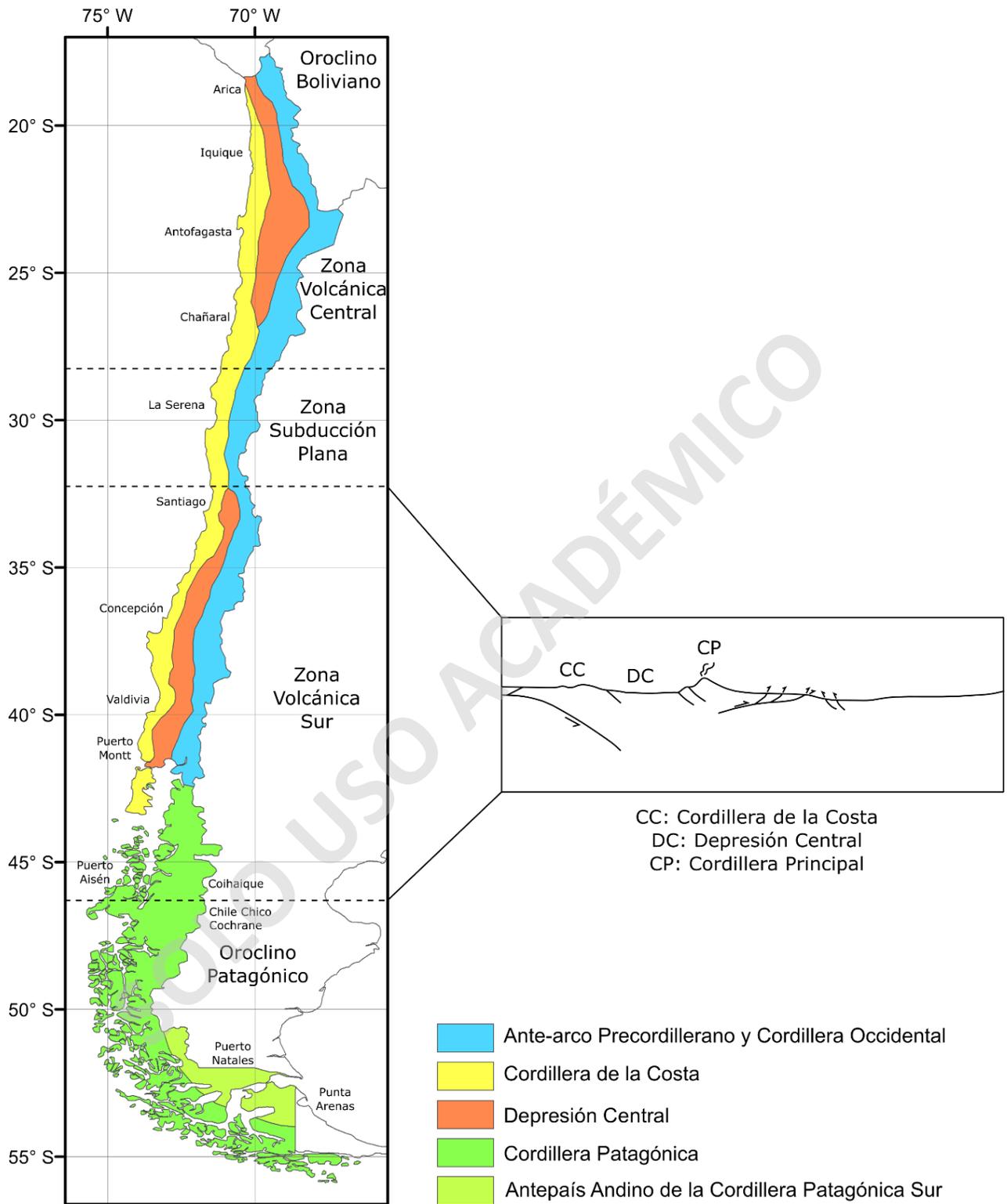


Figura 4: Mapa morfo-estructural de los Andes del Sur. Modificado de Charrier et al. (2007).

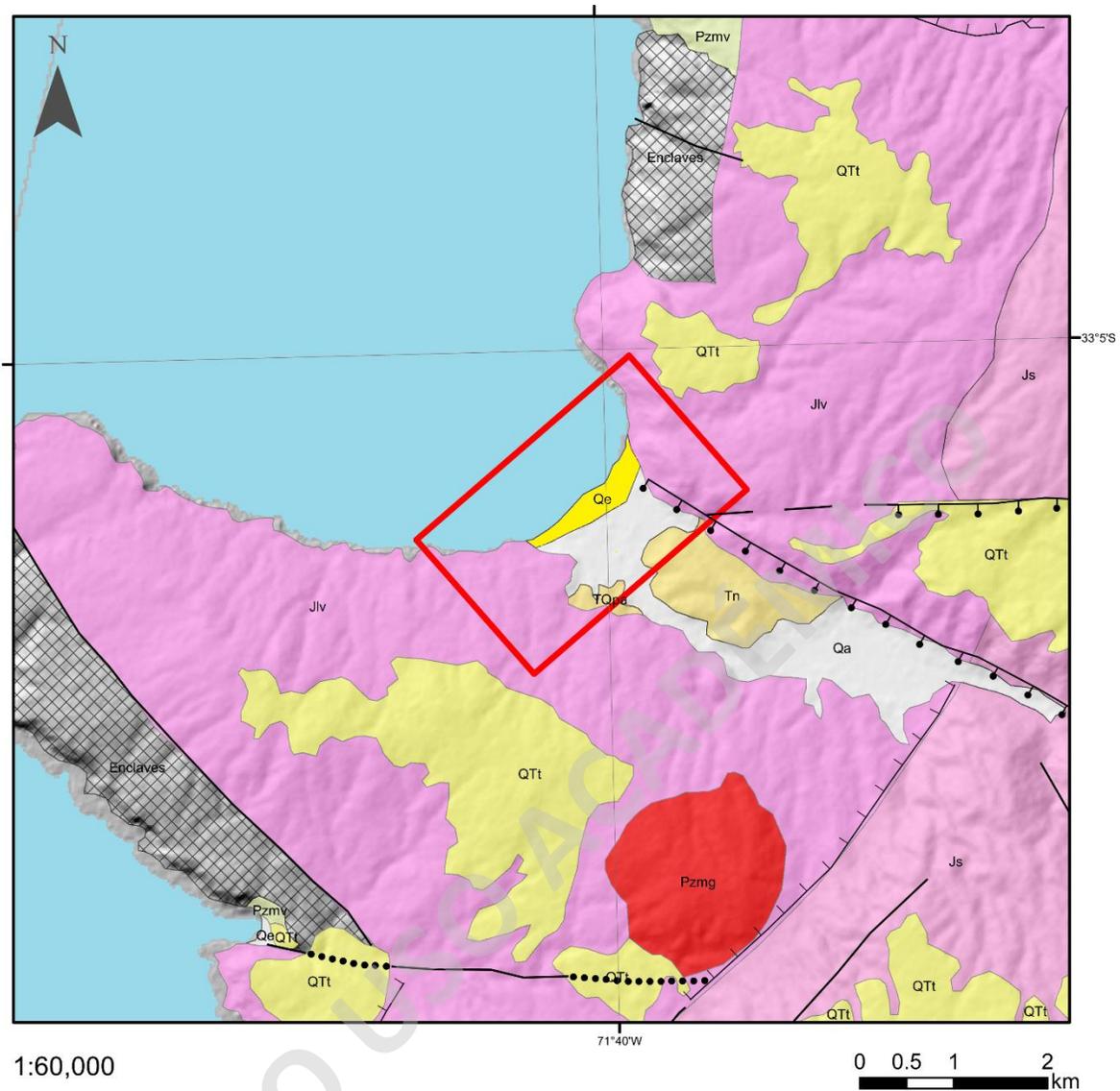


Figura 5: Mapa geológico de la región de estudio. Modificado de Gana et al. (1996). Se mantiene la representación cartográfica según los autores con respecto a la simbología.

1.9.1 Unidades geomorfológicas

El área de estudio corresponde a una playa arenosa situada en una topografía irregular, limitada por puntas rocosas en sus extremos, destacando la punta sur denominada Península Curaumilla.

Los rasgos morfológicos fotointerpretados que se destacan en la zona de estudio corresponden al menos a 6 aspectos (Figura 6), donde dichos rasgos se encuentran ubicados en la quebrada principal en que se emplaza la localidad de Laguna Verde, las cuales son delimitadas por los diversos cuerpos rocosos presentes en la región.

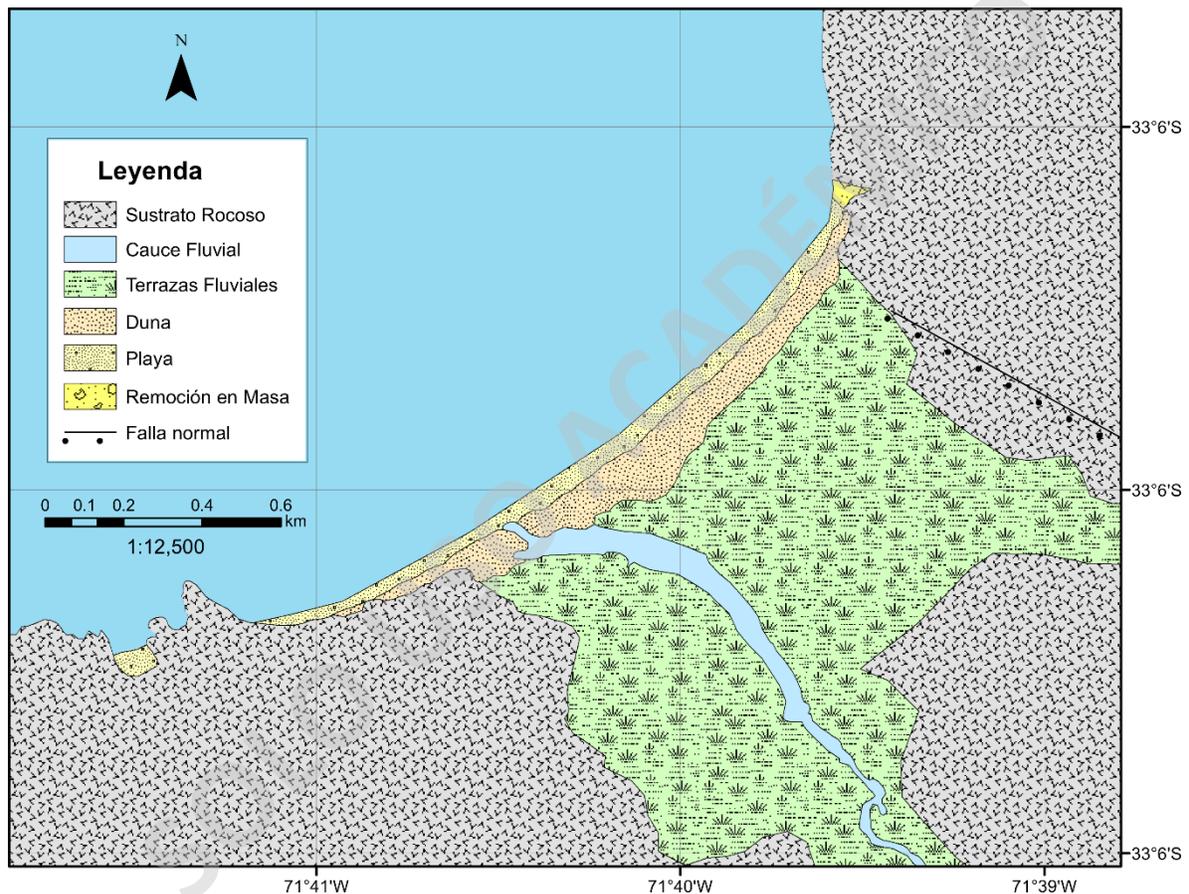


Figura 6: Rasgos geomorfológicos presentes en la zona de estudio. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.

Playa arenosa: Corresponde al sector de rompiente de ola en que se presenta el mayor transporte de sedimento, debido a los diversos agentes que interactúan en este ambiente. Presenta una extensión aproximada de 1500 m y un ancho que varía durante las diversas estaciones del año.

Cauce fluvial: Cuerpo fluvial meándrico que incide en la quebrada y que presenta un ancho variable que va desde los 20 a 30 m aguas arriba, con un aumento progresivo a medida que se aproxima a la costa, con un ancho de 80 a 90 m. Este curso fluvial no presenta una conexión permanente durante el año con el Océano Pacífico, denotando una interrupción de la duna durante periodos estivales que produce una barrera litoral continua. En caso contrario, durante el periodo invernal el cauce se conecta con el océano.

Remoción en masa: Corresponde a una remoción en masa del tipo deslizamiento traslacional y de caída (Figura 7), que se ubica en el extremo norte de la playa, la cual aporta material sedimentario a la costa y presenta un área aproximada de 650 m².

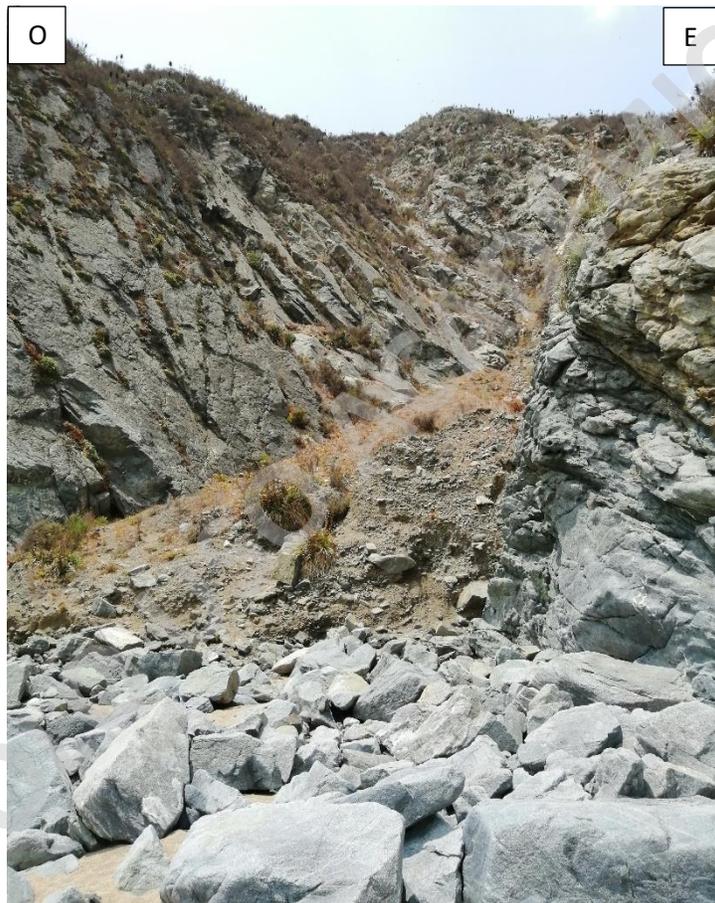


Figura 7: Remoción en masa del tipo deslizamiento traslacional en el fondo y caída en el frente, ubica en la zona norte del área de estudio.

Campo de dunas costaneras: Elemento que presenta un ancho acotado entre la zona de playa y el nivel aterrazado, la cual es interrumpida por el cauce fluvial en periodos invernales. Las dunas presentes corresponden a dunas transversales y presentan estabilidad debido a la presencia de vegetación que se emplaza en esta.

Sustrato rocoso indiferenciado: Corresponde a toda unidad de roca consolidada o cuerpo ígneo que se presenta en la zona. Las rocas presentes en la zona corresponden a la Formación Navidad, Estratos de Potrero Alto y la Unidad Laguna Verde.

En la zona de estudio se presenta además una estructura geológica que corresponde a una falla normal, de orientación NO-SE, denominada Falla de Laguna Verde (Keller & Martin, 2000), la cual afecta a la Unidad Laguna Verde y que yuxtapone rocas de edad jurásica con rocas cenozoicas.

1.9.2 Unidades geológicas

En la siguiente sección se describen las principales unidades geológicas presentes en la zona de estudio según su edad, desde base a techo, a partir del trabajo de Gana et al. (1996) (Figura 5).

1.9.2.1. PZMV. Complejo metamórfico Valparaíso (Paleozoico Superior) (Gana et al., 1996)

Rocas metamórficas foliadas, de protolito principalmente plutónico y, en menor proporción, sedimentario. Afloran como enclaves de longitud inferior a 2 km, dentro de los complejos intrusivos de la zona costera. Intruidas por granitoides paleozoicos, con los que presenta en parte contacto gradual, y gabros jurásicos en Caleta Las Docas, al este de Valparaíso. Incluye ortogneises graníticos y tonalíticos de biotita y migmatitas, conteniendo ocasionalmente: porfiroblastos de microclina y granate; hornblenda, actinolita, augita y mica blanca subordinada; intercalaciones de esquistos anfibólicos, cloríticos, escasos lentes paragenésicos con corderita-sillimanita-granate y esquistos sericíticos.

1.9.2.2. PZMG. Unidad Mirasol (Paleozoico Superior) (Gana et al., 1994)

Corresponde a un plutón compuesto de 36 km de elongación noroeste, expuesto en la localidad de Mirasol, extendiéndose desde Caleta Barco hacia el sur. Este cuerpo ígneo se compone de tonalitas y granodioritas y monzogranitos de anfíbola-biotita, sienogranitos y granitos de microclina, los cuales presentan contactos gradacionales entre sí. Son rocas de grano grueso a medio, color gris medio verdoso, con inclusiones dioríticas a dioríticas cuarcíferas, dispuestas paralelas a la foliación magmática de la roca albergante. Están intruidos por diques básicos foliados y por plutones del Jurásico, con formación de zonas de enclaves magmáticos. además, a las rocas se le sobre impone microclinización tardimagmática en forma de parches y vetillas, acompañadas de epidota y actinolita, lo que contribuye al aspecto porfídico de estas rocas.

1.9.2.3. Jlv. Unidad Laguna Verde (Jurásico) (Gana et al., 1994)

Complejo ígneo-metamórfico que intruye a las rocas metamórficas paleozoicas. Está compuesto por anfibolitas, ortoanfibolitas, gneises anfibólicos, dioritas y monzodioritas foliadas y gabros. Son rocas de color gris oscuro a medio, de grano medio a fino, con frecuente foliación magmática y en parte dinámica, tanto gnéisica como milonítica. Las texturas presentes varían desde granoblástica

poligonal hasta inequigranular seriada, formada principalmente por hornblenda y plagioclasa subredondeada paralelamente.

1.9.2.4. Js. Unidad Sauce (Jurásico) (Gana et al., 1994)

Plutón complejo de composición básica a intermedia, compuesto por dioritas cuarcíferas de piroxeno-hornblenda-biotita, con tonalitas de hornblenda-biotita y gabros subordinados, que en ciertos afloramientos se presentan en forma de bandas alternadas de 1-3 m de espesor. Son rocas de color gris oscuro a medio, con grano medio a fino, exponiendo texturas inequigranular seriada e intergranular, en parte foliada, de origen magmático y también tectónico.

1.9.2.5. Tn. Formación Navidad (Mioceno – Plioceno) (Darwin, 1846 en Gana et al., 1996)

Secuencia sedimentaria marina fosilífera, que se dispone de manera subhorizontal y con una potencia estimada de 500 m. Medianamente consolidada, constituida por limolitas, areniscas arcillosas, areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos de conglomerados y areniscas grises muy finas. Esta unidad se sobreyace en discordancia erosiva a granitoides paleozoicos y triásicos-jurásicos y, a su vez, está cubierta por depósitos eólicos, aluviales y suelos cuaternarios.

1.9.2.6. TQPA. Estratos de Potrero Alto (¿Mioceno? – Plioceno-Pleistoceno?) (Wall et al., 1996)

Depósitos sedimentarios medianamente a bien consolidados de conglomerados, areniscas, limolitas, arcillolitas con restos mal preservados, limolitas grises y niveles de diatomitas, limolitas verdosas con trazas fósiles, con una potencia estimada de 140 m, que se dispone de manera subhorizontal. Contiene facies predominantemente continentales, aluviales, interdigitadas con facies lacustres en el sector de Pangui Rosa y facies transicionales hacia el oeste, que engranan y cubren de manera parcial, a los estratos marinos superiores de la Formación Navidad (Gana et al., 1996).

1.9.2.7. Qa. Depósitos fluvioaluviales (Holoceno)

Sedimentos no consolidados, compuestos por gravas, arenas y limos. Comprenden principalmente depósitos fluvioaluviales con depósitos gravitacionales interdigitados, tales como flujos de barro y flujos de detritos.

1.9.2.8. Qe. Depósitos litorales y eólicos actuales (Holoceno)

Sedimentos no consolidados, compuestos de arenas y gravas bien redondeados, con estratificación plano-paralela predominante y estratificaciones cruzadas planares de bajo ángulo. Incluye laminas arenosas conformadas por concentración de minerales pesados. Presentan dunas activas, compuestas por arenas amarillas de buena selección, con estratificación cruzada planar y ondulitas superficiales. La presencia de dunas transversales sugieren una dirección del viento predominante en sentido NNE.

2. Metodología

En el presente acápite se presentan los diversos métodos empleados para el desarrollo del proyecto y los materiales utilizados en cada una de las actividades. Las metodologías son descritas en dos ramas principales, los trabajos realizados en salidas a terreno y en gabinete.

2.1. Trabajos de terreno:

Se realizaron 12 salidas a terreno (Tabla 1). Estas fechas corresponden a los días de revisita de los satélites OLI Landsat 8 o Sentinel 2, que pasan por la zona de estudio.

Tabla 1: Resumen de campañas de terreno realizadas durante el año 2020. Comprende desde el mes de enero hasta mediados de septiembre de dicho año.

SALIDAS DE TERRENO	
17-01-2020	18-02-2020
20-01-2020	27-02-2020
26-01-2020	05-03-2020
27-01-2020	14-03-2020
02-02-2020	13-09-2020
11-02-2020	22-09-2020

2.1.1. Perfiles de playa

Para la generación de los diversos perfiles de playa se definieron cuatro transectos transversales a la costa (Figura 8), bajo las características geomorfológicas presentes en ellos, donde se empleó una adaptación del método Emery (1959) que consiste en medir la elevación a lo largo de un transecto de manera ortogonal a la costa. Además, es posible obtener una cantidad de n perfiles por medio de un Modelo de Elevación Digital (MED) de la cobertura de la playa desde un VANT con una resolución espacial de entre 2 a 3 cm. Mediante el uso del software ArcMap es posible realizar la extracción de los perfiles de elevación.

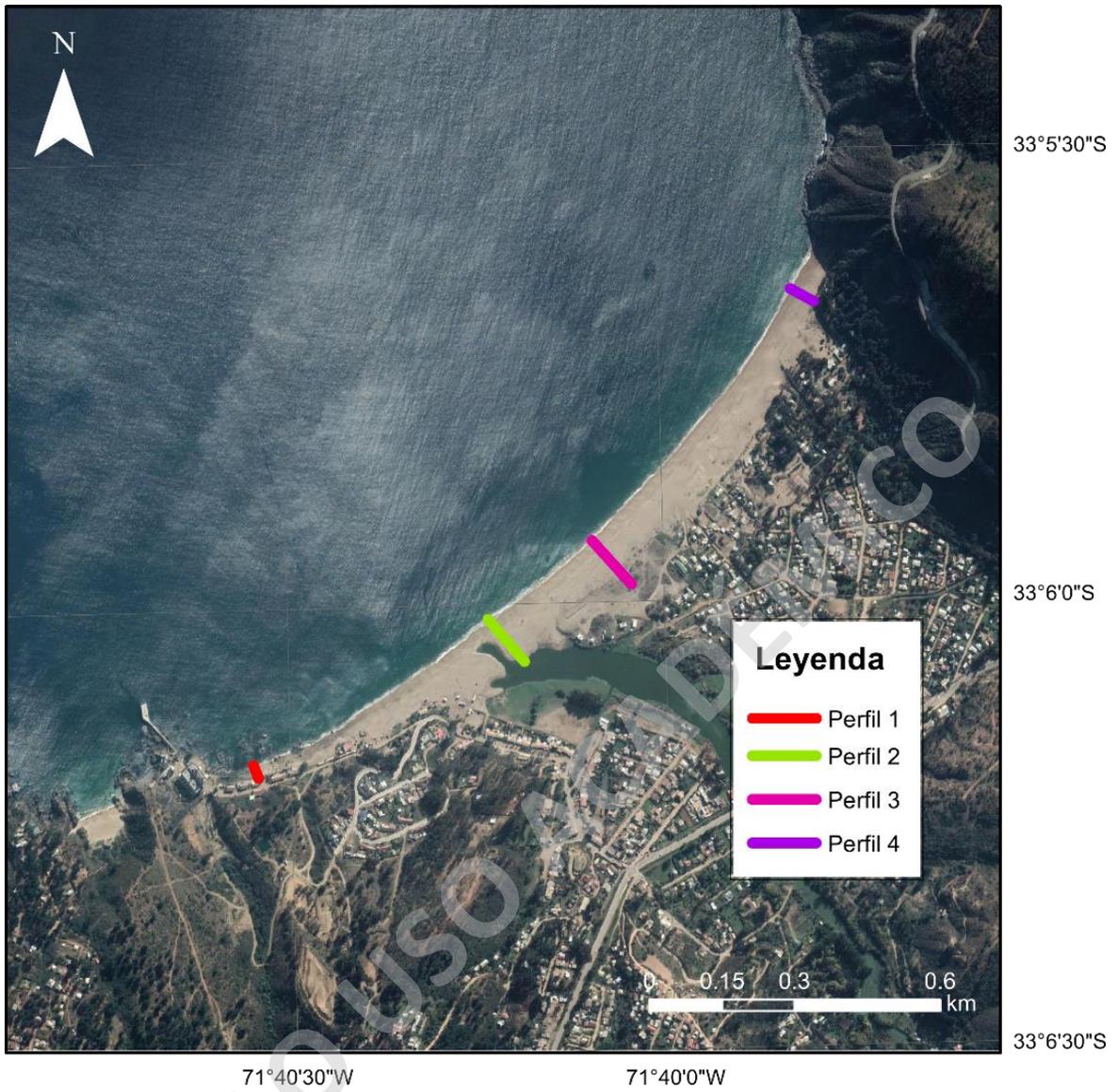


Figura 8: Mapa de ubicación de los perfiles de playa bajo metodología Emery. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.

2.1.2. Análisis sedimentológico

Se realizó 5 perfiles transversales a la costa (Figura 9), y en estos se recolectó las muestras de arena en los tres subambientes de la playa (Figura 10). El análisis sedimentológico consta de la recolección de muestras de arenas en 15 puntos a lo largo de la costa, los cuales están distribuidos en cada uno de los distintos perfiles (Figura 9).



Figura 9: Transectos de muestreo en el sector de Laguna Verde. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.

La extracción de sedimento (Figura 10) fue realizada en tres puntos en cada perfil, que corresponden al sector de frente de playa (*Shoreface*), trasplaya (*Backshore*) y en la zona de médano (*Dune*). Esta labor constó de la extracción de al menos 200 g de sedimento, a una profundidad aproximada de 7 cm de la superficie, una nomenclatura de muestras usada correspondiente a: AA/MM/DD; n° perfil; n° muestra; iniciales de la playa. AA refiere al año, MM al mes, DD al día. La muestra 1 corresponde al sector de base del médano (continente), la muestra 2 corresponde a la trasplaya (zona litoral) y la muestra 3 al anteplaya (zona subacuosa).

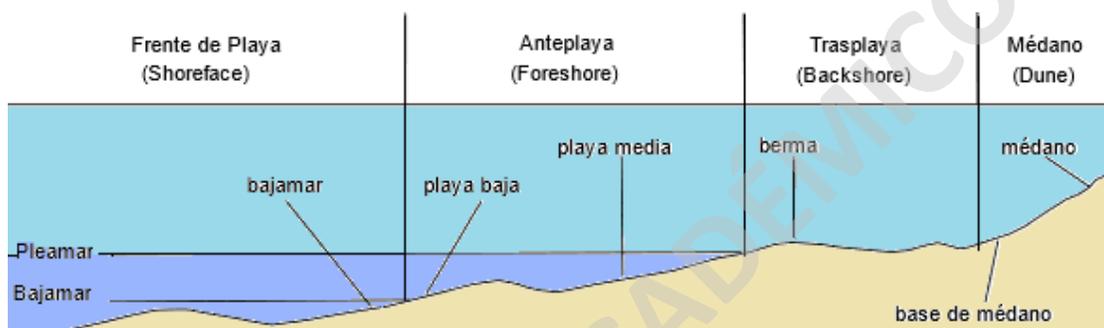


Figura 10: Zonas y elementos del perfil de playa, donde se presentan los diversos subambientes.

El secado de las muestras se realizó a 90° C por 3 días, en un horno de secado Biobase modelo BOV-V429F (Figura 11), ubicado en las dependencias de la Universidad Mayor, Campus Huechuraba, en el Laboratorio del Centro de Investigación Hémera.

Para el tamizado, se realizó el cuarteo o división en cuartiles, posterior pesado de un cuartil de manera aleatoria y tamizado en diversas grillas Gilson (Tabla 2).

Tabla 2: Número de grilla con su respectivo número de apertura.

N°	Apertura
10	2 mm
18	1 mm
35	500 µm
60	250 µm
120	125 µm
230	63 µm

Estos tamices (Figura 11) son incorporados a un agitador de tamices de la compañía W.S. TYLER y modelo Ro TAP, ubicado en la escuela de geología de la Universidad Mayor, Campus Manuel Montt.

El cual se programa en intervalos de 5 minutos por muestra. Después de cada procedimiento se extrae de cada tamiz la porción granulométrica obtenida, que se pesa y registra en una planilla Excel con su respectiva etiqueta. Luego, los pesos finales son sumados y comparados con el peso inicial de la muestra, a fin de estimar la pérdida de material durante el procedimiento, que se asocia a la pérdida de sedimento entre las rendijas de cada tamiz.



Figura 11: Equipos utilizados en el procesamiento de tamizaje mecánico de las muestras de arena. A) Fotografía de la izquierda muestra las diversas grillas empleadas durante el proceso tamizado, ubicados en el laboratorio de simulación de la Escuela de Geología de la Universidad Mayor, Campus Manuel Montt. B) Fotografía de la derecha presenta el horno empleado para el secado de las diversas muestras, cuyas dimensiones corresponden a 600x550x1700 mm.

Con la macro de Microsoft Excel Gradistat generada por (Blott & Pye, 2001) se obtiene la estadística descriptiva de las muestras, con los principales parámetros caracterizadores: media, moda, desviación estándar, oblicuidad, curtosis, D_{10} , D_{50} , D_{90} , D_{90}/D_{10} , $D_{90}-D_{10}$, D_e/D_{25} y $D_{75}-D_{25}$. Además, los parámetros de tamaño de grano son calculados de manera aritmética (en micrones) y logarítmica (Escala Φ).

2.1.3. Delimitación de línea de costa

Esta metodología consiste en la medición de la línea de costa con el uso de un GPS Diferencial o DGPS, el cual presenta un error asociado centimétrico. Se empleó el equipo Navcom SF-3500 con conexión vía bluetooth a la consola portátil Nautiz X7 (Figura 12), que registra la información recolectada. Esta acción se realiza en dirección sur a norte, de un extremo a otro, considerando el criterio de la Línea de Alta Mar (LAM) (Boak & Turner, 2005), donde se establece el sistema de coordenadas y el datum WGS-84. La configuración para el almacenaje de los puntos es mediante un registro automático con intervalo de 15 segundos y cuyo resultado es un conjunto de puntos, los cuales son importados posteriormente en formato *shapefile* al ordenador para su posterior procesamiento. Esta labor tiene al menos tres finalidades:

- Delimitar la línea de costa con DGPS a través del criterio LAM.
- Tomar puntos de control para rectificar y/o georreferenciar las imágenes obtenidas por el VANT.
- Determinar la línea base el cual delimita el límite agua-tierra empleado por el software *Shorex* para la extracción automática de las diversas líneas de costas en imágenes satelitales.



Figura 12: Equipo topográfico geodésico empleado durante las campañas de terreno. a) Fotografía de la izquierda muestra el GPS diferencial empleado para delimitar la línea de costa durante las campañas de terreno. b) Fotografía de la derecha muestra la colectora de datos que almacena los datos recolectados.

2.2 Análisis de datos

2.2.1. Extracción de línea de costa con imágenes de satélite

Se utilizaron 128 imágenes de satélite para el análisis de la variabilidad cíclica de la posición de la línea de costa, 46 Landsat 8 y 82 Sentinel 2 (Figura 13). En este estudio se emplearon las bandas SWIR1 1,57-1,65 μm y 1,56-1,65 μm de Landsat 8 OLI y Sentinel 2 respectivamente, ya que estas permiten la separación de tierra-agua.

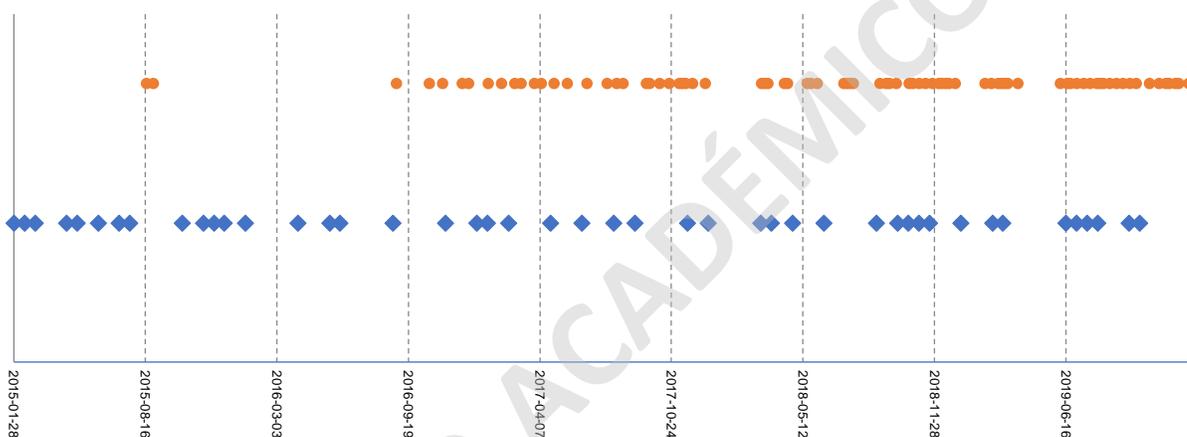


Figura 13: Distribución temporal de las imágenes Landsat 8 representados en rombos azules y Sentinel 2 representados en puntos naranjas (Briceño et al., 2021).

La extracción de líneas de costa mediante imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 se realizó por medio del software SHOREX (*Shoreline Extraction*, Figura 14) desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España, el cual presenta al menos 3 pasos previos, que se presentan a continuación:

Descarga: Esta labor es posible por medio de las plataformas AWS S3 (Amazon S3) tanto para las imágenes Landsat 8 y Sentinel-2, en el cual se aprovecha la estructura de la plataforma para genera una herramienta basada en lenguaje Python, que facilita la descarga selectiva y masiva de las imágenes disponibles.

Pre-procesamiento: Corresponden a una serie de operaciones para transformar y adaptar cada una de las bandas en cada subproceso antes de llegar a la fase de extracción. En general y según el tipo de sensor remoto, estos subprocesos corresponden en formato y transformación de valores, recorte, filtrado de nubes y georreferenciación, los cuales se describen en detalle.

Procesamiento: El primer paso consiste en proporcionar al algoritmo una línea aproximada inicial donde cada pixel sea considerado como candidato a línea de costa. En el caso de no disponer de

una línea aproximada inicial, SHOREX permite obtener una a partir de una herramienta semiautomática que utiliza técnicas de segmentación y morfología para obtener dos máscaras, una línea de costa aproximada y la interfaz tierra-agua. Por el contrario, si se dispone de una línea inicial, estas máscaras se obtienen de manera automática.

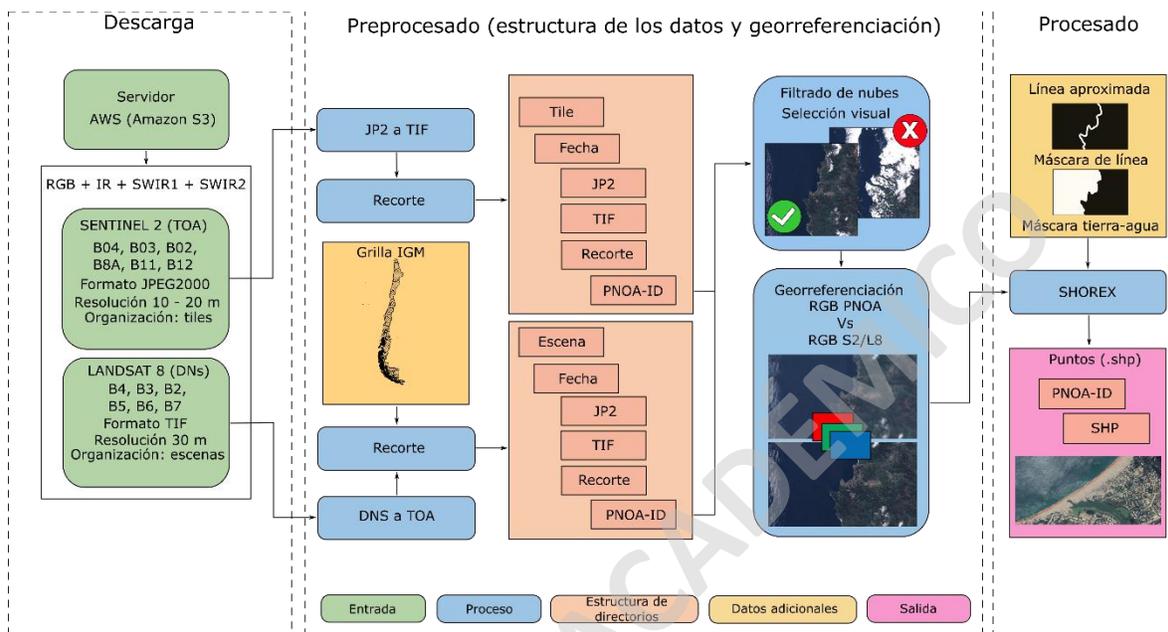


Figura 14: Diagrama de Flujo para la obtención de líneas de costas a partir de imágenes satelitales Oli Landsat 8 y Sentinel 2 en el software Shorex. Modificado de Palomar-Vásquez et al. (2018).

Uso del software DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*)

Corresponde un *software* desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), denominado *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), como una extensión de código abierto para el *software* ESRI ArcMap 10, que fue desarrollado para medir, calcular y analizar estadísticamente los cambios de la línea de costa en el tiempo. Para la ejecución del programa es necesario realizar diversos pasos previos para estimar los cambios en la costa, como la creación de una línea de tendencia o una línea de costa generalizada, una línea de base en altamar y la generación de transectos equidistantes a lo largo de la costa, que se extiendan tierra adentro desde la línea de base en altamar. Una vez realizados los pasos previos, se procede a la obtención de los parámetros estadísticos de los datos obtenidos, cuyo propósito es cuantificar la variación que ha experimentado la costa en un tiempo determinado. Para ello se emplean las siguientes herramientas:

Movimiento Neto de la Línea De Costa (MNL): corresponde a la distancia entre la línea de costa más antigua con la más reciente para cada transecto y cuya unidad de medida es distancia en metros (Figura 15).

Envolvente de Cambio de la Línea De Costa (ECLC): representa la mayor distancia entre todas las líneas de costas que cruzan por un transecto determinado (Figura 15).

Tasa de regresión lineal (TRL)

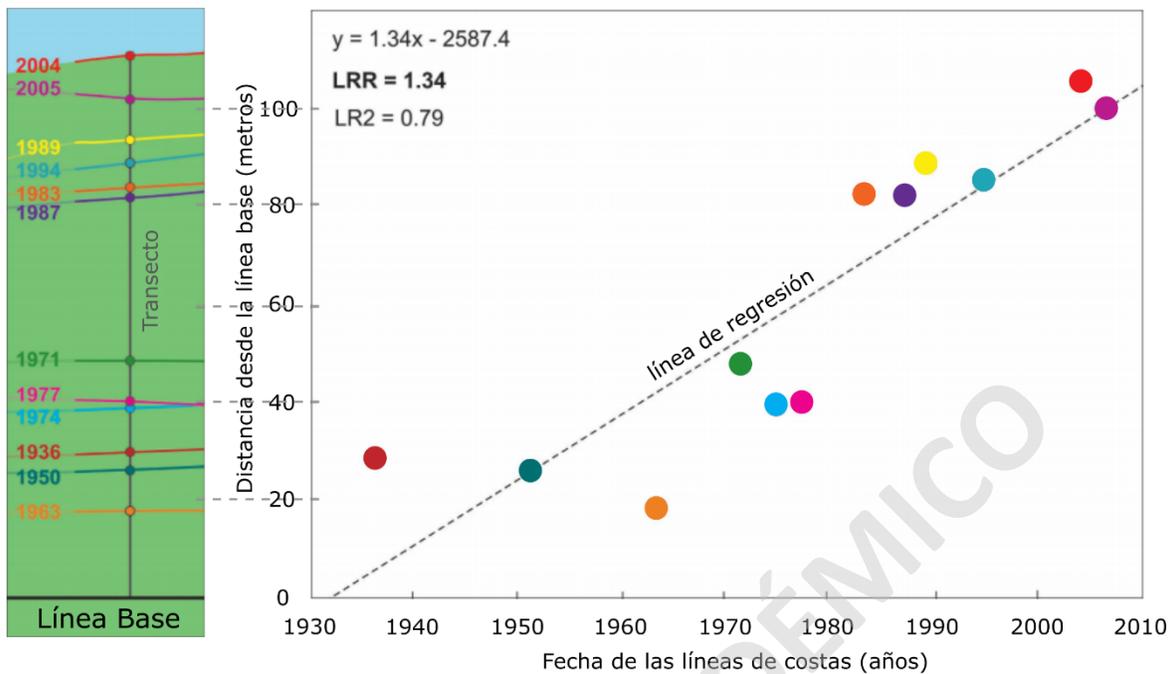


Figura 16: Conjunto de líneas de costas que incluye datos de la línea base (negro), transecto (gris), y las líneas de costa (multicolor) para describir la relación entre los datos de tiempo y espacio en el mapa, y cómo se presenta en forma gráfica como la distancia de la línea de base frente a la fecha de cada línea de costa. La TRL se determina trazando la posición de intersección de la línea de costa con respecto al tiempo y calculando la ecuación de regresión lineal.

2.2.2. Datos de marea, oleaje y condiciones ambientales

Los datos oceanográficos, altura del oleaje, periodo del oleaje y dirección fueron calculadas según el forzamiento y suministrada para este trabajo por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHC), para los años de 2015 a 2020. Los datos oceanográficos se recopilaron en los periodos de revisita y hora de captura de imagen de los satélites Landsat 8 (11hr UTC) y Sentinel 2 (15hr UTC).

La obtención de los datos climáticos se realiza por medio de la Dirección General de Aeronáutica Civil, específicamente de la Dirección Meteorología de Chile y cuyo contenido se compone de la temperatura ambiente, presión atmosférica y precipitaciones. Este compilado conlleva a un análisis estadístico de la variación anual para cada parámetro, con el objetivo de comprender el comportamiento las variables durante las diversas estaciones del año y su tendencia durante el último periodo. Además, es posible determinar la cantidad de eventos climáticos extremos. Para ello emplea el método del Pico sobre el Umbral (Martínez et al., 2018), que consiste en establecer el valor del umbral, el cual corresponde a dos veces la desviación estándar sobre la media aritmética.

3. Resultados

3.1. Trabajos de terreno

3.1.1. Perfiles de playa

Los diversos perfiles de playa corresponden a la variación de la topografía desde un trazo de manera ortogonal a la costa. Estos muestran el ancho de la costa desde la zona de rompiente hasta la base del médano. De los diversos perfiles realizados, se observa una baja extensión en las puntas rocosas, con medidas de 20 m en la zona sur y 35 m en la zona norte, pero con un aumento en la extensión en la zona central de la costa, con valores que varían desde 50 a 80 m (Figura 17).

En el caso de las puntas rocosas, se aprecia un desarrollo menor del perfil de playa, debido a que corresponden a zonas delimitadas por su geomorfología y la intervención antrópica. En el perfil 1 se aprecia una extensión limitada y escaso desarrollo de los diversos ambientes costeros, con un nulo desarrollo del médano. Caso contrario al perfil 3, que se encuentra en las cercanías del Estero El Sauce, donde se observa un mejor desarrollo de los ambientes costeros, con una amplia zona de duna.

En base a los datos expuestos, el médano en la zona de estudio no es continuo a lo largo de la costa, dado que se desarrolla desde el perfil n°2 hasta el perfil n°4, y no en la zona sur, perteneciente al perfil n°1, más cercano a la central termoeléctrica de Laguna Verde. Caso contrario al ambiente de frente de playa y trasplaya, los cuales se desarrollan a lo largo de la costa, pero con un ancho variable.

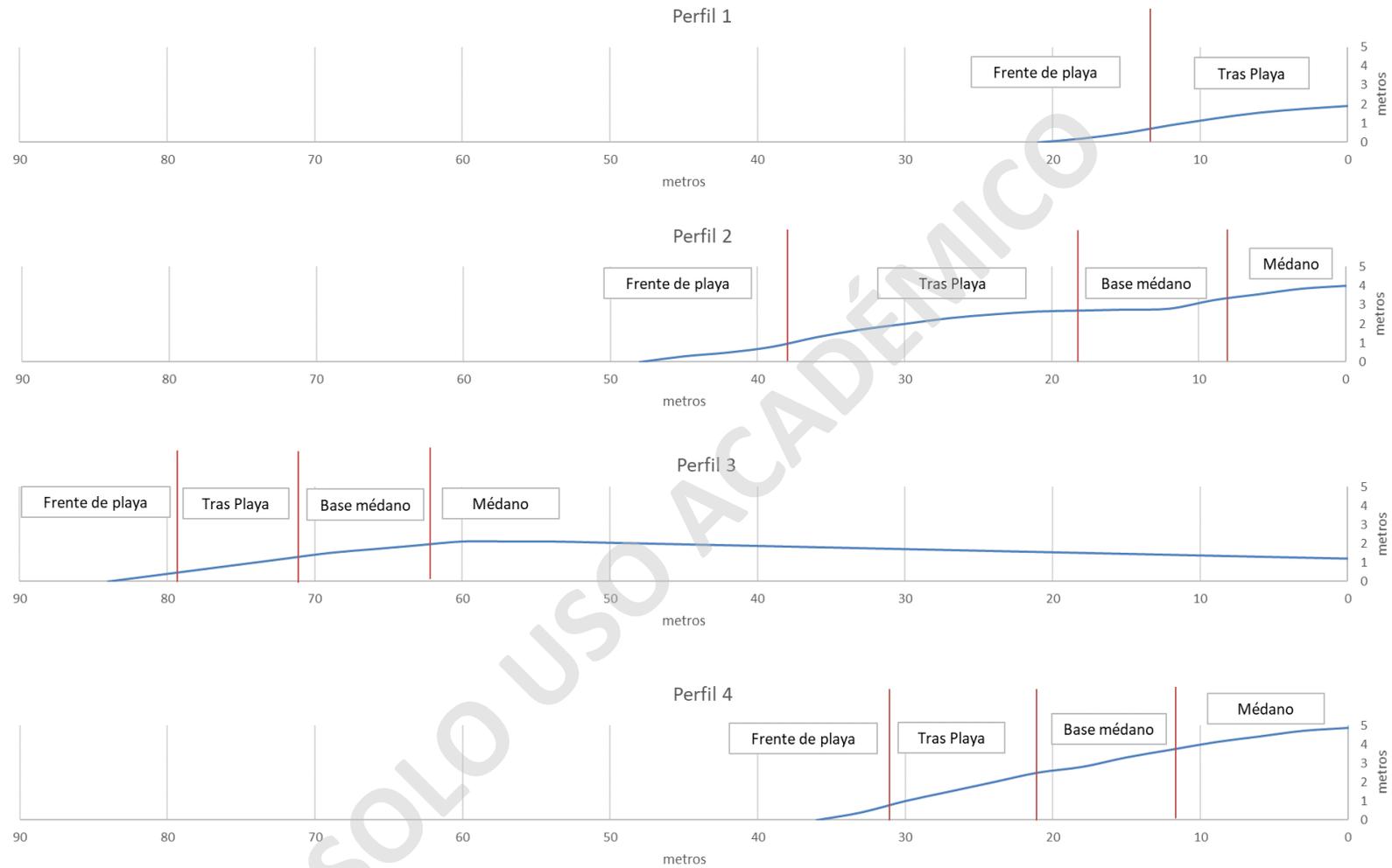


Figura 17: Perfiles de elevación que muestran los anchos a lo largo de la costa y los ambientes presentes, se destaca una notoria reducción del ancho de la playa representados en los perfiles 1 y 4. Fecha de levantamiento, 26 de enero del 2020.

3.1.2. Análisis granulométrico

Se recopilaron un total de 165 muestras de arenas en los tres subambientes de la playa, las cuales fueron tratadas y procesadas en la macro Gradistat v 8.0. Estos resultados fueron agrupados en dos gráficos, que corresponden a un gráfico de frecuencia, el cual refleja los posibles agentes de transporte involucrados, y un gráfico de frecuencia acumulada, el cual representa el mecanismo de transporte de los sedimentos ya sea mediante suspensión, saltación o tracción.

A continuación, se describen las principales características de las muestras de arena, por perfil.

Los gráficos asociados a los perfiles 2 y 4 se encuentran en el apartado de anexo para consulta, dada su menor preponderancia con respecto a los otros datos expuestos.

- Perfil 1, muestra 1

El gráfico de frecuencia (Figura 18) presenta una distribución mesocúrtica y una asimetría neutra con una tendencia a las granulometrías medias a finas, un cambio a distribución mesocúrtica y asimetría negativa a mediados de septiembre, en la cual aumenta la porción gruesa. El agente de transporte predominante (Figura 19) corresponde al viento, mediante el mecanismo de saltación de partículas, con la posible presencia de corrientes de transporte longitudinal y/u oleaje a fines del mes de septiembre, donde aumenta la tracción del sedimento.

- Perfil 1, muestra 2

El Gráfico de frecuencia (Figura 18) presenta una distribución leptocúrtica y asimetría neutra durante el periodo estival, con una afinidad en arenas medias y un cambio a una curva del tipo mesocúrtica, asimetría negativa, con un aumento significativo de la porción gruesa. En base al Gráfico de frecuencia acumulada (Figura 19) se infiere que el agente de transporte predominante es el viento y la marea, con la presencia de un evento de tormenta a mediados del mes de septiembre, debido al cambio en la distribución de las arenas a granulometrías mayores.

- Perfil 1, muestra 3

Se produce una variación cíclica mesocúrtica a leptocúrtica durante el periodo estival, con el aumento de la granulometría hasta mediados de febrero. En el mes de septiembre se produce un cambio en la distribución a leptocúrtica con asimetría negativa, con una fuerte tendencia hacia las granulometrías gruesas y con una variación a mesocúrtica con asimetría negativa a fines de ese mes (Figura 18). Por ende, el agente de transporte que predomina durante el periodo estival corresponde al oleaje, que incide en el continente y la marea dada la presencia de la porción fina. La anomalía presente se puede deber a una marejada que incide en la costa (Figura 19). La curva de frecuencia posterior a esa fecha corresponde al proceso recuperación de la costa.

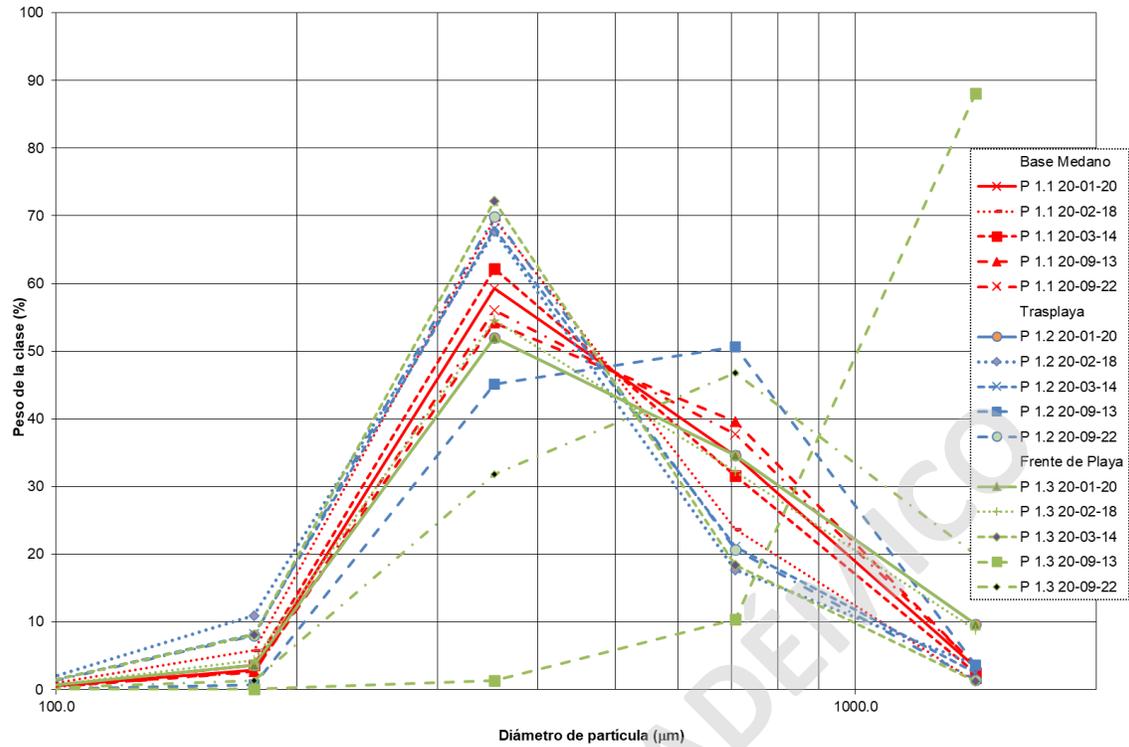


Figura 18: Gráfico de frecuencia del perfil 1, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

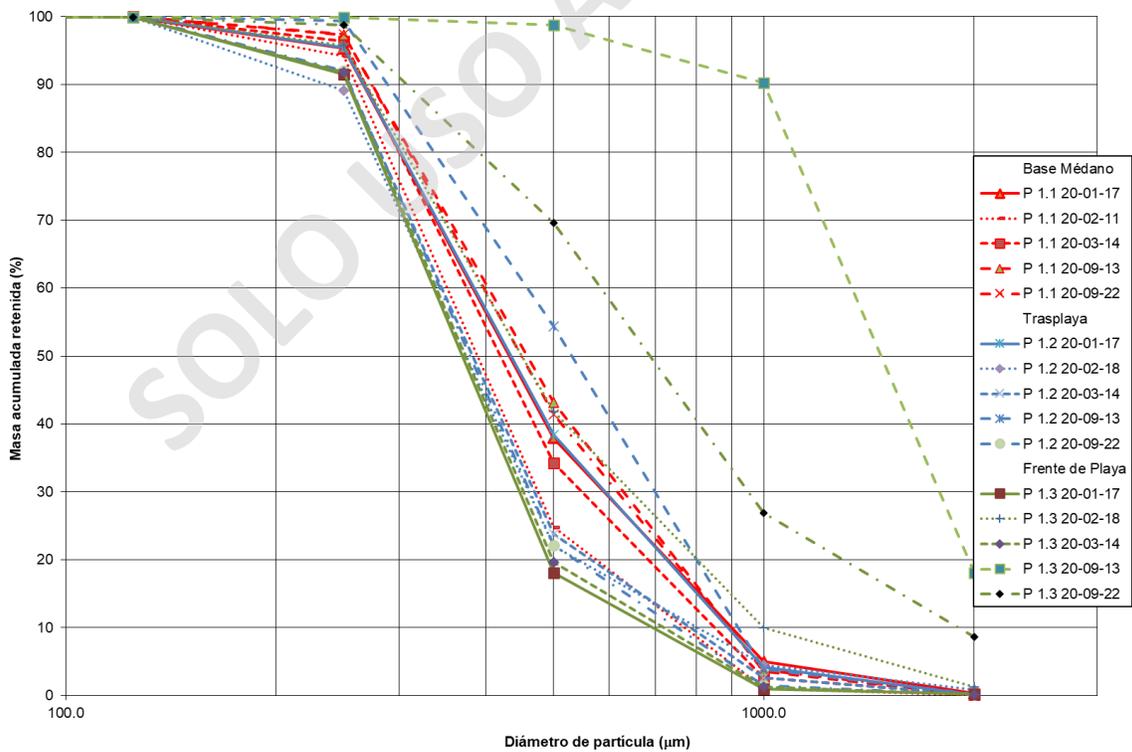


Figura 19: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 1, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

- Perfil 2, muestra 1

En el gráfico de frecuencia (Figura 39) se aprecia una distribución mesocúrtica, que levemente pasa a platicúrtica, con una asimetría neutra y con una afinidad hacia arena media. A fines de septiembre se presenta un aumento de la porción gruesa, lo que produce un leve comportamiento bimodal entre arena media a gruesa. El agente de transporte predominante corresponde al viento (Figura 40).

- Perfil 2, muestra 2

Se aprecia una migración del tamaño de las arenas desde granulometrías gruesas a medias, desde principios de enero hasta mediados de marzo. Se observó una variación abrupta de la curva en el mes de septiembre, pasando a leptocúrtica con asimetría negativa de arena gruesa a muy gruesa, con un cambio a mesocúrtica a fines de ese mes (Figura 39). El agente predominante es el oleaje, con el aumento del caudal eólico a fines del mes de marzo. Hay una anomalía asociada a marejadas a mediados de septiembre (Figura 40).

- Perfil 2, muestra 3

La zona observa una distribución de su frecuencia mesocúrtica con asimetría cíclica, negativa a neutra, durante el periodo estival. Presenta una anomalía platicúrtica de asimetría negativa durante el mes de febrero y dos anomalías leptocúrticas de asimetría negativa durante el mes de marzo y septiembre (Figura 39). El agente que transporta el sedimento es principalmente el oleaje, con la presencia de al menos un evento de marejada registrado durante el mes de septiembre (Figura 40).

- Perfil 3, muestra 1

Se presenta una zona con leves variaciones en el tiempo (Figura 20). Las muestras son leptocúrticas, con asimetría negativa y un aumento de la porción fina a fines del mes de marzo, cuyo principal agente de transporte corresponde al Estero El Sauce. Con respecto al mecanismo de transporte (Figura 21), se destaca una amplia variedad, que va desde la suspensión de sedimento fino hasta la tracción de gran diámetro durante gran parte del año.

- Perfil 3, muestra 2

Se aprecia una tendencia mesocúrtica con una asimetría negativa en las secciones de arena media a gruesa (Figura 20), pero con un valor máximo registrado durante el mes septiembre, posiblemente asociado a un evento de marejada, el cual cambia la curva de frecuencia a leptocúrtica de asimétrica negativa. El agente de transporte predominante corresponde al oleaje y, de manera simultánea, al viento de baja intensidad, que aporta sedimento fino o la presencia de corrientes longitudinales de agua (Figura 21).

- Perfil 3, muestra 3

Se presenta un comportamiento en general leptocúrtico con asimetría neutra, que parte desde arena media a gravilla, con la presencia en un comportamiento bimodal a mediados del mes de enero y un evento anómalo de tormenta durante el mes de septiembre, el cual traslada la curva hacia las granulometrías de mayor tamaño (Figura 20). El perfil presenta una combinación de al menos dos agentes de transporte, tales como el oleaje y corrientes transversales, que aportan sedimentos de mayor diámetro al perfil, incluso el aporte del Estero El Sauce se considera dentro de las posibilidades (Figura 21).

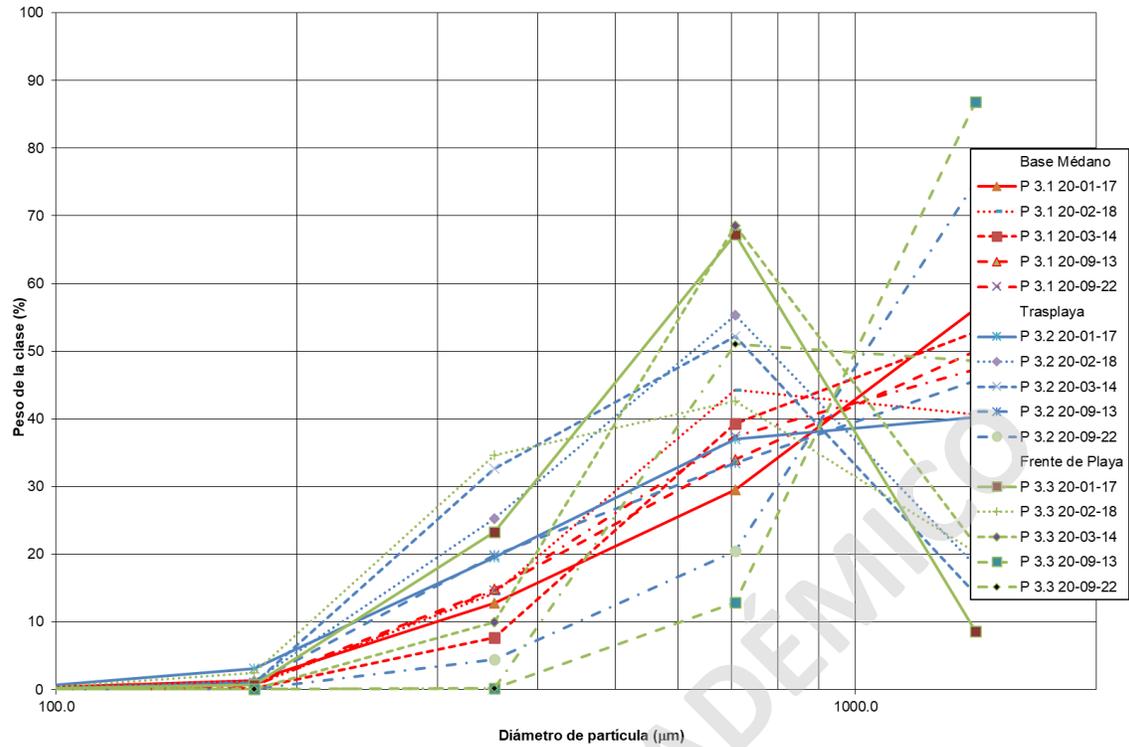


Figura 20: Gráfico de frecuencia del perfil 3, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

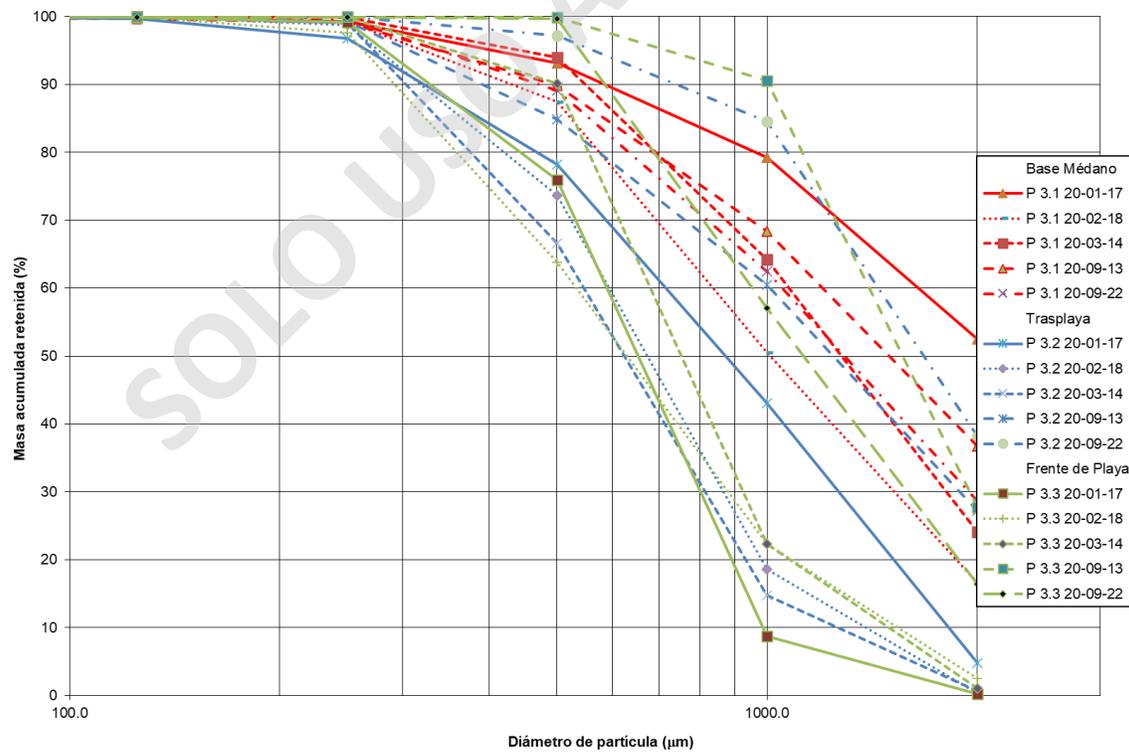


Figura 21: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 3, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

- Perfil 4, muestra 1

El perfil presenta una distribución mesocúrtica con asimetría negativa durante el periodo estival y cambia a una asimetría neutra, preservando su distribución a fines del mes de septiembre. Debido a la disposición espacial del punto de muestreo y su cercanía al estero (Figura 41), se estima que corresponde a un remanente del cauce fluvial que ha permanecido estable durante el tiempo, dado su similitud al perfil 3, muestra 1. Además, se aprecia un aumento en el caudal eólico a fines del mes de septiembre, dada el alza de la porción arena media. En este punto existe una convivencia entre los diferentes mecanismos de transporte, que van desde la suspensión hasta la tracción (Figura 42).

- Perfil 4, muestra 2

Presenta una distribución mesocúrtica con afinidad asimétrica negativa, desde el mes de enero hasta el mes de marzo. También muestra una variación a mesocúrtica simétrica a fines del mes de septiembre (Figura 41). El agente predominante en este perfil corresponde al oleaje, dado el tamaño de grano y selección, con una posible influencia de la marea a fines del periodo invernal (Figura 42).

- Perfil 4, muestra 3

Se presenta una tendencia mesocúrtica simétrica a principios del mes de enero, con un cambio a leptocúrtica simétrica durante febrero hasta fines del mes de septiembre. Se observa una anomalía leptocúrtica, de asimetría negativa, a mediados de septiembre, asociada a eventos de marejada que afectaron la zona (Figura 41). El mecanismo de transporte corresponde al oleaje, en forma sincrónica a la marea durante el mes de enero, con un cambio predominante del oleaje a durante el resto del año (Figura 42).

- Perfil 5, muestra 1

Corresponde a un ambiente en el cual se presenta una tendencia leptocúrtica, de asimetría negativa, donde la proporción de arena gruesa es por sobre el 70%. Además, se aprecia un aumento de la porción fina al cierre del periodo estival (Figura 22). El transporte predominante es la tracción por medio del oleaje, con una componente eólica a fines de marzo (Figura 23).

- Perfil 5, muestra 2

La distribución presente en el gráfico de frecuencia muestra una asimetría negativa de la curva, con una afinidad a las arenas gruesas. Contiene una curtosis leptocúrtica desde el mes de enero hasta mediados del mes de septiembre, presentando una fuerte estabilidad a través de tiempo y cuyo principal agente de transporte corresponde al oleaje y, en menor medida, corrientes transversales (Figura 22). El transporte de las partículas es predominantemente por tracción y, en menor proporción, saltación (Figura 23).

- Perfil 5, muestra 3

La sección presenta una tendencia de asimetría negativa desde arena media a gruesa, con una variación de mesocúrtica a leptocúrtica desde el mes de enero a septiembre (Figura 22). Los agentes presentes en la sección corresponden tanto al oleaje como a la marea, con un máximo valor de la granulometría en el mes de septiembre. El transporte de las partículas varía desde la saltación a tracción (Figura 23).

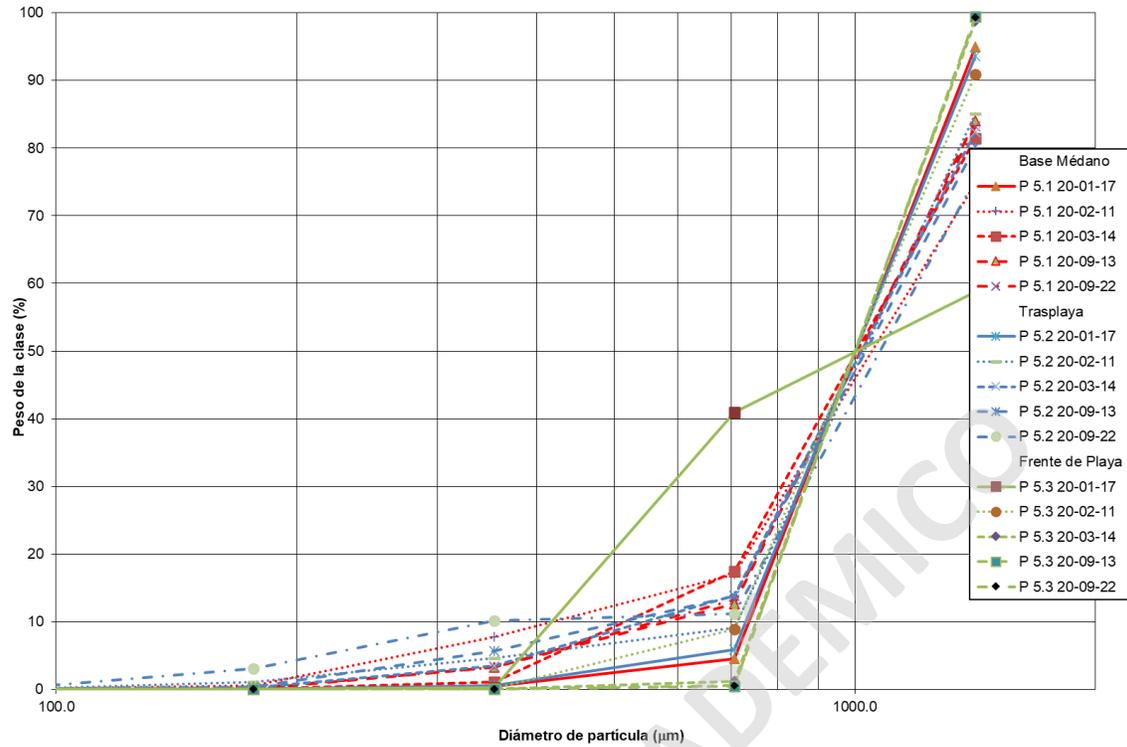


Figura 22: Gráfico de frecuencia del perfil 5, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

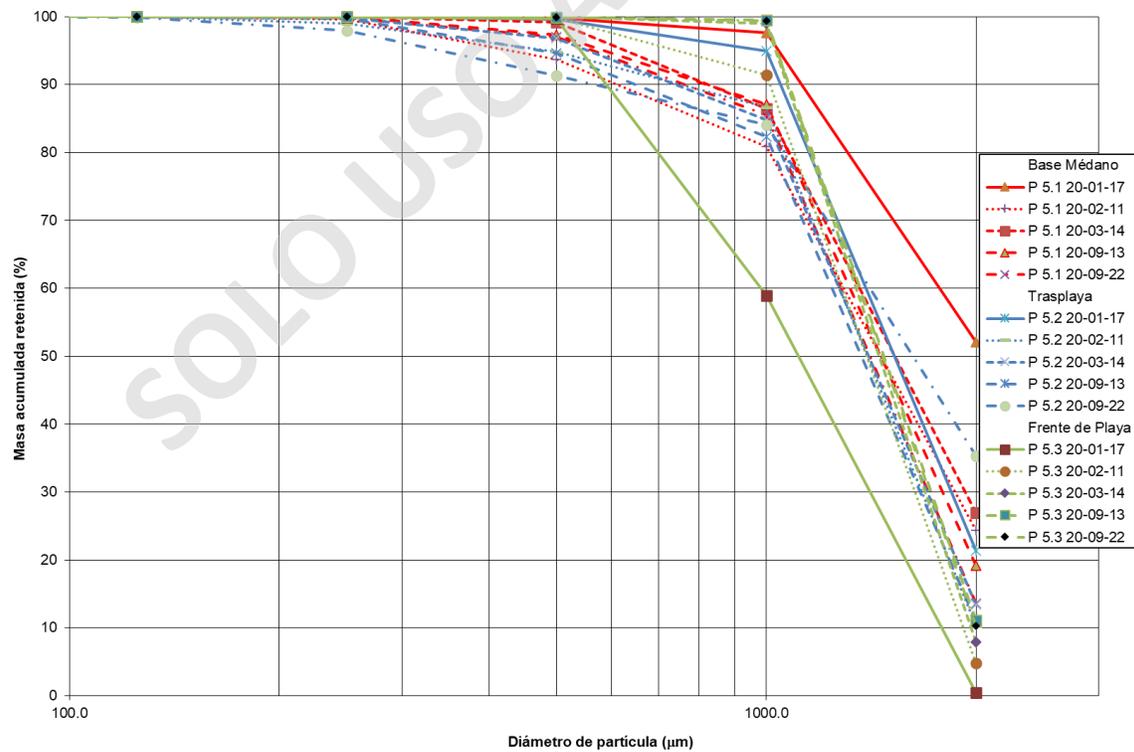


Figura 23: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 5, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

En base lo antes expuesto es posible determinar que el agente de transporte predominante en la playa de Laguna Verde corresponde al oleaje del Océano Pacífico (Figura 24), el cual produce un cambio abrupto de la granulometría en el frente de playa, con una influencia hacia la trasplaya. Dado que este cambio se acentúa durante el periodo invernal, provocando un aumento en la granulometría de las arenas gruesas. Además, se denota que el mecanismo de transporte predominante corresponde a saltación durante el periodo estival, basado en los diferentes gráficos de frecuencia acumulada expuestos anteriormente. Caso contrario, durante el periodo invernal se produce el cambio a tracción, especialmente en el frente de playa, dado que los otros ambientes no presentan un cambio similar.

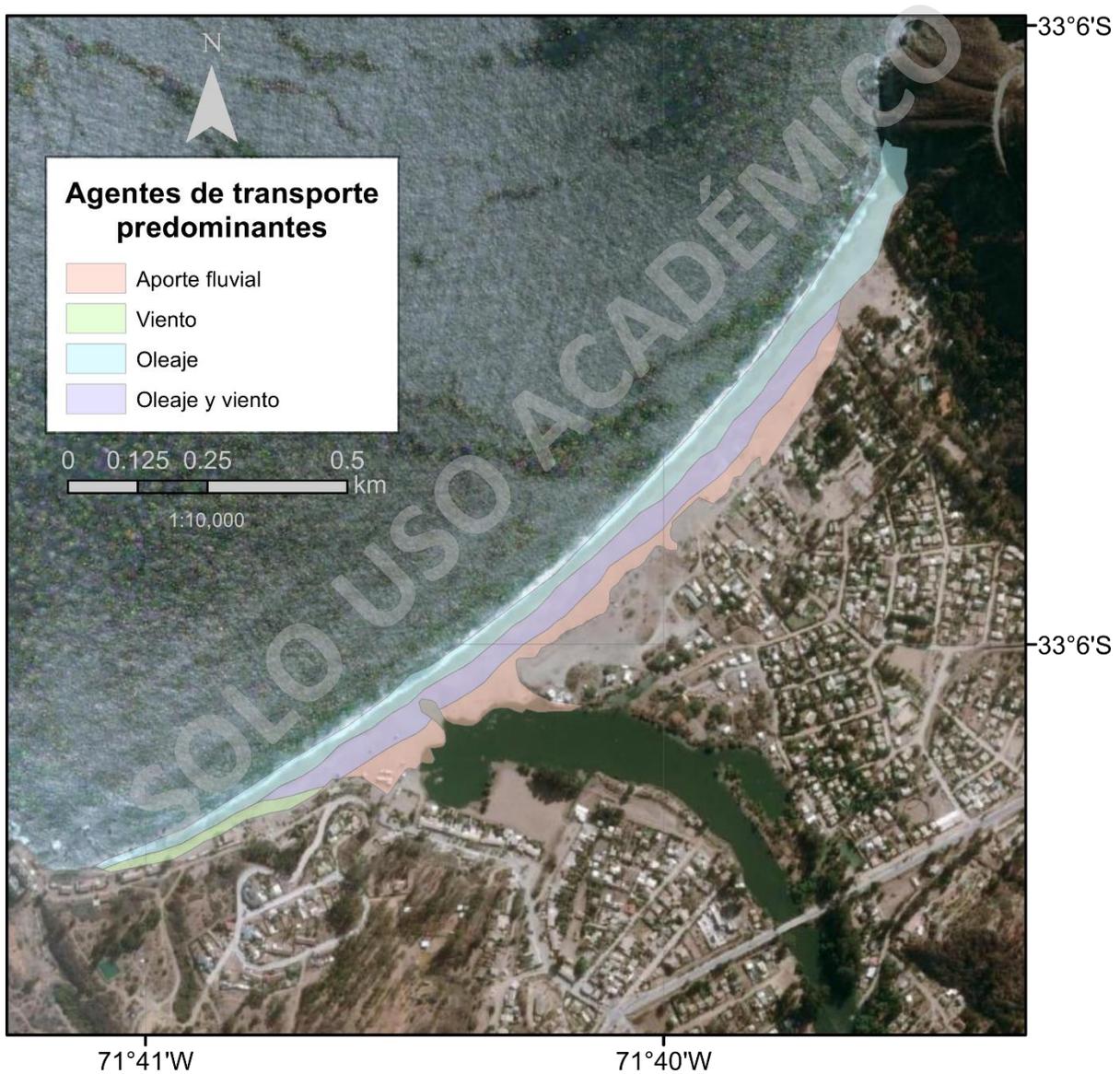


Figura 24: Agentes de transporte predominantes en distintas porciones de la playa Laguna Verde. Imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2.

3.2. Trabajos realizados en gabinete

3.2.1. Análisis de datos climáticos

Se analizan los diversos factores que afectan a la costa, entre los cuales destaca la marea, el oleaje, temperatura, precipitaciones y presión atmosférica. La temporalidad de la información obtenida corresponde al periodo entre el año 2015 hasta principios del año 2020, la cual se representa en una línea continua concordante con los periodos de revisita de los sensores remotos y de las diversas campañas de terreno. Además, la línea temporal fue segmentada en las diversas estaciones del año, para facilitar la interpretación de los datos obtenidos.

En base a los datos de marea (Figura 25) se aprecia que el nivel del mar presentó fluctuaciones durante el último periodo, con valores que varían entre los -0.63 m y 0.62 m y la presencia de al menos 3 valores que están por sobre el Pico sobre el Umbral (PSU) estimado en 0.56 m. Cabe destacar que las fluctuaciones de la marea presentan un comportamiento cíclico, pero los más altos valores se desarrollan durante el periodo invernal, con valores anómalos durante la época primaveral registrados en los años 2016 y 2018.

Caso similar sucede con el oleaje (Figura 25), el cual presenta valores que fluctúan entre 0.94 m y 4.6 m. Se observan 5 eventos de tormenta, registrados por sobre el PSU registrado en 3.6 m durante los últimos cinco años. En general, se aprecia que las mayores alturas del oleaje se desarrollan durante el periodo invernal, pero con un valor anómalo registrado en noviembre del año 2018. Basado en el cruce de información oceanográfica, se desprende que los eventos más energéticos, con una altura del oleaje por sobre los 2 m, se desarrollan de manera simultánea con eventos de pleamar.

Por otra parte, en base a los datos meteorológicos obtenidos de la DGAC, se presenta una relación inversa entre la presión atmosférica y la temperatura ambiental, donde a mayor presión atmosférica (Figura 26), la temperatura ambiente de la zona disminuye (Figura 27), especialmente durante el periodo invernal, en el cual se aprecia de mejor manera esta relación y viceversa. Con respecto a la presión atmosférica superficial, se aprecia una relación directa con la altura de las olas, donde a una presión atmosférica mayor a 976 hPa ocasiona olas con alturas por sobre los 2 m de altura.

Los valores de precipitación (Figura 28) no presentan relación con los datos mencionados anteriormente, dado que los valores durante los últimos cinco años no alcanzan 1 mm de agua caída, lo que presentaría un déficit de lluvias en la zona costera de los 33°S durante los días de revisita de los satélites por la zona de estudio.

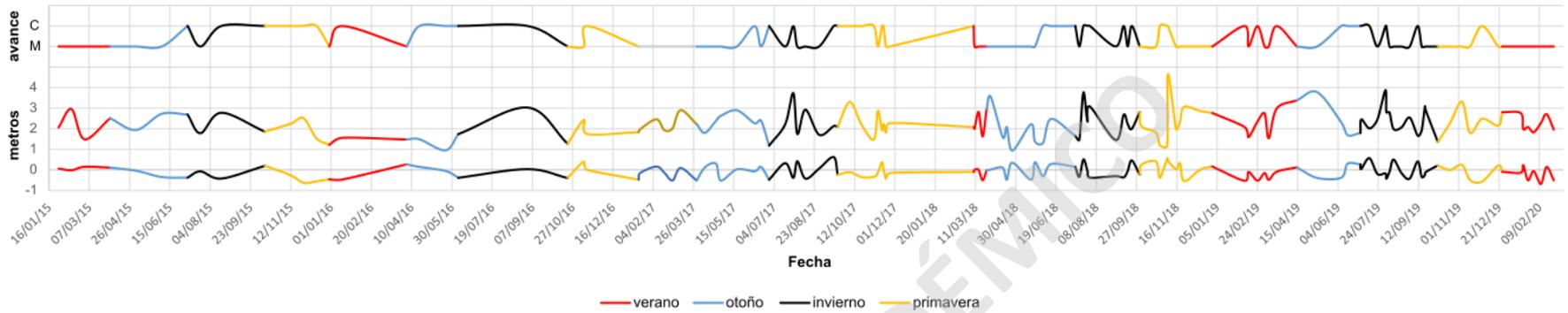


Figura 25: Gráfico que muestra el avance al mar (M) o el retroceso al continente (C) durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, en las diversas estaciones del año entre 2015 al 2020. La línea media corresponde a la altura de la ola y la línea inferior corresponde al nivel del mar en metros. Fuente: Universidad de Cantabria, España.

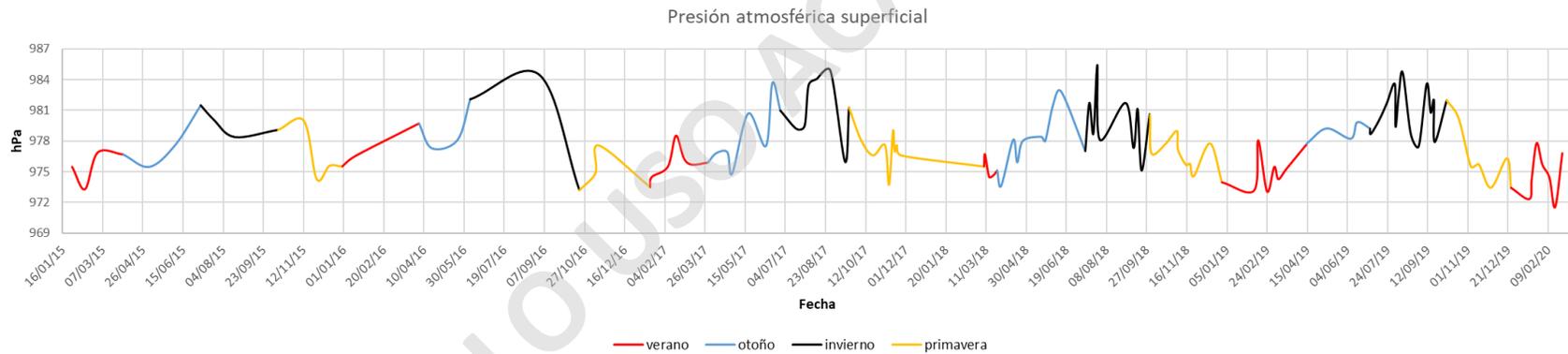


Figura 26: Serie de presión atmosférica superficial en hectopascales en el eje de las ordenadas durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, que comprende desde el año 2015 hasta 2020 en el eje de las abscisas. Fuente: DGAC.

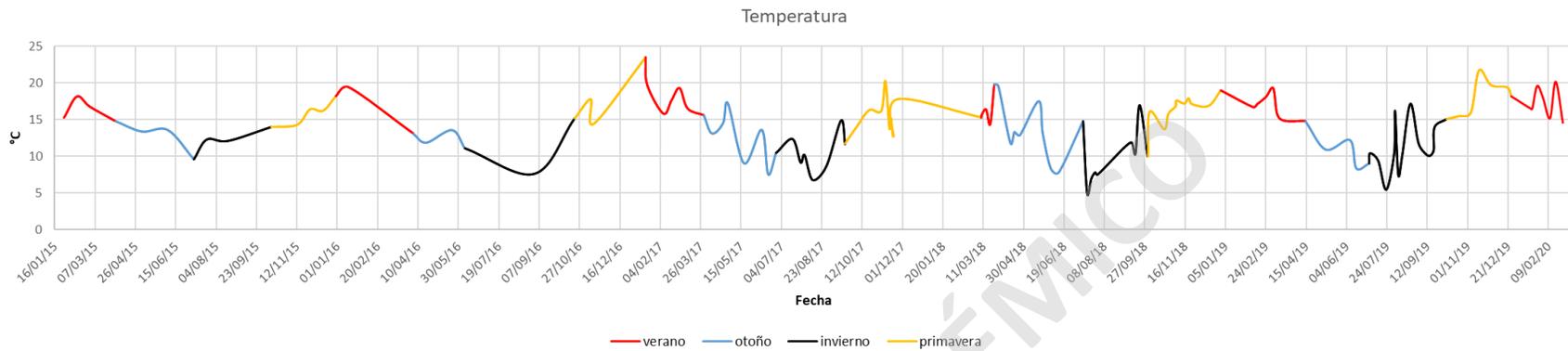


Figura 27: Variación de la temperatura ambiental promedio en grados Celsius en el eje de las ordenadas durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, que comprende desde el año 2015 hasta 2020 en el eje de las abscisas. Fuente: DGAC.

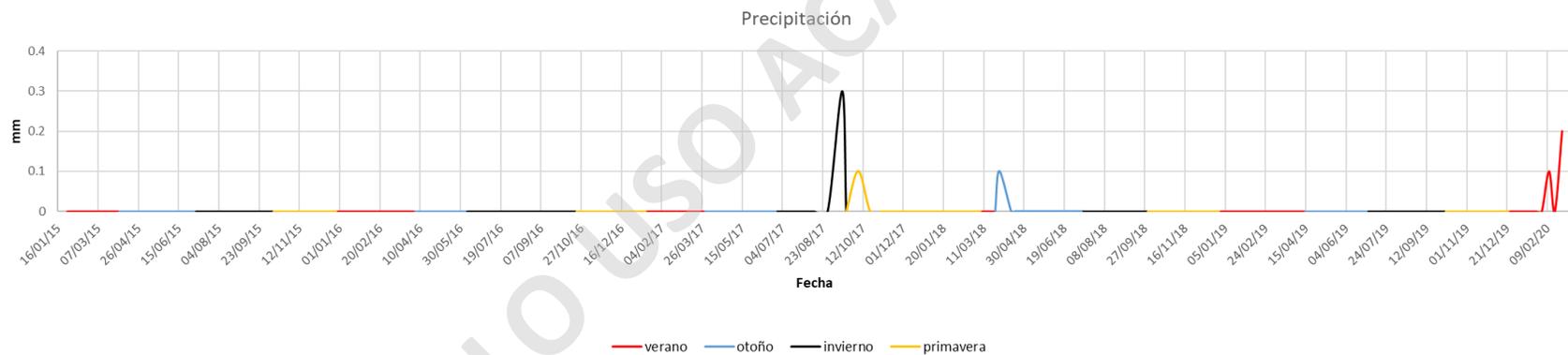


Figura 28: Variación de la precipitación en milímetros que ha caído en la zona de estudio en el eje de las ordenadas durante el periodo de revisita de los satélites por la zona de estudio, que comprende desde el año 2015 hasta 2020 en el eje de las abscisas. Fuente: DGAC.

3.2.2. Análisis de la variación de la línea de costa mediante DSAS

Para determinar los cambios de la posición relativa de la línea de costa de la playa Laguna Verde se construyó una base cartográfica satelital de los últimos 5 años con los sensores remotos OLI Landsat 8 y Sentinel 2. Además, se ha realizado el levantamiento topográfico de la línea de costa mediante instrumental topográfico y vinculación geodésica. Esta actividad fue incluida en la base cartográfica, para establecer los cambios de la línea de costa y contrastar con la información extraída de los sensores remotos empleados. Los productos obtenidos por el software DSAS proporcionan una vista gráfica del cambio en la línea de costa desde principios del 2015 hasta fines del año 2020, lo que facilita el análisis e interpretación de los datos obtenidos.

- Envolverte de cambio de la línea de costa (ECLC)

Los valores demuestran que la costa ha presentado un desplazamiento de al menos 18 ± 3 m, con un valor máximo de 56 ± 3 m en la zona centro-norte, lo que refleja una alta variación de la línea de costa en la zona de desembocadura del Estero El Sauce y en la punta rocosa sur, cercana a la planta termoeléctrica de Laguna Verde (Figura 29).

- Movimiento neto de la línea de costa (MNLK)

Esta herramienta demuestra zonas de erosión y de acreción, con valores máximos de 15 ± 3 m y 8 ± 3 m, respectivamente. Los altos valores de erosión ocurren en sectores con una intervención antrópica importante, como la zona sur del área de estudio, con la implementación de una costanera, en la cuál se implementaron vías asfálticas que conectan la localidad de Laguna Verde con la instalación termoeléctrica. En la zona norte se encuentran casas cercanas a la línea de costa.

Por otro lado, los sectores con presencia de acreción corresponden a las cercanías del Estero El Sauce, cuyos valores máximos se encuentran al sur de este punto. En la Figura 30 se aprecia una zona de estabilidad entre valores máximos de acreción, lo que se puede deber a la acción de los pescadores próximos a la línea de costa, los cuales desplazan la arena de la playa, provocando cambios en la morfología y la erosión de esta.

- La tasa de punto final (TPF)

Se aprecia una tasa de erosión estimada de -2.49 m/año en las zonas críticas de la zona sur y norte (Figura 31). En general, la zona de estudio presenta un retroceso sostenido en el tiempo, pero con niveles de recuperación en la zona cercana al Estero El Sauce con una tasa máxima de $+1.54$ m/año, con la posibilidad de que este curso de agua genere el aporte de material durante los periodos de lluvia aguas arriba que no necesariamente coincide con los periodos de revisita del satellite por la zona de estudio.

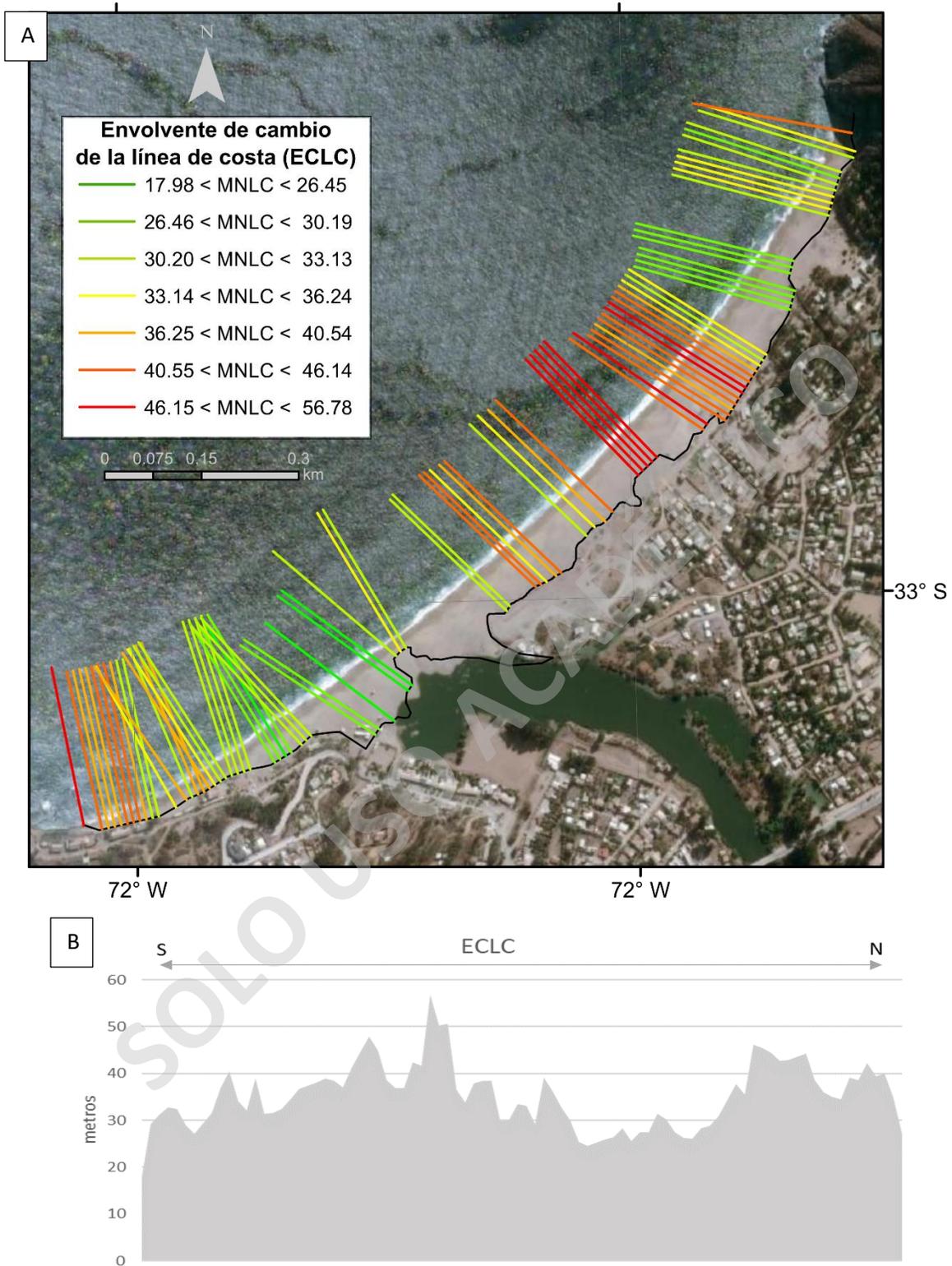


Figura 29: Las figuras muestran la ECLC en la playa de Laguna Verde, obtenidas a partir del software Shorex y DGPS. a) La imagen superior muestra las distancias que ha experimentado la línea de costa durante los años 2015 a 2020, imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2. b) La imagen inferior muestra en un trazo rectilíneo la variación de la línea de costa en los últimos cinco años.

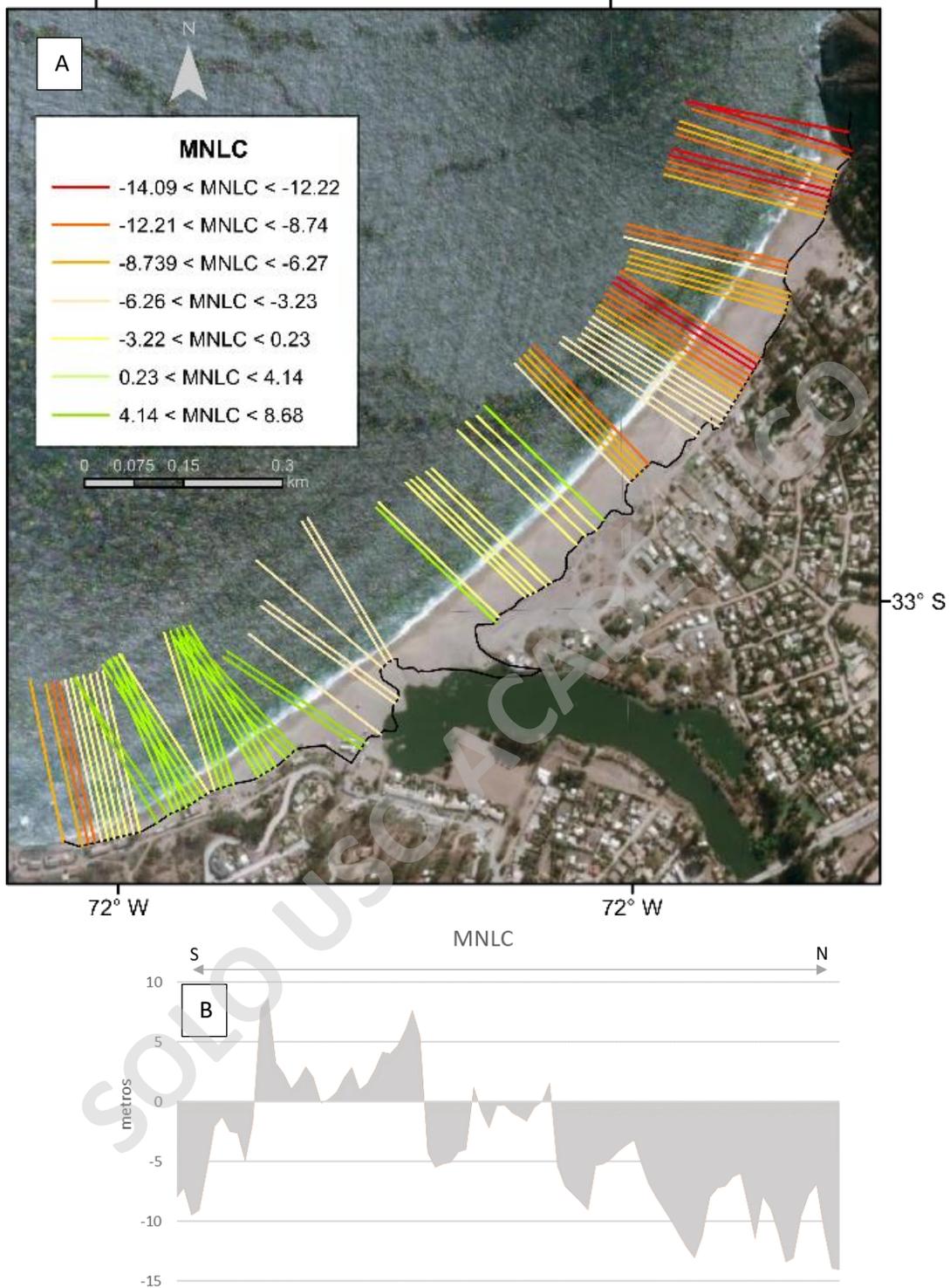


Figura 30: Las figuras muestran el MNLC en la playa de Laguna Verde, obtenidas a partir del software Shorex y DGPS. a) La imagen superior muestra el desplazamiento que ha experimentado la línea de costa más reciente con la más reciente durante los años 2015 a 2020 en metros, imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2. b) La imagen inferior muestra en un trazo rectilíneo la variación de la línea de costa en metros con respecto a la línea base en los últimos cinco años.

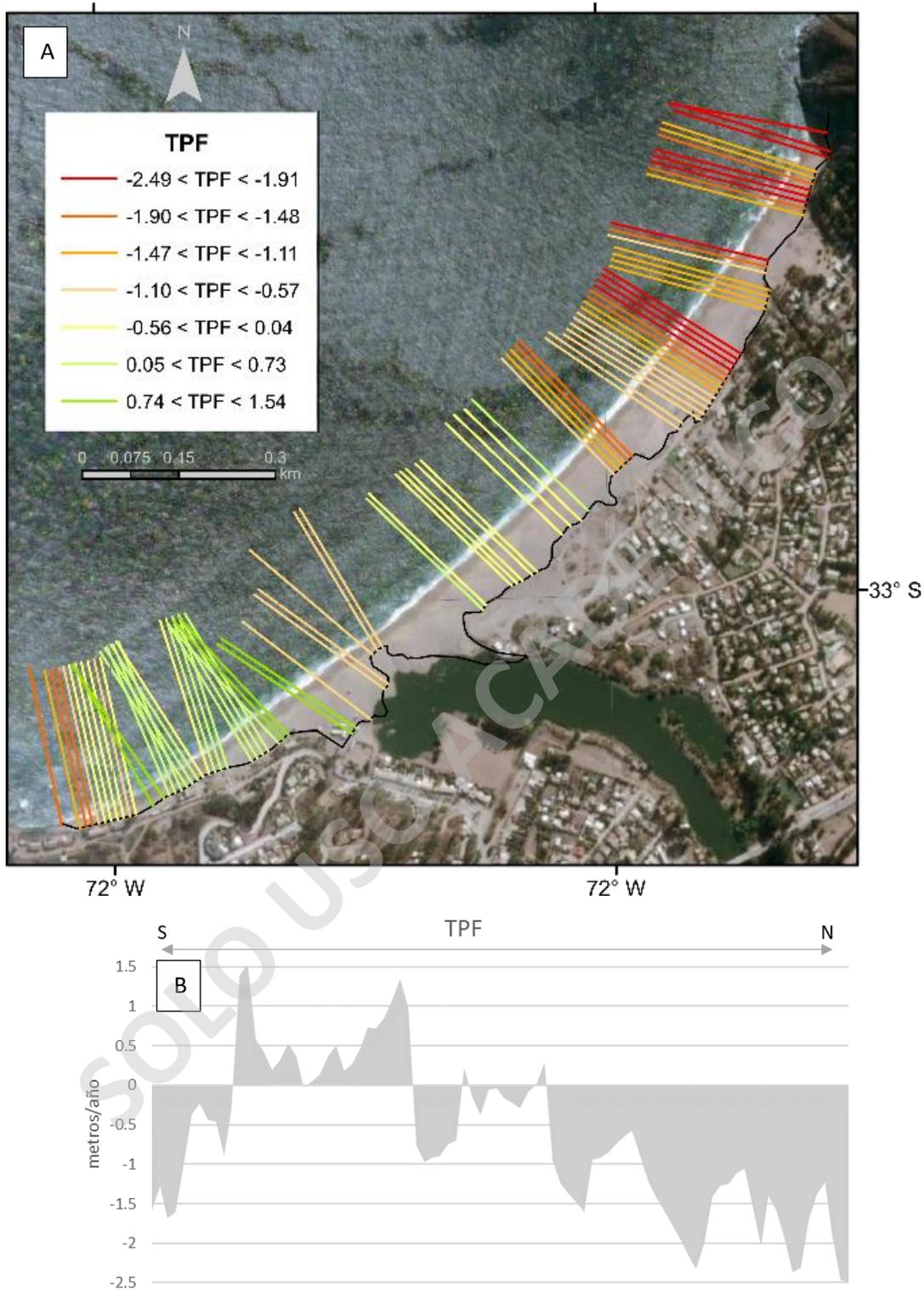


Figura 31: Las figuras muestran la TPF en la playa de Laguna Verde, obtenidas a partir del software Shorex y DGPS. a) La imagen superior muestra las tasas de avance o retroceso que ha experimentado la línea de costa durante los años 2015 a 2020, imagen base: agosto del 2019, Sentinel 2. b) La imagen inferior muestra en un trazo rectilíneo la variación de la línea de costa en metros/año con respecto a la línea base en los últimos cinco años.

- Tasa de regresión lineal (TRL)

En la playa de Laguna Verde se empleó un modelo de regresión lineal para establecer la relación entre la distancia de la línea de costa hasta la línea base y el periodo que comprende entre el 2015 al año 2020 (Figura 32). En primera instancia se observa una baja correlación en los datos con un valor de R^2 aproximadamente en 0.3 y una baja pendiente en la línea de tendencia, lo que implica que la variación de la línea de costa no aumenta con el transcurso del tiempo de manera lineal.

Dada la baja correlación de los datos con la implementación de un modelo de regresión lineal, se empleó un modelo de regresión polinómica de 4° dado que mejora la correlación de los datos con un valor de R^2 aproximado de 0.41 (Figura 33). Se desprende que el comportamiento de la línea de costa con el tiempo, presenta un comportamiento cíclico con una posible tendencia al alza.

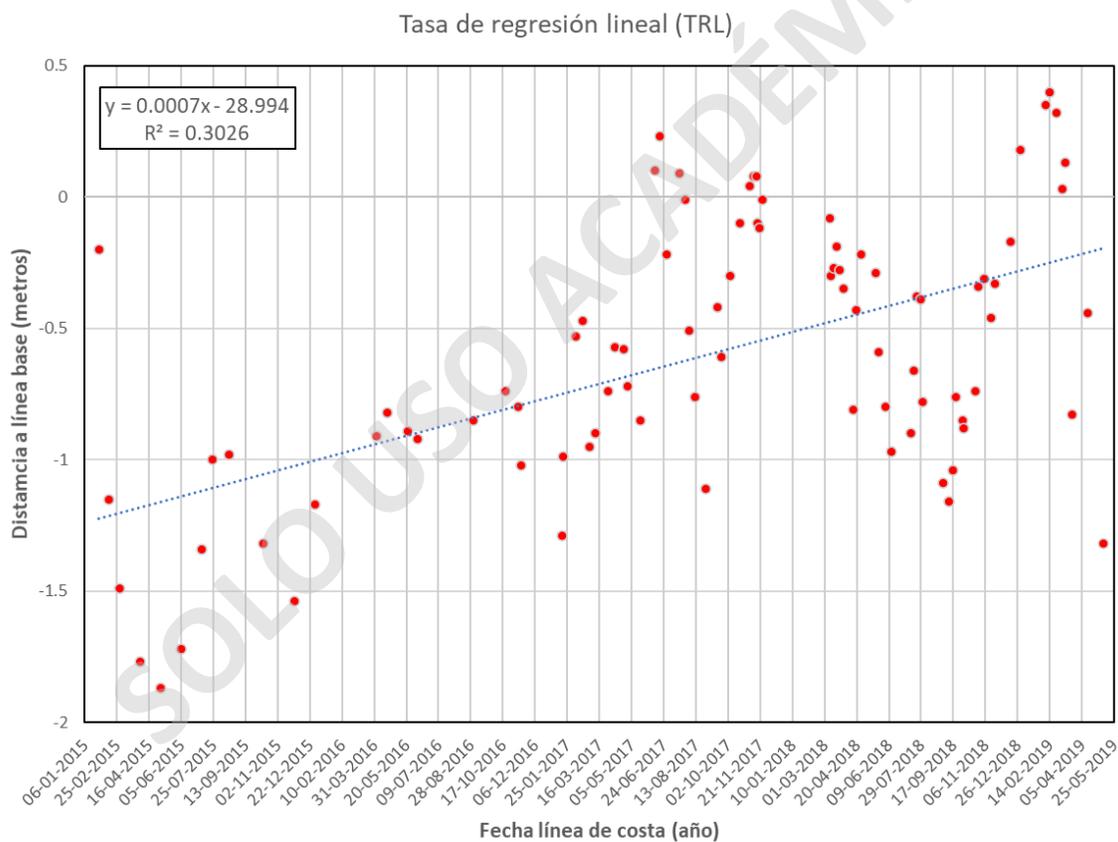


Figura 32: Modelo de regresión lineal, que relaciona la distancia de la línea de costa con respecto a la línea base en el eje de las ordenadas y el periodo que comprende desde el año 2015 a 2019 en el eje de las abscisas.

Tasa de regresión lineal (TRL)

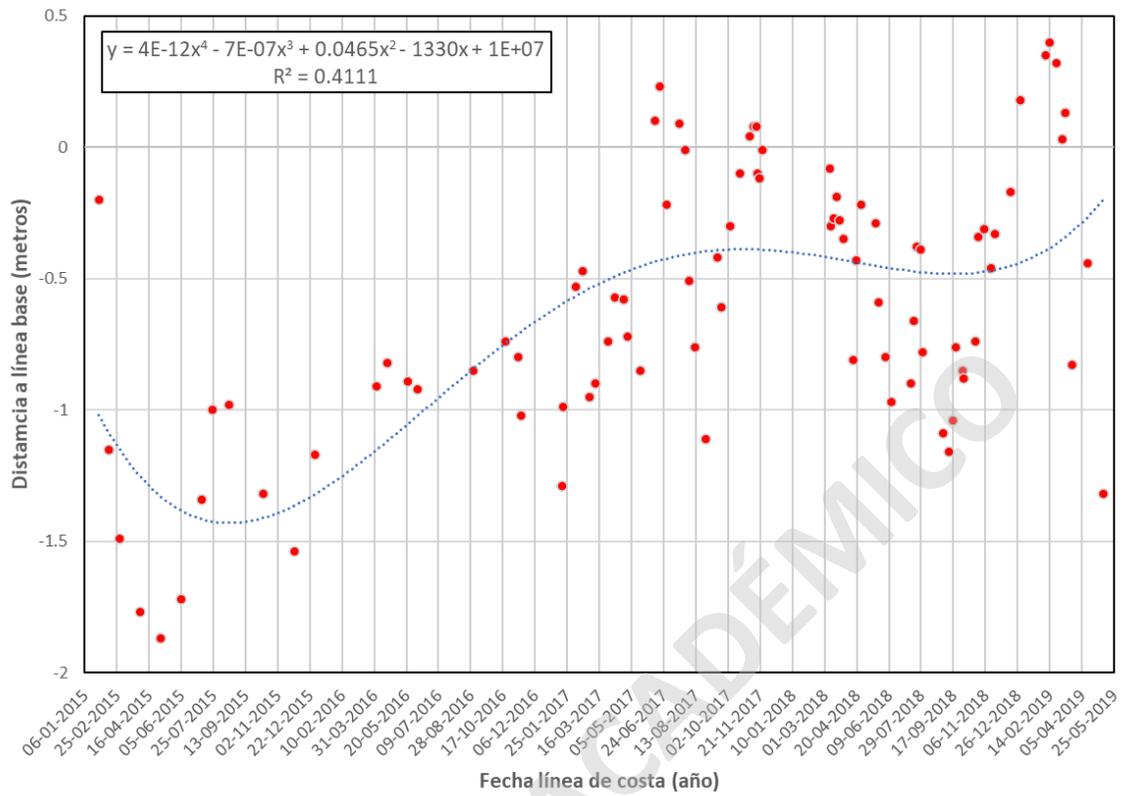


Figura 33: Modelo de regresión polinómica de 4°, que relaciona la distancia de la línea de costa con respecto a la línea base en el eje de las ordenadas y el periodo que comprende desde el año 2015 a 2019 en el eje de las abscisas.

3.2.3. Base cartográfica satelital y variabilidad de la línea de costa

En base a la información recopilada de los sensores remotos, se confeccionó una base cartográfica satelital que comprende desde inicios del año 2015 hasta fines del 2019, con un total de 115 imágenes satelitales, las cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Tabla resumen de las imágenes satelitales obtenidas por los diferentes años

Año	Imágenes obtenidas	Landsat 8	Sentinel 2
2015	14	12	2
2016	9	6	3
2017	29	7	22
2018	32	8	24
2019	31	7	24

A simple vista, se aprecia un cambio en la línea de costa de manera estacional (Figura 37). Durante el periodo de verano se aprecia una distribución homogénea de la línea de costa, con avances hacia el océano o estabilidad en su posición (Figura 34). Caso contrario, en la estación de otoño se observa una variación en la zona del Estero El Sauce, con retrocesos significativos (Figura 36). Durante la estación invernal se denota la mayor variabilidad (Figura 35), que se extiende a lo largo de la costa, especialmente en las puntas rocosas tanto norte y sur, como en el sector del estero El Sauce. En la estación primaveral (Figura 38) se observa una estabilización de la línea de costa, pero con variaciones a lo largo de la costa en menor grado en comparación a la estación invernal.

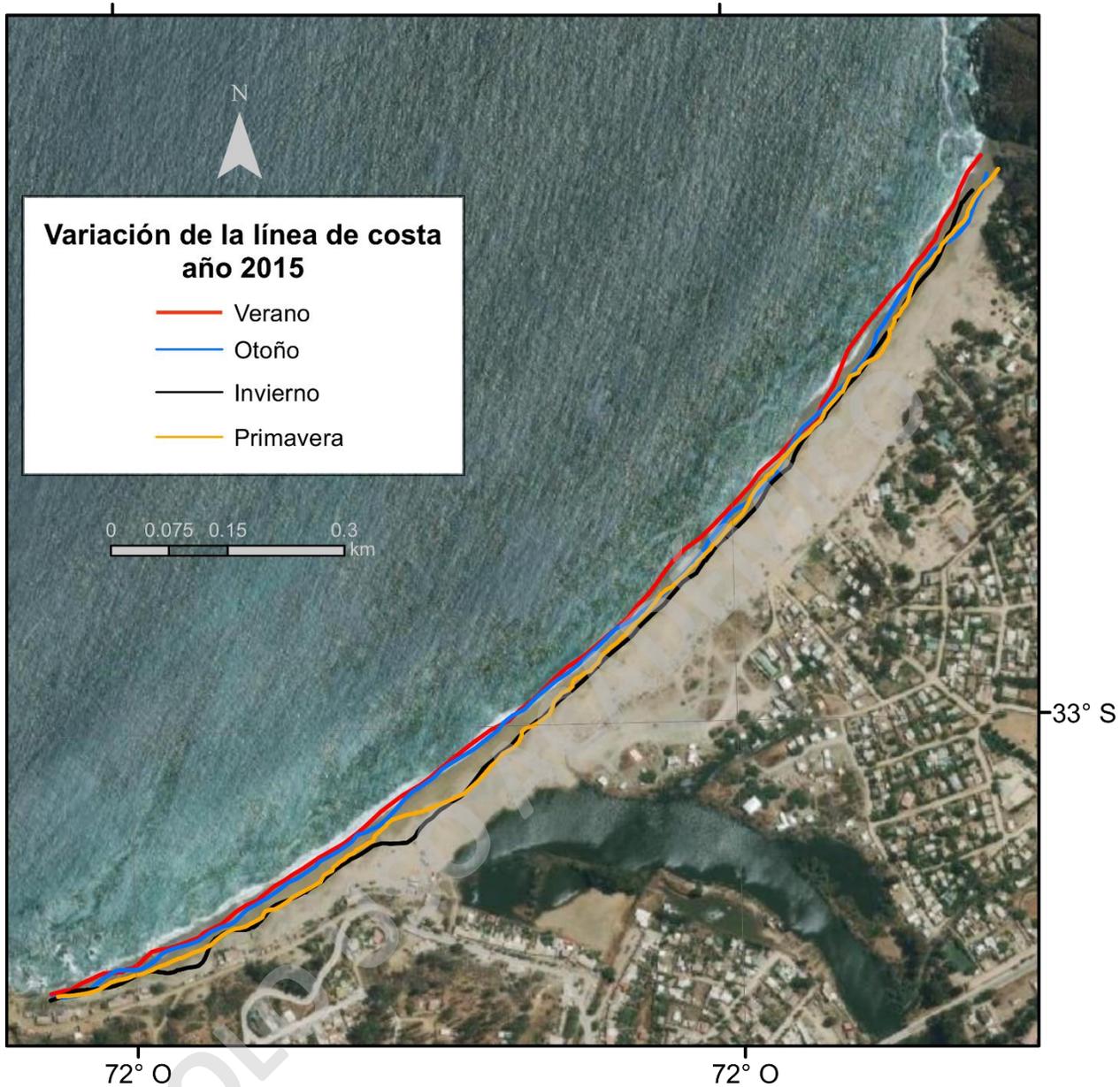


Figura 34: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2015. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.

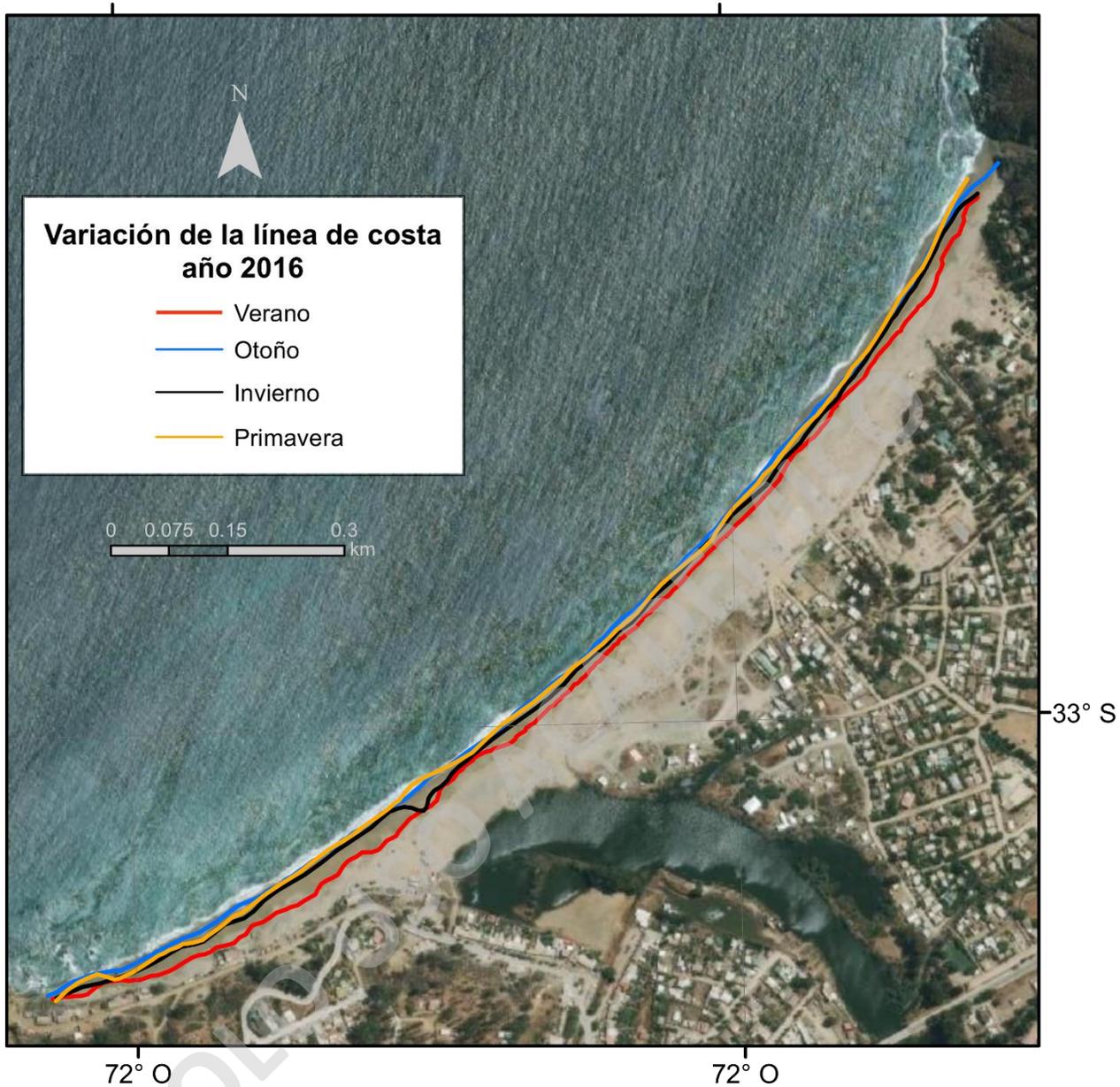


Figura 35: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2016. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.

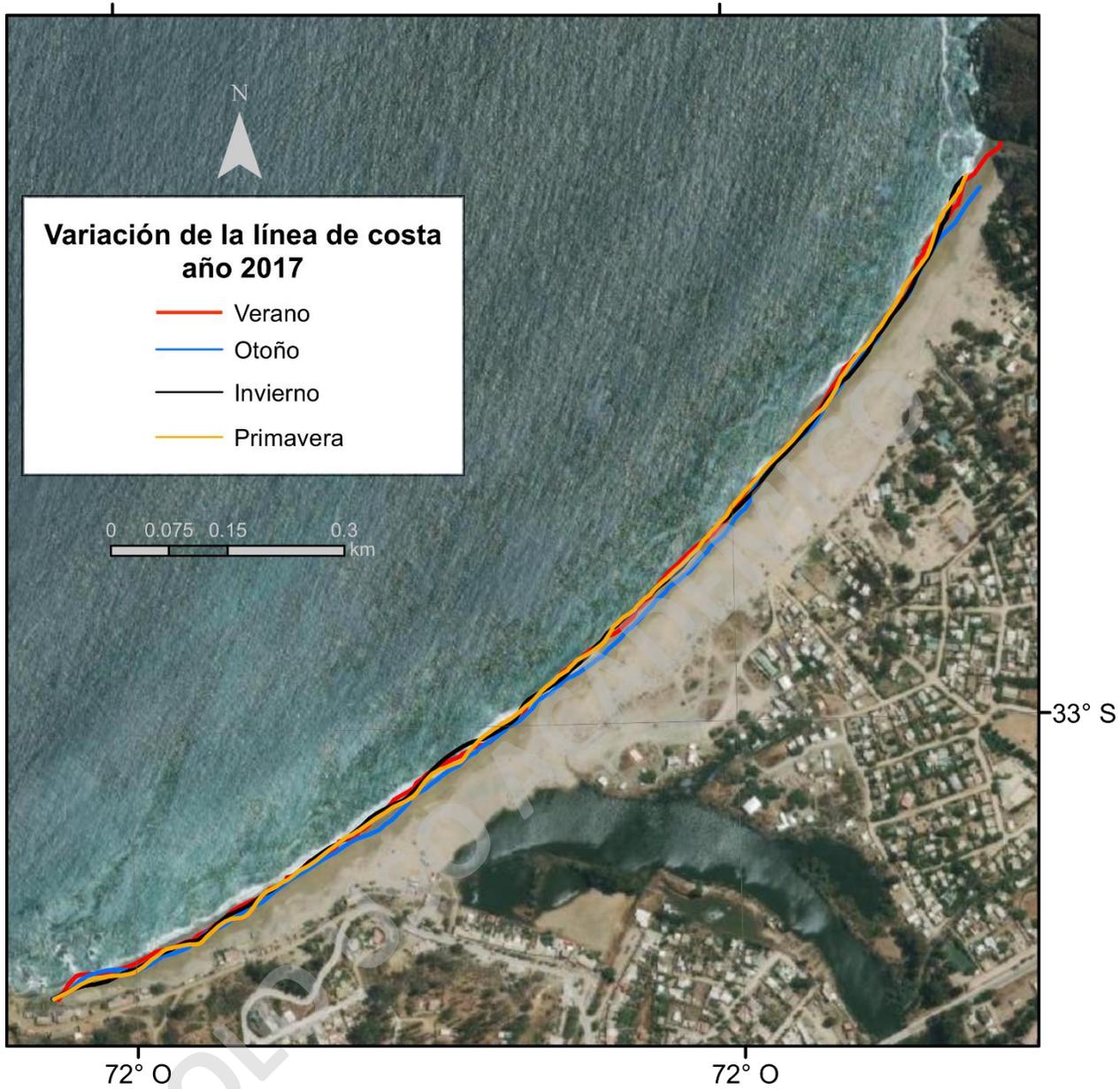


Figura 36: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2017. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.

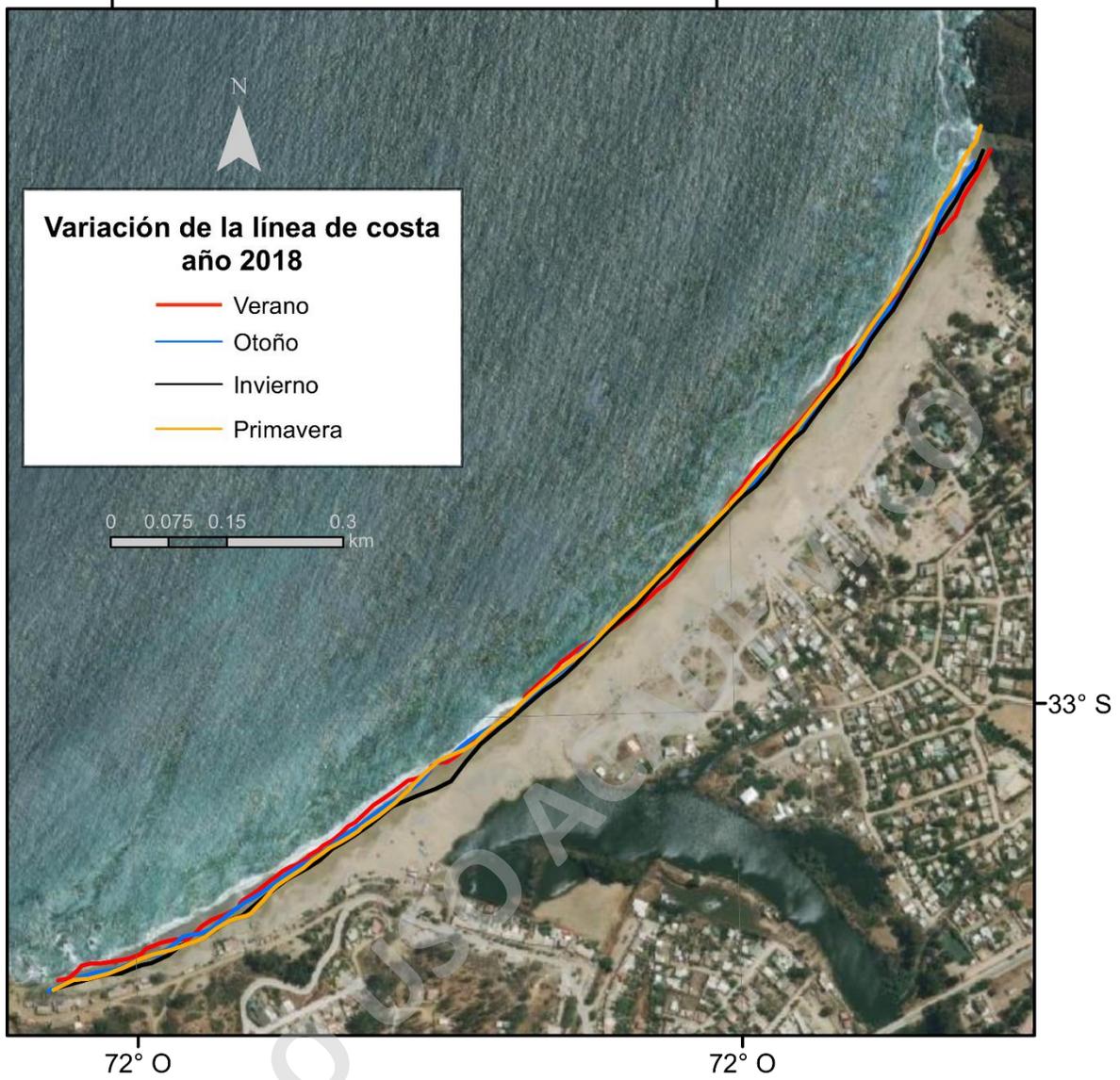


Figura 37: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2018. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.

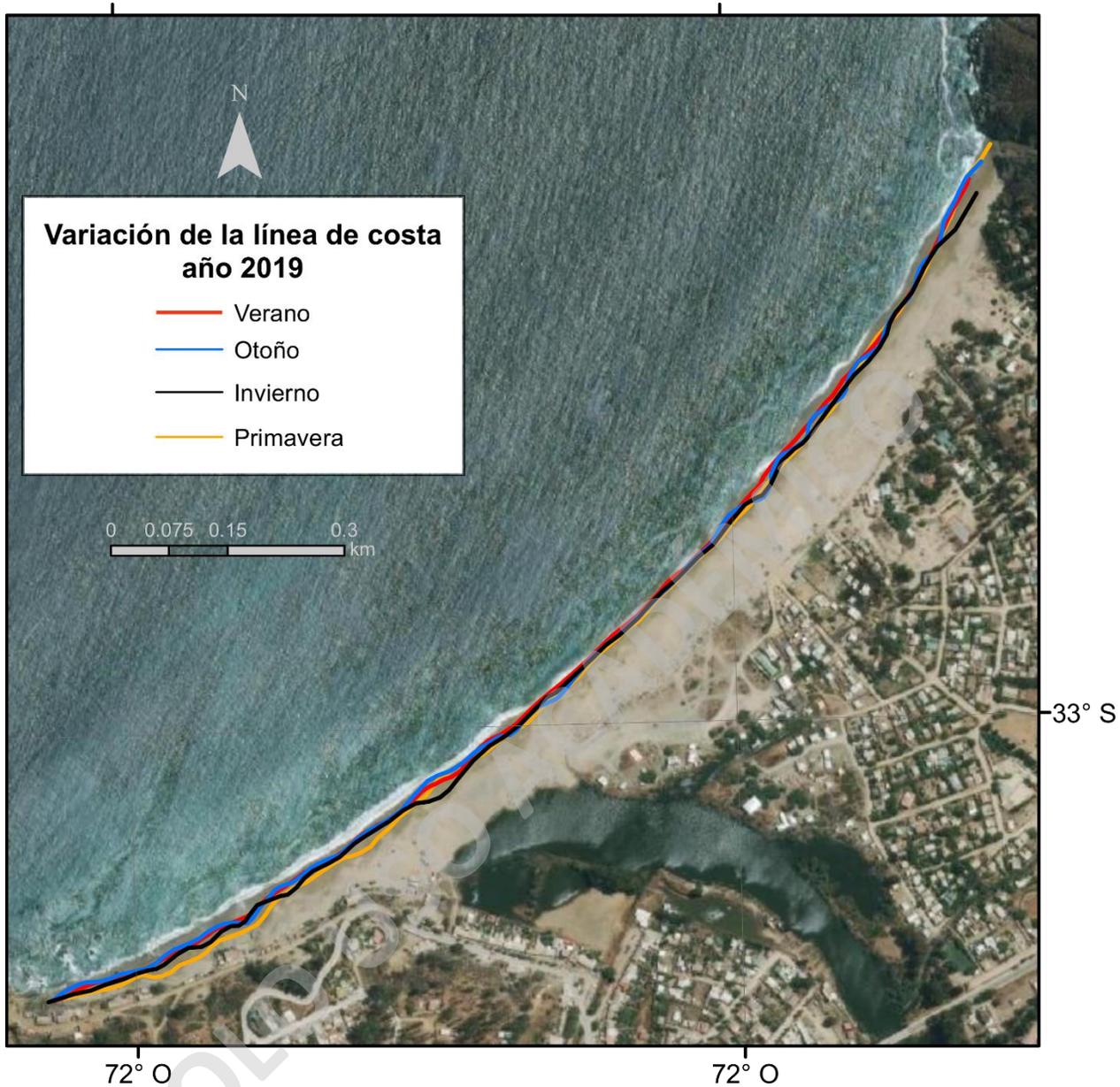


Figura 38: Variación de la posición de la línea de costa mediante el software Shorex, durante las diversas estaciones del año 2019. Imagen base: abril del 2020, Sentinel 2.

4. Discusiones

4.1.1. Sobre la efectividad de la metodología con sensores remotos

El uso de imágenes satelitales en el monitoreo de las costas presenta mayores ventajas que el uso de imágenes aéreas, especialmente en los tiempos asociados al preprocesamiento para la obtención de un modelo predictivo. En la tabla N°4, se presentan las ventajas y desventajas de las dos metodologías empleadas en las costas de Chile Central, donde se compara el uso de sensores remotos y fotografías aéreas.

Tabla 4: Tabla comparativa sobre las ventajas y desventajas que presentan las imágenes satelitales contra las imágenes aéreas.

	Imágenes aéreas	Imágenes satelitales
Pros	Alta resolución de las imágenes	Amplio rango temporal
	Modelo 3D en estereoscopio	Compuesto por bandas espectrales
	Históricas (más antiguas que satélites)	Abarcan una amplia superficie
		Permiten la incorporación de algoritmos en la etapa de obtención
		Bajo costo
Contras	Alto costo	Baja resolución de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2
	Escasez temporal	Presencia de nubosidad
	Abarcan un área pequeña	Gran tamaño de los archivos
	Fotografías en blanco y negro	Requiere de altos estándares computacionales para su procesamiento
	Requieren de georreferenciación	

Por lo tanto, bajo las afirmaciones ya mencionadas, se destaca las ventajas que presenta las imágenes satelitales por sobre las imágenes aéreas, desde un punto económico hasta la incorporación de lenguajes de programación para optimización de resultados. Inclusive en el cuadro comparativo de contras, las imágenes satelitales presentan una mayor factibilidad al momento de realizar un monitoreo constante de las costas.

4.1.2. Variación de la línea de costa

En base a los resultados del Capítulo 3, La playa Laguna Verde presenta una variación intra-anual en la línea de costa entre los años 2015 a 2020. Esta se presenta de manera estacional, como se observa en el análisis temporal desarrollado en el apartado 3.2.3. Estos cambios se ven reflejados en las Figuras 38 a 41, donde se observa un comportamiento de estabilidad o de un bajo desplazamiento durante el periodo estival, con ciertas anomalías que se desarrollaron durante la época primaveral. A diferencia del periodo otoño-invierno, en que se observa una variación mayor con respecto al verano. Se determinó un desplazamiento máximo de la línea de costa hacia al continente de -14 ± 3 m. Según lo estimado en el apartado 3.2.2, la bahía de Laguna Verde a presenta un nivel de erosión considerable en los últimos cinco años, cuyos factores preponderantes corresponden a la suma de los factores oceanográficos que inciden en la costa y la intervención antrópica presente en las puntas rocosas de la bahía, por sobre los factores climáticos analizados en la sección 3.2.1. Esta variación se ve reflejada en la granulometría de las arenas, específicamente en el frente de playa, zona donde cambia el tamaño de arena media durante el periodo estival a arena gruesa durante el periodo invernal, según la sección 3.1.2.

En la actualidad, no se han realizado estudios de dinámica costera en la zona de estudio. Sin embargo, Winckler et al. (2019) realizaron un catastro de las playas que han presentado alguna consecuencia asociada a la erosión en las costas de Chile Central. Los autores destacan que al menos un 80% de las playas analizadas, de un total de 33, presentan erosión durante los últimos 39 años. Los datos expuestos muestran que las playas aledañas a la estudiada presentan tasas de erosión con valores entre -0.83 m/año, en Las Torpederas, hasta valores de -2.54 m/año, en Algarrobo. Esta tendencia es concordante con los datos expuestos para la Playa Laguna Verde.

En la bahía de Laguna Verde se presentan valores de retroceso de -2.5 m/año en los sectores críticos del extremo norte, y zonas de acreción con valores de $+1.54$ m/año en las cercanías del Estero El Sauce.

Con respecto a la zona de acreción, Martínez (2007) sugiere que en la zona proximal de Concón, aledaña a la desembocadura del Río Aconcagua, se presenta la mayor variabilidad de la costa. Este caso es similar a la Playa Laguna Verde en las cercanías del Estero El Sauce, donde la línea de costa presenta una mayor movilidad en el tiempo. Parrao (2020) presenta valores de TPF máximos en la zona de desembocadura del Río Aconcagua de $+29.8$ m/año, estos resultados se replican en menor magnitud en la Playa Laguna Verde con valores máximos de $+1.5$ m/año, posiblemente esta variación se debe a la diferencia en el caudal.

Con respecto a los valores de erosión, Parrao (2020) presenta valores de TPF inmediatamente al norte de la desembocadura del Río Aconcagua con valores de erosión máximos de $-9,8$ m/año, caso similar ocurren en la Playa Laguna Verde donde se experimentan los mayores valores de erosión con una TPF de -2.5 m/año. La diferencia en los valores de TPF, se pueden deber a los rasgos geomorfológicos en los cuales se ubican estas bahías, dado que la Playa de Laguna Verde presenta una punta rocosa sur asociada a la Península Curaumilla, el cual protege a la bahía del oleaje de manera directa. La presencia de la remoción en masa en la Playa Laguna Verde, puede generar aporte de sedimento a la playa durante los periodos esporádicos de lluvia durante los meses invernales (Tabla 5) y, por ende, una baja TPF en ese sector.

Tabla 5: Tabla de precipitaciones mensuales en milímetros durante el año 2020, fuente: DGAC.

2020											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0.1	1.2	0.4	2.9	2.2	228	112.8	41.3	3.7	2.7	3	0.3

SOLO USO ACADÉMICO

4.1.2. Agentes dinámicos preponderantes en la Playa Laguna Verde

Con respecto a los datos expuestos en el Capítulo 3, sección 3.2.1, el oleaje y la marea corresponden a los agentes dinámicos que provocan los mayores cambios en la morfología, geometría de los perfiles y el tamaño del sedimento de forma enérgica a corto plazo. En este trabajo se determinó que estos agentes corresponden los factores predominantes en las costas de Chile Central, debido a la relación directa que presentan estas variables con el avance o retroceso de la línea de costa (Figura 25).

Martínez et al. (2018) señalan que las costas son afectadas por eventos climáticos extremos que generan un cambio significativo en la morfología a corto plazo. Además, añaden una mayor frecuencia de estos eventos con respecto al siglo XX y que los mismos no necesariamente se desarrollan durante los periodos invernales, más bien se generan durante gran parte del año, de manera esporádica. La Figura 42 muestra que estos eventos de alta energía no necesariamente se desarrollan durante el periodo invernal, más bien, estos se pueden desarrollar durante las estaciones primaverales inclusive veraniegas con olas que superan los 4 m de altura.

Phillips et al. (2019) indican que el tiempo de recuperación de la costa posterior a un evento de tormenta para las playas del sureste de Australia es de 2 a 3 meses, y cuyos resultados son aplicables a las costas chilenas debido a la similitud en las condiciones oceanográficas. Sobre los datos expuestos (Figura 42), se observa el desarrollo de eventos de tormenta de gran intensidad en el periodo primaveral desde los años 2015 a 2020 incluso verano, lo que provoca un retraso en la recuperación de la costa, desplazando la recuperación a fines del periodo estival o incluso la estación de otoño.

Parrao (2020) establece un patrón de avance de la línea de costa, señala que la línea de costa tiende avanzar al mar durante el verano-otoño, retrocede al continente en invierno y durante la estación primaveral presenta un estado de transición. En la Playa Laguna Verde este comportamiento se replica, pero tasas de avance o retroceso diferentes, debido a los rasgos geomorfológicos presentes en las zonas de estudios, condicionan este indicador. Además, Parrao (2020) determinó que a alturas de ola iguales o sobre 3 m la línea de costa avanza al continente, en cambio, alturas igual o menores a 2 m la línea de costa retrocede al mar. En la zona de estudio, este comportamiento es similar, pero con valores de altura de ola menores y condicionado por la altura de la marea, específicamente a valores de olas iguales o mayores a 2 m y con valores positivos de marea, la línea de costa avanza al continente, caso contrario, a alturas iguales o menores a 2 m y negativos de marea, la línea de costa avanza al mar.

4.1.3. Efectos antrópicos en la Playa Laguna Verde

Los cálculos de erosión de la Playa Laguna Verde registrados en la sección 3.2.2, están distribuidos espacialmente en sectores específicos (Figura 42). Estos se ubican en la zona sur, cercanos a la planta hidroeléctrica, y en la zona norte, que se ubica cercana a casas. Esta tendencia puede estar vinculada a procesos que aceleran la erosión de la playa o la delimitación de la costa con obras públicas. Sin embargo, en la zona de desembocadura del estero El Sauce existe acreción de la costa,

donde hay menor intervención humana y con un índice de naturalidad mayor, respecto a las primeras zonas.

Rojas et al. (2015) mencionan que los ambientes lacustres cercanos a la costa con una menor perturbación, corresponden a los sectores protegidos o ubicados en una reserva natural, lo cual impide el asentamiento de humanos en las cercanías. En el caso de la bahía de Laguna Verde, la erosión se expresa en las zonas con mayor intervención humana (Figura 42). Esta zona de acreción puede estar asociada a eventos esporádicos de lluvias durante el mes de junio hasta agosto, lo que genera la apertura de la barra y la recarga en dicho punto (Tabla 6), lo que explicaría el cambio de granulometría desde el periodo estival al invernal.

Tabla 6: Tabla de precipitación promedio mensual en milímetros desde el 2015 hasta 2020, fuente: DGAC.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Enero	4.7	6.5	0.1	1.6	0.5	0.1
Febrero	1.1	0	0.3	0.2	3.1	1.2
Marzo	5	2.7	1.2	0.8	1.9	0.4
Abril	1	123.4	5.5	1.2	2.8	2.9
Mayo	2.7	48.8	113.8	38.4	12	2.2
Junio	1	45.8	212	88.2	85.6	228
Julio	68.7	125.8	50.3	89.1	8.4	112.8
Agosto	226.2	0.2	132.7	13.3	0.4	41.3
Septiembre	99.2	3.5	22.9	16.3	1.5	3.7
Octubre	100.9	18.3	48.4	8	0.3	2.7
Noviembre	0.3	0.4	5.5	0	0.9	3
Diciembre	0.1	16.9	3.7	0	0	0.3

Incluso Ataol et al. (2019) mencionan las consecuencias que experimenta la zona costera posterior a la implementación de obras de ingeniería de riego, como el caso de las obras del Embalse La Luz, el cual retiene sedimentos y agua, interrumpiendo el flujo natural de estos. A la falta de datos de caudal cercano a la zona de estudio, se sugiere que el embalse generaría un cambio en las condiciones hidrológicas y morfológicas en la playa de Laguna Verde, el cual limita el aporte de sedimento desde el continente hacia la zona costera, a su vez, la recuperación posterior a eventos de marejada.

5. Conclusiones

Se determinó la dinámica costera intra-anual de la playa Laguna Verde en la región de Valparaíso, en los últimos cinco años, mediante sensores remotos y perfiles de playa, con una tendencia de erosión sostenida en el tiempo.

Se midió los cambios morfológicos de la playa a partir de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 y perfiles transversales a partir de 115 líneas de posiciones de línea de costa. La disposición de imágenes satelitales permitió la delimitación de la posición de la línea de costa y la cuantificación estadística de sus cambios en el periodo de tiempo analizado, mostrándose como una herramienta de gran estabilidad en cuanto a su comparabilidad, escalas y periodos de revisita.

El uso de enfoques de teledetección y la disponibilidad de datos históricos pueden superar la ausencia de estudios de campo *in situ*. Por lo tanto, el seguimiento multitemporal y el análisis de las costas son vitales para comprender los procesos dinámicos que están sucediendo en todas las costas de la región.

Con estas imágenes se pudo cuantificar las tasas de erosión costera que afectan el área de estudio, determinado las áreas donde hay más problemas de erosión, así como el comportamiento dinámico del perfil de la playa ante eventos extremos.

El estudio revela la naturaleza dinámica de la zona costera, mostrando un comportamiento cíclico definido por las temporadas de verano-invierno, donde las tasas de erosión y la acreción varían en función de las temporadas. En general durante el verano-otoño este avanza hacia el mar, caso opuesto durante el invierno que avanza al continente y de manera transicional durante la primavera. La presencia de eventos extremos genera un retroceso significativo de la línea de costa sin estar relacionado a una estación del año, más bien de manera aleatoria.

Se identificó cambios significativos en la playa dados por fenómenos climáticos extremos durante la revisita de los satélites entre el año 2015 a 2020, evidenciando al menos 5 eventos de tormenta por sobre el PSU estimado en 3.58 m.

Se identificó que, a alturas iguales o mayores a 2 m y valores de marea positivos, la línea de costa se desplaza hacia el continente, en cambio, a alturas de oleaje iguales o menores a 2 m y valores negativos de marea, la línea de costa se desplaza hacia el mar.

Se identificaron los diversos agentes dinámicos involucrados que corresponden al oleaje y la altura de la marea que influyen en el frente de playa principalmente, como a su vez, el curso fluvial que influye en la desembocadura del Estero El Sauce.

El litoral, es un indicador del balance de sedimentos, la playa Laguna verde está dominado por el clima del oleaje, provocando los mayores cambios en la morfología, geometría de los perfiles y el tamaño del sedimento de forma enérgica a corto a lo largo de la costa.

En este estudio se identificaron los procesos de saltación y tracción de la playa asociados a eventos de gran energía, que corresponden a marejadas o la descarga del estero por lluvias intensas esporádicas.

Existe actualmente evidencia climática de disminución de precipitaciones hasta un 40% en las secciones altas de las cuencas que aportan sedimentos a la costa, pero no se han cuantificado los impactos en cuanto a la recarga de sedimentos a los litorales arenosos producto de la sequía.

La metodología presentada en este trabajo es muy importante para comprender la geomorfología costera activa y puede considerarse una herramienta de gestión para ayudar a los planificadores urbanos costeros en la gestión y manejo de la zona costera.

SOLO USO ACADÉMICO

6. Bibliografía

- Abuodha, P., & Woodroffe, C. (2010). Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: A case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*, 14, 189–205. <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0097-0>
- Acciarri, A., Bisci, C., Cantalamessa, G., & Di Pancrazio, G. (2016). Anthropogenic influence on recent evolution of shorelines between the Conero Mt. and the Tronto R. mouth (southern Marche, Central Italy). *Catena*, 147, 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.018>
- Araya Vergara, J. (1971). Determinación preliminar de las características del oleaje en Chile Central. *Noticiario Mensual Del Museo Nacional de Historia Natural*, 174, 8–12.
- Araya Vergara, J. (1982). Analisis de la Localizacion de los Procesos Litorales. *Informaciones Geográficas*, 29, 35–55. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2013.27671>
- Araya Vergara, J. (1983). Influencias morfogeneticas de los desalineamientos y lineas de costa contrapuestas en el litoral de Chile Central. *Informaciones Geograficas*, 30, 3–23. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.1983.27674>
- Araya Vergara, J. (1986). Toward a classification of beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 2, 159–165.
- Araya Vergara, J. (2003). Morfogénesis de la ensenada en zeta y de la terraza estuarial asociada en Pichilemu: prototipo para Chile Central. *Investigaciones Geográficas*, 37, 41. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2003.27747>
- Ataol, M., Kale, M., & Tekkanat, İ. (2019). Assessment of the changes in shoreline using digital shoreline analysis system: a case study of Kızılırmak Delta in northern Turkey from 1951 to 2017. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8591-7>
- Blott, S., & Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Developments in Water Science*, 26(C), 1237–1248. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(08\)70015-7](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(08)70015-7)
- Boak, E., & Turner, I. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Briceño, I., Sánchez, E., Pardo-Pascual, J., Palomar-Vázquez, J., Ugalde, R., Aguirre, C., Vidal, P., & Pérez, W. (2021). CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES COSTEROS CON IMÁGENES LANDSAT 8 Y SENTINEL 2 (2015-2019) EN CHILE CENTRAL; PLAYA REÑACA, BAHÍA DE CONCÓN Y BAHÍA DE ALGARROBO. 7–8.
- Cabezas, C., Almonacid, J., Pardo, J., & Soriano, J. (2017). Variabilidad De La Línea De Costa a Partir De Imágenes De Satélite Y Su Relación Con La Textura Del Sedimento. *Primer Congreso En Ingeniería Geomática.*, 1, 153–161. <https://doi.org/10.4995/cigeo2017.2017.6628>
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. (2007). *Tectonostatigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile* (T. TORENO & W. GIBBONS (eds.)). The Geological Society.
- CR2. (2010). *Informe a la Nación. La Mega-Sequia 2010–2015: Una Lección Para el Futuro. November*, 26. www.cr2.cl/megasequia

- Davis, R., & Duncan, F. (2004). *Beaches and Coasts* (T. B. Press (ed.); 1º Edition). Blackwell Science Ltd. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Díaz, J., & Frutos, J. (2010). GEOLOGÍA MARINA DE CHILE. In J. Díaz-Naveas, P. U. C. de Valparaíso, J. Frutos, & S. N. de G. y M. de Chile (Eds.), *Geología Marina de Chile*. Comité Oceanográfico Nacional (CONA).
- Emery, K. (1959). A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography*, *6*, 90–93. <https://doi.org/10.4319/lo.1961.6.1.0090>
- Fernández, E., Caló, J., Marcos, A., & Aldacour, H. (2004). Interrelación De Los Ambientes Eólico Y Marino a Través Del Análisis Textural Y Mineralógico De Las Arenas De Monte Hermoso, Argentina. *AAS Revista*, *10*(2003), 1–12.
- Figueroa, R., Negrete, J., & Mansilla, P. (2008). La gestión de los espacios frágiles costeros de la región de Valparaíso. Diagnóstico de su gestión y propuestas conceptuales. *Revista Geográfica de Valparaíso*, *41*, 42–61. <https://doi.org/http://www.rgv.ucv.cl/rgv41.html>
- Gana, P., Wall, R., & Gutiérrez, A. (1996). *Mapa geológico del área de Valparaíso - Curacavi* (p. 20). Servicio nacional de geología y minería.
- Garreaud, R. (2018). Tres niños sorprendentes. *Boletín Técnico Instituto de Geofísica Del Perú (IGP)*, *5*, 5–9.
- Harley, M. D., Kinsela, M. A., Sánchez-García, E., & Vos, K. (2019). Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images. *Coastal Engineering*, *150*(September 2018), 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.003>
- Ionian Adriatic. (2015). Climate Change on Coastal Zones. *Med Maritime Integrated Project*, 1–3.
- Kale, S., & Acarli, D. (2019). Shoreline Change Monitoring in Atikhisar Reservoir By Using Remote Sensing and Geographic Information System (Gis). *Fresenius Environmental Bulletin*, *28*, 4329–4339.
- Lea, J. (2018). The Google Earth Engine Digitisation Tool (GEEDiT) and the Margin change Quantification Tool (MaQiT) – Simple tools for the rapid mapping and quantification of changing Earth surface margins. *Earth Surface Dynamics*, *6*, 551–561. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-551-2018>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2012). Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones Geográficas*, *56*(44), 41. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2012.26408>
- Martínez, C. (2007). Shoreline changes in Concón and Algarrobo bays, central Chile, using an adjustment model. *Investigaciones Marinas*, *35*, 99–112. <https://doi.org/10.4067/S0717-71782007000200010>
- Martínez, C., Contreras, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., & Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard? *Ocean and Coastal Management*, *156*, 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011>
- Martínez, C., & Cortez, C. (2007). Características hidrográficas y sedimentológicas en el estuario del río Aconcagua, Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, *74*, 63–74. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022007000100005>

- Martínez, C., & Cortez, C. (2008). Características geomorfológicas del estuario Aconcagua, Chile central, entre 1877 y 2001. *Revista Geografica de Valparaiso*, 41, 14–26. <https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/283421265>
- Martínez, C., & Salinas, S. (2009). Morfodinámica y evolución reciente de playa Tunquén, Chile central. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(1), 203–215. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572009000100021>
- Mentaschi, L., Vousdoukas, M., Pekel, J., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Mishra, M., Chand, P., Pattnaik, N., Kattel, D., Panda, G., Mohanti, M., Baruah, U., Chandniha, S., Achary, S., & Mohanty, T. (2019). Response of long- to short-term changes of the Puri coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. *Environmental Earth Sciences*, 78(11), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8336-7>
- Ojeda, J., & Cabrera, A. (2006). Utilidades y funcionalidades de un visor tridimensional interactivo en la gestión litoral (SIGLA: Sistema de información geográfica del litoral de andalucía). *Cuadernos Geográficos*, 39, 41–52. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v39i0.1499>
- Ojeda, J., Fraile, P., Álvarez, J., & Martín, D. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica.*, 9, 83–100. <https://doi.org/http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/162>
- Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., & Sánchez-García, E. (2018). SHOREX : a new tool for automatic and massive extraction of shorelines from LANDSAT AND SENTInel 2 imagery. *Proceedings of the 7 Th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port (Coastlab18)*, 7, 1–8.
- Parrao, M. (2020). *Dinámica costera intraanual mediante sensores remotos y patrones morfosedimentarios de la bahía de Concón, Chile Central* (p. 117). Universidad Mayor.
- Phillips, M., Blenkinsopp, C., Splinter, K., Harley, M., & Turner, I. (2019). Modes of Berm and Beachface Recovery Following Storm Reset: Observations Using a Continuously Scanning Lidar. In *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (Vol. 124, Issue 3). <https://doi.org/10.1029/2018JF004895>
- Qiao, G., Mi, H., Wang, W., Tong, X., Li, Z., Li, T., Liu, S., & Hong, Y. (2018). 55-year (1960–2015) spatiotemporal shoreline change analysis using historical DISP and Landsat time series data in Shanghai. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68(2), 238–251. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.009>
- Rajganapathi, V. C., Jitheshkumar, N., Sundararajan, M., Bhat, K. H., & Velusamy, S. (2013). Grain size analysis and characterization of sedimentary environment along Thiruchendur coast, Tamilnadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(12), 4717–4728. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0709-0>
- Rojas, C., Sepúlveda, E., Barbosa, O., Rojas, O., & Martínez, C. (2015). Patrones de urbanización en la biodiversidad de humedales urbanos en Concepción metropolitano. *Revista de Geografía*

- Norte Grande*, 2015(61), 181–204. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022015000200010>
- Sánchez-Arcilla, A., & Jiménez, J. (1994). Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería Del Agua*, 1(2), 97–114. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2639>
- Sarricolea, P., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2016). Sequías en Chile central a partir de diferentes índices desde 1824. *Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio, September*, 387–395. <https://doi.org/10.14198/xcongresoacalicante2016-36>
- Short, A., & Jackson, D. (2013). Beach Morphodynamics. *Treatise on Geomorphology*, 10(10), 106–129. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00275-X>
- Talavera, L., Del Río, L., Benavente, J., Barbero, L., & López-Ramírez, J. (2018). UAS as tools for rapid detection of storm-induced morphodynamic changes at Camposoto beach, SW Spain. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5550–5567. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1471549>
- Thornburg, T. (1985). Mineralogy and provenance of Chile trench sands. *IV Congreso Geológico Chileno*, 4, 569–590.
- Valenzuela, E., Reyes, E., & Vergara, H. (1979). Petrología sedimentaria del litoral y la plataforma continental de Valparaíso, V región. *Congreso Geológico Chileno*, 2, 1101–1121.
- Vos, K., Harley, M., Splinter, K., Simmons, J., & Turner, I. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Winckler, P., Contreras, M., Vicuña, S., Larraguibel, C., Mora, J., Esparza, C., Salcedo, J., Gelcich, S., Fariña, J., Martínez, C., Agredano, R., Melo, O., Bambach, N., Morales, D., Marinkovic, C., & Pica, A. (2019). *Resumen ejecutivo*, en “*Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile.*”
- Wright, L., & Short, A. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56, 93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)

7. Anexo

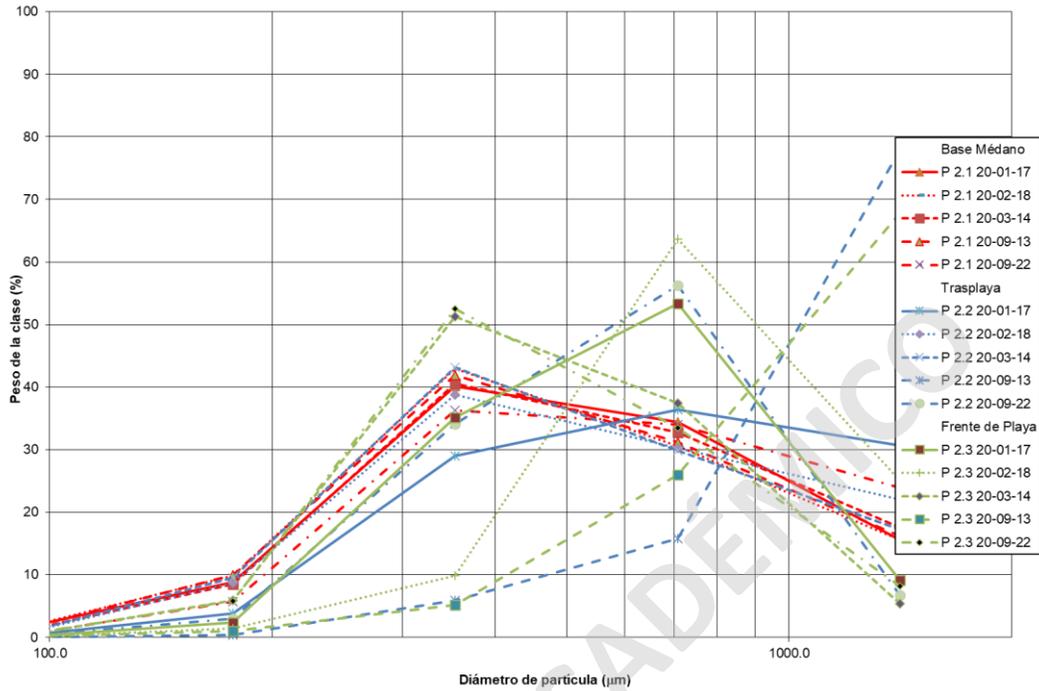


Figura 39: Gráfico de frecuencia del perfil 2, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

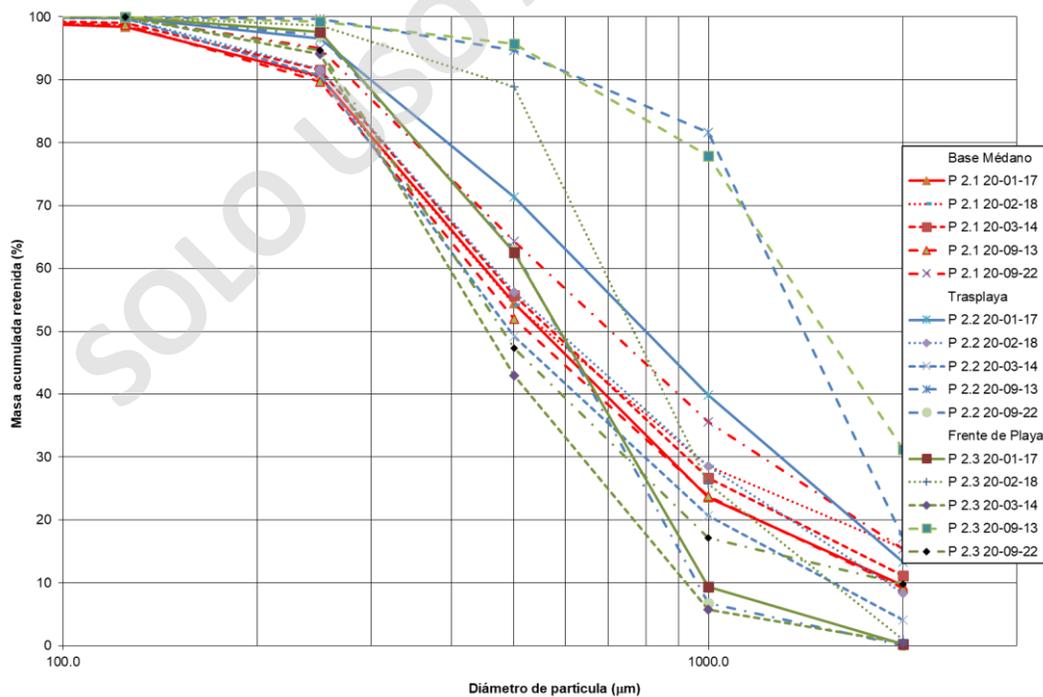


Figura 40: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 2, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

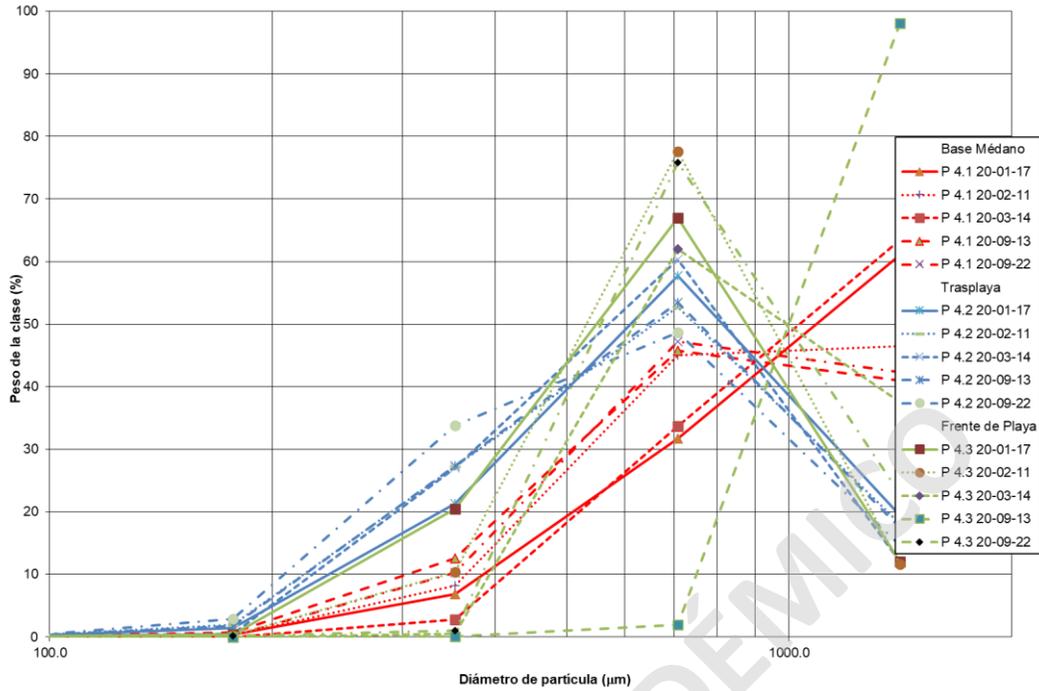


Figura 41: Gráfico de frecuencia del perfil 4, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.

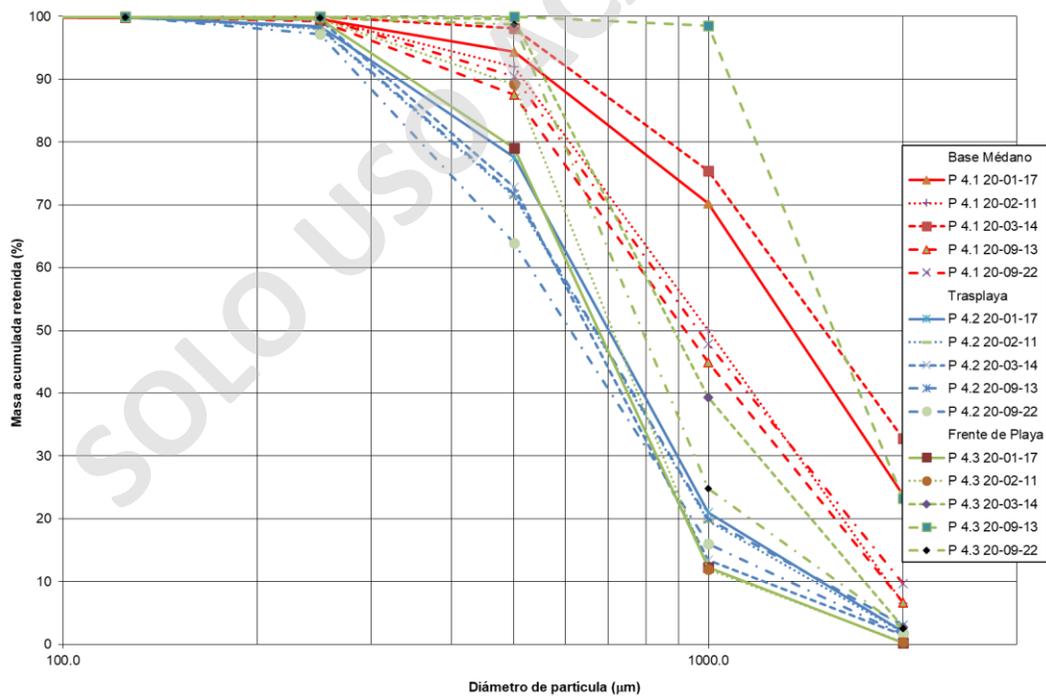


Figura 42: Gráfico de frecuencia acumulada del perfil 4, muestras 1, 2 y 3, que comprende entre los meses de enero a septiembre del año 2020.