

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLAYA PUNTA LOBOS, PICHILEMU, ¿UNA CONSECUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA?

DANIEL EDUARDO ROJAS ITURRA

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Noviembre de 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLAYA PUNTA LOBOS, PICHILEMU, ¿UNA CONSECUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA?

Memoria de Título presentada por
DANIEL EDUARDO ROJAS ITURRA

Como requisito parcial para optar al título de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Dr. Patricio Andrés Catalán Mondaca

Noviembre de 2022

TÍTULO DE LA TESIS

**EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLAYA PUNTA LOBOS,
PICHILEMU, ¿UNA CONSECUENCIA DE LA VARIABILIDAD
CLIMÁTICA?**

AUTOR

DANIEL EDUARDO ROJAS ITURRA

MEMORIA DE TITULO, presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Dr. Patricio Catalán Mondaca _____

*Es por la lógica que
demostramos, pero por la intuición que descubrimos.*

Henri Poincaré



Agradecimientos

Me gustaría comenzar agradeciendo a mi madre Lilian, mi tía María Elena y mi tía Marlene y Stefan, quienes han sido las personas que me han apoyado en todo momento en mi proceso educativo, donde inicié mi enseñanza media en el liceo público A-45 José Victorino Lastarria, establecimiento educacional que me otorgó todas las herramientas para continuar mis estudios superiores con una perspectiva científica en la Universidad de Valparaíso y en la carrera de Ingeniería Civil Oceánica.

Quiero agradecer a mi hermano Ignacio por su energía transmitida, su motivación y ganas de estudiar ingeniería fue fundamental para mi ingreso al plan de magister, donde compartimos experiencias, estudios y consejos.

A mis amigos Luciano, Arturo, Max, Nacho, Jimmy por el constante apoyo en el proceso, el cual se vio afectado directamente por las restricciones de movilidad a causa de la pandemia Covid-19. Las videollamadas en los meses de cuarentena fueron esenciales para el soporte emocional y anímico.

Me gustaría agradecer a mi compañero de postgrado y ex compañero de trabajo, Pablo, con quien abordamos esta hazaña de trabajar y estudiar a la vez. Fueron muchas las ocasiones donde el café fue nuestro mejor amigo y el ventanal del departamento nuestra pizarra. También conmemorar esos completos a la hora de almuerzo y los partidos de tenis después de la jornada, que sin duda marcaron nuestra estadía universitaria.

A mis amigos, César, Rodrigo y Edu, que siempre tuvieron la disposición de conversar y debatir temas científicos e ingenieriles, que de acuerdo a sus experiencias, me proporcionaron nuevas perspectivas de solución a los problemas.

A Carolina y Kiki, quienes han sido mi familia, compañera y amigo en estos años, entregando un soporte emocional y de amor incondicional en el proceso de magister. Su apoyo y cariño han sido fundamentales en el desarrollo y culminación de esta.

A mi tutor y profesor guía Patricio Catalán, quien desde el comienzo del magister, me apoyó en la idea de estudiar y profundizar el área de ingeniería de costas. Un gran y excelente docente, con quien aprendí de manera muy pedagógica los temas a tratar, con una tremenda disposición a solucionar problemas no solo en lo académico sino también en lo personal. Agradecer también por la constante motivación y por aventurarse a descubrir e indagar tópicos poco desarrollados.

Agradecer al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) por conceder la batimetría del sector de Punta Lobos Pichilemu y por el alojamiento dentro de sus servidores para las modelaciones numéricas de oleaje.

Finalmente agradecer a todas las personas que de cierta manera me apoyaron y me dieron buenas energías para culminar este proceso universitario.

Contenido

1.	Introducción	11
2.	Estado del Arte	12
2.1	Cambios Morfodinámicos En Playas Del Mundo	12
2.2	Erosión Costera en Chile	13
2.3	Metodologías Empleadas En La Determinación De Líneas De Costa	17
3.	Objetivos	19
4.	Metodología	20
4.1	Introducción	20
4.2	Determinación Línea de Costa mediante CoastSat	20
4.3	Modelación numérica de oleaje mediante Simulating Waves NearShore (SWAN)	27
4.3.1	Modelo de Elevación Batimétrica	27
4.3.2	Nodo espectral de oleaje en Aguas Profundas	31
4.3.3	Implementación Simulating Waves NearShore (SWAN)	32
4.3.4	Calibración y validación del modelo SWAN	34
4.4	Línea de costa	37
4.5	Caracterización factores oceanográficos	39
4.5.1	Oleaje	39
4.5.2	Temperatura Superficial del Mar y Nivel del Mar	41
4.6	Caracterización factores meteorológicos e hidrológicos	42
4.7	Caracterización factores geofísicos	44
4.8	Caracterización factores meteorológicos de escala global	44
4.9	Modelo lineal múltiple	46
5.	Resultados	48
5.1	Introducción	48
5.2	Variación líneas de costas	48
5.2.1	Playa Punta Lobos	48
5.2.2	Tasa de Volumen de Sedimentos en Playa Punta de Lobos	50
5.2.3	Relación de Playa Punta Lobos y Cahuil	51
5.2.4	Playa Punta Lobos y su relación con ONI y PDO	52
5.2.5	Relación Línea de Costa, NM y TSM	54

5.2.6	Relación Línea de Costa y caudales de ríos medios mensuales	55
5.2.7	Relación Línea de Costa y deformación vertical por sismo	57
5.3	Resultados Modelación Numérica de Oleaje	58
5.4	Correlación línea de costa	61
6.	Discusión	64
6.1	Análisis de Varianzas Factorial (ANOVA)	66
7.	Conclusiones	71
8.	Referencias	73
9.	Anexo A	81
9.1	Archivo espectral nodo aguas profundas	81
9.2	Archivo entrada modelo SWAN	83
9.3	Modelo Regresión Lineal Múltiple	84

Índice de Figuras

Figura 1: Erosión costera en playa Punta Lobos, Pichilemu (6 noviembre 2020).	14
Figura 2: Principales caudales en los ríos de Chile Central.	15
Figura 3: Aportes de sedimentos en la costa de Chile Central el 15.julio 2016 (Aqua-MODIS) ...	16
Figura 4: Utilización de videos remotos y fotografías en playas para determinar líneas de costa. 18	
Figura 5: Determinación Línea de Costa mediante CoastSat en Punta Lobos.	20
Figura 6: Predicción y observación de Nivel del Mar en Estación del Nivel del Mar de Bucalemu (SHOA).....	21
Figura 7: Niveles de marea al momento de adquisición de imágenes.....	22
Figura 8: Trazado de perfiles transversales para obtención de Línea de Costa en Punta Lobos.....	23
Figura 9: Series de tiempo de las Líneas de Costa, obtenidas por CoastSat en Punta Lobos.	24
Figura 10: Trazado de perfiles transversales para obtención de Línea de Costa en Cahuil.	25
Figura 11: Determinación Línea de Costa mediante CoastSat en Cahuil.....	25
Figura 12: Series de tiempo de las Líneas de Costa, obtenidas por CoastSat en Cahuil.....	26
Figura 13: Perfiles transversales en Punta Lobos y Pichilemu.....	26
Figura 14: Recopilación de datos batimétricos.	28
Figura 15: Determinación de isobatas por medio de perfiles de equilibrios.	29
Figura 16: Malla computacional triangular no estructurada para modelo de oleaje.	30
Figura 17: Grilla computacional y detalle de Condiciones de Borde.....	31
Figura 18: Ubicación Nodo Espectral, otorgado por MMA (2019).	32
Figura 19: Puntos de Extracción de oleaje mediante modelo SWAN.....	33
Figura 20: Datos de salida, modelo SWAN con grilla No estructurada.....	34
Figura 21: Ubicación ADCP y punto de Validación.	35
Figura 22: Calibración modelo SWAN.	36
Figura 23: Cantidad imágenes por proyecto satelital.	37
Figura 24: Histograma de imágenes satelitales obtenidas por CoastSat.	37
Figura 25: Variabilidad de Línea de Costa en perfil 7.	38
Figura 26: Cálculo área entre perfiles.....	39
Figura 27: Ubicaciones geográficas de ENM.....	41
Figura 28: Derechos de agua VI Región en caudales medio anual.	42
Figura 29: Derechos de agua VII Región en caudales medio anual.....	43
Figura 30: Ubicación Estaciones Fluviométricas.	43
Figura 31: Índice ONI y PDO.	45
Figura 32: Variación métrica de la playa Punta Lobos luego de 21 años.	49
Figura 33: Variación temporal mensual de la Playa de Punta Lobos.....	49
Figura 34: Variación de volumen en playa Punta de Lobos.....	50
Figura 35: Variación de volumen en playa Punta de Lobos por diferencia entre perfiles.	51
Figura 36: Series de tiempo de Punta Lobos, Cahuil y diferencial.	52
Figura 37: Comparación Líneas de Costas con índices ONI y PDO.....	53
Figura 38: Comparación Líneas de Costas e índices ONI.....	53
Figura 39: Línea de costa y la relación con NM y TSM.	54

Figura 40: Línea de costa de Punta Lobos y caudales medios mensuales.....	55
Figura 41: Embalses de Chile (círculos rojo) y estaciones de la DGA.	56
Figura 42: Línea de costa de Punta Lobos y caudales medios diarios.	57
Figura 43: Deformación vertical en Pichilemu, posterior al 27 febrero de 2010.	58
Figura 44: Variación anomalías de oleaje con Línea de Costa de Punta de Lobos.....	59
Figura 45: Tasa de cambio de volumen y variables de oleaje con Línea de Costa de Punta de Lobos.	60
Figura 46: Peralte de la ola Ho/Lo en playa Punta Lobos.	60
Figura 47: Coeficientes de Correlación R para todas las variables y combinaciones.	62
Figura 48: Error cuadrático medio para todas las variables y combinaciones.	63
Figura 49: Predicción modelo lineal.....	63
Figura 50: Pluma de sedimentos en Río Maipo, año 2016.	65
Figura 51: Predicción modelo lineal para distintos tramos.	68
Figura 52: Predicción modelo lineal general v/s Predicción modelo lineal por tramos.	68
Figura 53: Valores p para cada tramo mediante ANOVA.....	69
Figura 54: Valores p para modelo general mediante ANOVA.	70
Figura 55: Diagrama de Taylor: Caudales.....	86
Figura 56: Predicción regresión lineal: Caudales.	86
Figura 57: Diagrama de Taylor: Oleaje.....	87
Figura 58: Predicción regresión lineal: Oleaje.	87
Figura 59: Diagrama de Taylor: NM.....	88
Figura 60: Predicción regresión lineal: NM.	88
Figura 61: Diagrama de Taylor: TSM.	89
Figura 62: Predicción regresión lineal: TSM.	89
Figura 63: Diagrama de Taylor: PDO-ONI.....	90
Figura 64: Predicción regresión lineal: PDO-ONI.	90
Figura 65: Diagrama de Taylor: Combinación N°1.....	91
Figura 66: Predicción regresión lineal: Combinación N°1.....	91
Figura 67: Diagrama de Taylor: Combinación N°2.....	92
Figura 68: Predicción regresión lineal: Combinación N°2.....	92
Figura 69: Diagrama de Taylor: Combinación N°3.....	93
Figura 70: Predicción regresión lineal: Combinación N°3.....	93
Figura 71: Diagrama de Taylor: Combinación N°4.....	94
Figura 72: Predicción regresión lineal: Combinación N°4.....	94
Figura 73: Diagrama de Taylor: Combinación N°5.....	95
Figura 74: Predicción regresión lineal: Combinación N°5.....	95
Figura 75: Diagrama de Taylor: Combinación N°6.....	96
Figura 76: Predicción regresión lineal: Combinación N°6.....	96
Figura 77: Diagrama de Taylor: Combinación N°7.....	97
Figura 78: Predicción regresión lineal: Combinación N°7.....	97
Figura 79: Diagrama de Taylor: Combinación N°8.....	98
Figura 80: Predicción regresión lineal: Combinación N°8.....	98
Figura 81: Diagrama de Taylor: Combinación N°9.....	99

Figura 82: Predicción regresión lineal: Combinación N°9.....	99
Figura 83: Diagrama de Taylor: Combinación N°10.....	100
Figura 84: Predicción regresión lineal: Combinación N°10.....	100



1. Introducción

La zona costera, lugar de transición entre la tierra y el mar, presenta los mayores porcentajes de densidad poblacional en Chile, debido a sus importantes actividades económicas, turísticas y de transporte (Martínez *et al.*, 2019). Tal concentración genera una mayor vulnerabilidad ante eventos extremos, principalmente debido a que el cambio climático afectará al oleaje en al menos el 50% de las costas del mundo y podría conducir a un cambio mayor en los procesos y amenazas costeras (Morim *et al.*, 2019). A medida que las comunidades costeras continúan enfrentando los desafíos al cambio global, existe una necesidad creciente de comprender mejor los cambios locales, regionales y globales en los fenómenos naturales. Entre ellos, el cambio de la posición de la línea de costa y la erosión aparente, han cobrado importancia a nivel nacional y mundial.

Existe la percepción de que las playas de Chile están experimentando procesos erosivos. En 2019, un estudio de 35 playas en la zona central del país indicó que el 80% de ellas se encuentran con distintos niveles de erosión (MMA, 2019). Si bien en la literatura reciente se ha mencionado que los efectos del cambio climático podrían ser importantes en el contexto de la influencia del oleaje sobre los procesos de erosión debido, por ejemplo a la mayor frecuencia en eventos oceánicos extremos como las marejadas (Martínez *et al.*, 2018), los análisis realizados a la fecha han tendido a enfocarse solo en la importancia del oleaje. Esto podría dejar de lado otros efectos oceanográficos, tectónicos, y eventualmente, antrópicos.

Para atender esta aparente deficiencia, en esta investigación se propone evaluar la variabilidad de la línea de costa de Punta Lobos durante 21 años, analizando las correlaciones existentes con una muestra extendida de variables, tales como posibles forzantes oceanográficos, meteorológicos de escala global como el fenómeno de El Niño-Niña, hidrológicos asociados al transporte de sedimentos fluviales afectados por la Mega Sequía en Chile Central (Garreaud *et al.*, 2019) y tectónicos por efectos de deformación vertical post terremoto (Soto *et al.*, 2015).

Una de las interrogantes de la comunidad científica al día de hoy es lograr identificar qué factores climáticos son los que afectan directamente al comportamiento de las líneas de costa. Esta investigación pretende, adicionalmente, dar inicio a respuestas globales en los procesos erosivos de las playas y asociarlas a escalas sistémicas que pueden presentar un desfase espacial entre ellas y lograr comprender su evolución en el futuro, permitiendo reducir el riesgo de desastres y optimizar procesos de planificación territorial en la zona costera.

2. Estado del Arte

2.1 Cambios Morfodinámicos En Playas Del Mundo

En las últimas décadas la evolución del clima podría haber acelerado el aumento en el nivel del mar y eventos extremos como tormentas lo que, combinado con el desarrollo e infraestructura en la zona costera, producirá un mayor estado de vulnerabilidad en los sistemas físicos, ecológicos y humanos (Barnard *et al.*, 2021). Las playas son la zona de interacción entre la interfaz de la tierra y el océano, son pobladas por más de un tercio de la población mundial con un alto valor socioeconómico; sin embargo, su presencia se ve constantemente modificada por factores meteorológicos, geológicos y antropogénicos (Vousdoukas *et al.*, 2020).

Luijendijk *et al.*, (2018) indican que el 24% de las playas de arena del mundo, al año 2016, se encuentran en proceso erosivo a tasas superiores a 0.5 [m] por año, mientras que el 28% se está progradando y 48% permanece estable. Por su parte Vousdoukas *et al.*, (2020), indica que una proporción sustancial de costas arenosas del mundo ya se encuentran en erosión, situación que se ve agravada por el cambio climático, asociado a cambios en los patrones climatológicos de huracanes, ciclones tropicales, extratropicales, tormentas y tifones. Morim *et al.*, (2019), establece que aproximadamente el 50% de la costa mundial se encuentra en riesgo por el clima de olas y podría generar importantes cambios en los procesos y riesgos costeros, por lo que el clima global de oleaje es fundamental para comprender los impactos generados en la zona costera. Así, la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2021), indica que para establecer una línea base en la detección del cambio climático, es necesario incluir variables marinas como oleaje, nivel del mar, temperatura superficial del mar, salinidad y hielo marino.

Las olas generadas por viento, presentan un rol primordial en la dinámica del nivel del mar y el cambio en la línea de costa. Las costas arenosas son particularmente vulnerables a las fluctuaciones en la energía de las olas que producen ciclos de erosión y acreción en distintas escalas de tiempo, ya sean en corto, mediano y largo plazo. Las escalas interanuales, o de largo plazo, se encuentran relacionadas con el clima de la Tierra y modos internos de variabilidad climática. Cambios en los patrones climáticos en conjunto con cambios en las tormentas y nivel del mar, exacerbará la erosión costera. Por ejemplo, Vos *et al.*, (2021) indica que en la Cuenca del Pacífico, El Niño / Oscilación del Sur (ENOS) es el modo dominante de la variabilidad climática interanual y afecta a los procesos atmosféricos y oceánicos de las regiones costeras que influyen al clima de olas, anomalías del nivel del mar y factores hidrológicos como la descarga de ríos. La literatura indica que los cambios en las costas de la Cuenca del Pacífico varían en mayor magnitud a causa de El Niño / Oscilación del Sur, pero en algunas zonas es menos claro, lo que indica potenciales influencias locales, como orientación costera, exposición, morfología, suministro de sedimentos, tormentas, hidrodinámica (Barnard *et al.*, 2015) y aspectos tectónicos. Por ejemplo, Ward *et al.*, (2010) indica que los caudales de todo el mundo se ven afectados a causa del ENOS y que la gran mayoría de los problemas naturales y sociales asociados a los efectos ENOS en los flujos del río, se perciben en eventos extremos como inundaciones y sequías. Estos eventos

afectan directa o indirectamente a los aportes sedimentarios fluviales a la zona costera, observando ciclos de erosión y acreción dependiendo de la magnitud de la anomalía.

Respecto de la componente tectónica, los terremotos, ya sean por subducción o corticales, generan cambios verticales en la zona costera, principalmente en las playas, ya que pueden presentar estados de hundimiento como de alzamiento, modificando la línea de costa de manera abrupta (Martínez *et al.*, 2015). La subducción se genera por el contacto interplaca donde una placa oceánica se hunde bajo una placa continental provocando un alzamiento cosísmico en la zona cercana a la fosa, mediante una compresión horizontal y un hundimiento en zonas lejanas a la fosa. Las deformaciones verticales dependen de la inclinación del plano de subducción y de la profundidad de la zona de ruptura, por lo que si la ruptura es más superficial, la distancia normal a la fosa entre alzamientos y subsidencias será menor, (Quezada *et al.*, 2010). McSaveney *et al.*, (2006), establece que debido al alzamiento costero producto de un sismo de magnitud de momento 8.2 produjo alzamiento de hasta casi 7 [m] en las costas de la isla norte de Nueva Zelanda. Por otro lado Kitamura *et al.*, (2019) indica que debido a alzamientos costeros, existen cambios en la cantidad de sedimentos de una playa.

Así, los terremotos por subducción son una causa relevante en las deformaciones verticales en zonas cercanas a la fosa que podrían generar cambios en los procesos erosivos o progradación en las playas. Los países que se encuentran en el Cinturón del Fuego del Pacífico son las localidades que se encuentran más vulnerables a eventos sísmicos y a desplazamientos verticales en zonas costeras, como es el caso de Chile, el que presenta una actividad anual al año 2020 de 7826 sismos (CSN, 2021).

2.2 Erosión Costera en Chile

Las playas en Chile constituyen un factor primordial en el desarrollo económico de la zona costera como el turismo y además conforman una zona de protección natural ante eventos extremos como las marejadas en diferentes épocas del año (Martínez *et al.*, 2019). Las playas son estados morfodinámicos que dependen de la disponibilidad de sedimento y geología local como de diversas forzantes que las modifican, tales como oleaje, nivel del mar, temperatura superficial del mar, tsunamis, etc. El cambio climático juega un rol primordial debido a que modificará varias de estas variables oceanográficas y climatológicas y podría variar el nivel del mar y las líneas de costa. Los efectos antropogénicos pueden suponer cambios en las playas debido a la extracción de áridos, construcción de embalses aguas arriba de los ríos que desembocan en zonas costeras o al diseño de obras de protección costera que obstaculicen la deriva litoral (Cappucci *et al.*, 2020).

Existe la percepción que las playas en Chile se están erosionando y que sus principales factores forzantes son el oleaje, el cual se podría ver modificado por el Cambio Climático. El aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas, una redireccionalidad hacia el sur del oleaje y el cambio en el nivel del mar, podrían generar tendencias erosivas en las playas (Gomez *et al.*, 2018). Por su parte existen estudios que indican que el nivel del mar se ve modificado significativamente debido a la presencia cálida del ENOS (El Niño) y que contribuiría a la

modificación de las líneas de costa (Martínez *et al.*, 2018). En el año 2015, en Chile Central ocurrió un evento meteo-oceánico que erosionó gran parte de las playas de Valparaíso debido al oleaje, experimentando retrocesos horizontales de hasta 25 m (Winckler *et al.*, 2015). La frecuencia de eventos extremos como las marejadas han aumentado en cantidad como en magnitud en los últimos años, es así como Campos (2016) identifica 137 eventos entre los años 1979-2015 y determina que el 33% de los eventos son episodios desde los años 2010-2015. Asimismo determina que el 75% de los eventos se producen entre mayo y agosto, relacionando que los años en los cuales se supera la cantidad promedio de eventos de marejadas, el ENOS se encontraba en su fase cálida. El MMA (2019), elaboró un estudio que indica que el 80% de 35 playas estudiadas a lo largo de Chile, presentan un estado erosivo importante, experimentando retrocesos medios que fluctúan entre los 3 y 23 [m], como es el caso de la playa Punta Lobos, Pichilemu con una tasa de cambio de -1.3 m/año desde el año 1994 al año 2018. En la Figura 1 se observa el estado erosivo de la playa posterior a una marejada de periodo invernal el año 2020.

Figura 1: Erosión costera en playa Punta Lobos, Pichilemu (6 noviembre 2020).



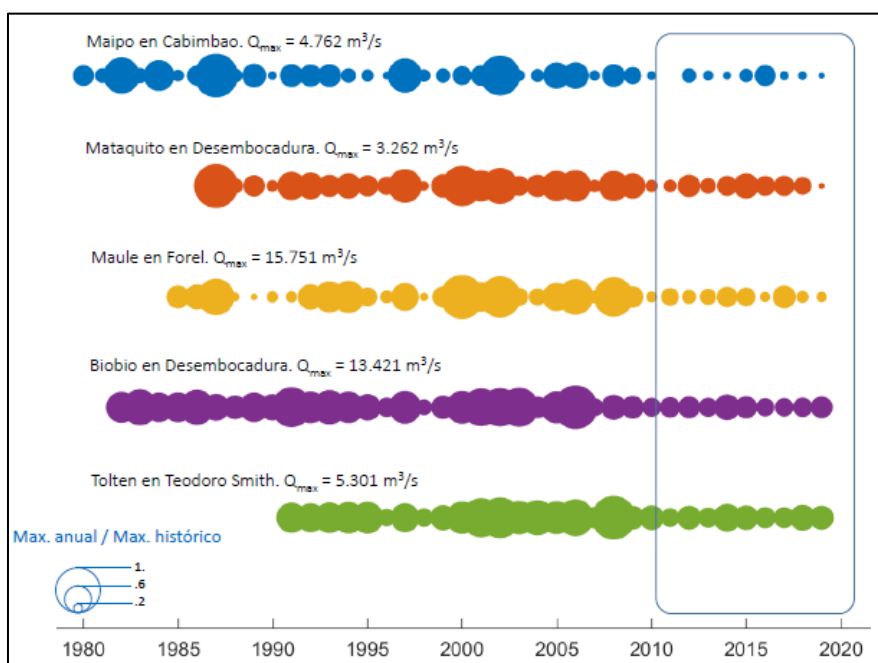
Fuente: Elaboración propia.

La futura potencial erosión costera a causa del cambio climático se atribuye además a los efectos cálidos del ENOS para las costas del Océano Pacífico (Barnard *et al.*, 2015). Desde el año a la fecha existe en Chile una Mega Sequía que está afectando a todo el territorio nacional, especialmente la zona centro-sur, lo que implica un déficit potencial en las precipitaciones como en los aportes pluviométricos. Asimismo, tiene impactos significativos en los caudales de ríos (Philip *et al.*, 2020), temperatura y precipitación. Por ejemplo, Ghanbari *et al.*, (2021) indica que el cambio climático podría aumentar el nivel de peligro de inundaciones compuesto a través de niveles extremos del nivel del mar y caudales de ríos. No obstante a la ausencia de precipitaciones, los efectos cálidos del ENOS en periodos decadales de sequía, pueden provocar la generación de ríos atmosféricos que conlleva a inundaciones, aluviones y movimientos de masa en escalas periodos de días (Garreaud *et al.*, 2019).

En la Figura 2 se observa que desde el año 2010 en adelante los caudales de los principales ríos de la zona central de Chile han disminuido (en coincidencia con el terremoto que azotó la zona el mismo año). Debido a tal suceso, es necesario el conocimiento del suministro de sedimentos fluviales al balance de sedimentos costeros para la evaluación de los impactos sobre la

estabilidad costera (Bamunawala *et al.*, 2018). La comprensión de la conexión entre los ríos y los sistemas costeros adyacentes es valiosa para el diseño de ingeniería costera y el desarrollo de políticas de planificación del manejo de la costa. Syvitski *et al.*, (2013) cuantifica que el 95% de los sedimentos suministrados por ríos ingresan al océano, por lo que es menester el conocimiento del transporte de sedimento fluvial a las zonas costeras. En Chile, Saldías *et al.*, (2016) realiza una investigación para caracterizar la variabilidad interanual de las plumas de los ríos turbios de la zona central-sur y se enfoca en la influencia de las fluctuaciones globales climáticas, tales como ENOS, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y Oscilación Antártica (AAO), determinando que los principales eventos de pluma turbia ocurrieron principalmente durante las fases cálidas del ENOS y PDO.

Figura 2: Principales caudales en los ríos de Chile Central.

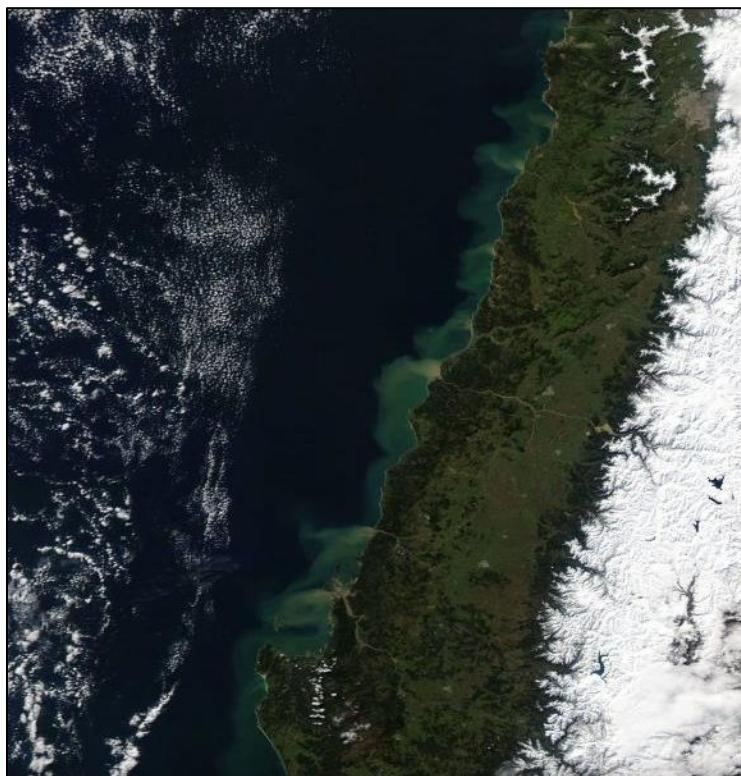


Fuente: (Garreaud, 2020).

Esto conlleva a que la relación de El Niño y las precipitaciones se encuentren interrelacionados, produciendo precipitaciones superiores al promedio en invierno y anomalías opuestas en eventos La Niña (Montecinos *et al.*, 2003), generando aportes de sedimentos en la costa que podrían contribuir al desplazamiento de las líneas de playa (Figura 3).

Estos dos procesos se superponen para efecto en las playas. El déficit medio de precipitaciones en la última década es entre un 20 a 40% (Garreaud, 2019) y ha producido sequías de gran escala en Chile Central-Sur, reduciendo los caudales de los principales ríos, y por ende, en el suministro de sedimentos fluviales a las zonas costeras, lo que podría generar erosiones progresivas en las playas. No obstante, el impacto de los ciclos de El Niño genera precipitaciones abruptas en corto plazo provocando inundaciones y grandes aportes sedimentarios, tal como se presenta en la Figura 3, donde se observa la reflectancia de la tierra, océano y atmósfera en longitudes de onda.

Figura 3: Aportes de sedimentos en la costa de Chile Central el 15.julio 2016 (Aqua-MODIS)



Fuente: Rescatado de <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataaccess>.

Otro factor que contribuye a procesos erosivos en las playas de Chile es a causa de hundimientos o alzamientos del suelo provocados por la subsidencia de placas tectónicas a causa de terremotos (ciclo cosísmico) y la recuperación postsísmica e intersísmica. Un ejemplo es Lebu, en la Región del Biobío, lugar que sufrió un alzamiento de 1.8 [m] posterior al terremoto del año 2010, generando un avance de la línea de costa de 150 [m], pero que en el periodo intersísmico presentó una condición de hundimiento, logrando establecer una condición de equilibrio en la bahía (Martínez *et al.*, 2015). Por su parte, Soto *et al.*, (2015) indica que el terremoto y tsunami de 2010 generó cambios en la morfología y dinámica sedimentaria del litoral de Pichilemu, logrando identificar un retroceso y erosión de las playas arenosas y un solevantamiento de 20 [cm] (Farías *et al.*, 2010). Por otro lado, Vargas *et al.*, (2011) indica que el levantamiento costero post terremoto 2010 fluctuó entre 240 a 20 [cm] en la ruptura latitudinal del sismo, siendo la Isla Santa María la mayor deformación con 220 [cm] (Fritz *et al.*, 2011) y un hundimiento de 50 [cm]. Esto sugiere que al analizar la evolución, se debe considerar esta variable.

Por su parte, Bamunawala *et al.*, (2018) establece que el cambio climático y los impactos antropogénicos afectan directamente el balance de sedimentos en la costa, los cuales se encuentran asociados a un aumento del nivel del mar, aportes o suministros fluviales de sedimentos en la costa y cambios de volumen de la cuenca debido a la variación en la descarga de un río. Magoon *et al.*, (2005), define que los ríos son la principal fuente de suministros en las playas de la Cuenca del Pacífico y que las principales actividades que han afectado el régimen de sedimentos fluviales, por ende, la erosión costera, son operaciones de extracción de arena que eliminan sedimentos

fluviales, presas que interceptan el flujo del sistema fluvial y escombros en la cuenca hidrográfica que alteran e intercepta los sedimentos. En Chile, la desaparición de la Laguna Aculeo es un ejemplo del impacto de la gestión y derechos de agua actualmente vigentes que según la normativa, permite la extracción de agua para uso doméstico, sin embargo, el problema de este caso reside en que la mayoría de los propietarios de viviendas de veraneo en Chile utilizan el agua para otros fines (Valdés-Pineda *et al.*, 2022). Los derechos de aprovechamientos de agua reducen los caudales de ríos y por ende al transporte de sedimentos en los ríos.

Walling *et al.*, (2006) indica que el impacto humano da respuesta a cambios significativos en los flujos de sedimentos en los ríos proporcionando una escasa transferencia en los medios tierra-océano. En el caso de Chile y el mundo, existen problemas entorno a gestión de ecosistemas del ciclo del agua y su administración, principalmente por infraestructura sobre las cuencas hídricas, las que presentan una estrecha relación con la dinámica de los sedimentos en el lecho de los ríos, la continuidad desde su generación hasta la desembocadura y el aporte de sedimento a las zonas costeras, lo que se suma a los efectos en el borde costero generados por el cambio climático (Stehr *et al.*, 2019). Por su parte, Martínez *et al.*, (2018) asocia una tendencia erosiva en la última década en playas de Valparaíso con la creciente urbanización en las cuencas que contribuyen al deterioro de la costa y que podrían verse aún más afectadas si no hay cambios en la planificación territorial.

2.3 Metodologías Empleadas En La Determinación De Líneas De Costa

Dentro de las metodologías para determinar cambios morfodinámicos asociados a condiciones de erosión o progradación en playas, es el uso de imágenes satelitales, con herramientas de visualización como Google Earth Pro, Google Engine o algoritmos de código abierto (CoastSat) que realizan descargas simultáneas de satélites como Landsat o Sentinel.

Otro método asertivo es la medición en terreno de la línea de costa mediante instrumentos de precisión como GNSS (Global Navigation Satellite System), pero es poco utilizable en el largo plazo debido al costo humano y económico. Generalmente sus mediciones complementan el análisis en los procesos de validación de imágenes satelitales y su postprocesamiento. Por su parte, Huang *et al.*, (2020) y Rodríguez-Padilla *et al.*, (2019) identifican la línea de costa y su monitoreo dinámico, combinando el nivel de las mareas y un modelo de elevación digital (DEM) de la zona costera a partir de la fotografía de inclinación con vehículos aéreos no tripulados. Otro métodos en la determinación de líneas de costa, es la utilización de videos remotos y de fotografías en playas. Pugliano *et al.*, (2019) utiliza las imágenes de video y las compara con mediciones GPS y pendientes de playa, estableciendo un error entre ambas (Ver Figura 4).

Figura 4: Utilización de videos remotos y fotografías en playas para determinar líneas de costa.



Fuente: Pugliano *et al.*, (2019).

Sin dudas existe una amplia variedad de metodologías para la determinación de líneas de costa, ya sean por algoritmos en la descarga de imágenes satelitales y selección mediante bandas espectrales e infrarrojas, como en la utilización de Sistemas de Información Geográfica, mediante diversas plataformas en imágenes satelitales. El uso de imágenes de video es una metodología mayormente utilizada (Holman & Stanley, 2007), debido a la precisión en la calidad de imágenes como en la medición de imágenes satelitales con vehículos tripulados. La fuente de datos proveniente de imágenes satelitales, como el caso de Vos *et al.*, (2019) presenta la gran ventaja de cubrir extensas áreas del mundo para diferentes climas y estaciones del año, pero sin embargo, la resolución de las imágenes al uso público es baja lo que limita la información sobre la mayoría de los cambios morfodinámicos costeros.

Existen por lo tanto diversos factores que pueden incidir en la transformación y movimientos de una playa en el tiempo, provocando principalmente erosiones globales en la última década. En esta investigación se aborda de manera sistémica y cualitativa, el análisis de estos probables factores que inciden en cambios de la línea de costa para luego, identificar estadísticamente los más relevantes.

3. Objetivos

La necesidad de comprender el comportamiento de las playas es fundamental para mitigar los impactos del cambio climático, que se produce por una alteración en el balance de energía en el planeta producto de la acumulación de gases de efecto invernadero y que puede tener consecuencias en distintas componentes, como también para la adaptación a amenazas como sismos y tsunamis que impactan la zona costera (Martínez *et al.*, 2015). Chile en la última década ha presentado diferentes estados de erosión en sus playas, particularmente en la zona central, atribuido probablemente al cambio climático o a ciclos cósmicos. Una de las playas que fue azotada por los sismos 8.8 Mw y 6.9 Mw del año 2010, un tsunami y que presenta una falla cortical transversal es la playa de Punta Lobos, Pichilemu, la cual ha presentado una tasa de cambio de -1.3 m/año (entre los años 1994-2018) y que es una de las principales playas con erosión en Chile, de acuerdo a MMA (2019).

En la actualidad y en la presente literatura, existen estudios que abordan los procesos erosivos a causa de variables independientes o eventos específicos de corto plazo (días), sin embargo no se halla una evaluación de diferentes factores que influyan de manera combinada en los procesos erosivos. Se propone evaluar un conjunto de variables, mediante un modelo predicción lineal múltiple que estime los efectos que produce cada variable en combinación con las demás y que respondan a la variabilidad de la línea de costa.

Objetivo General

1. Evaluar la respuesta morfodinámica de la playa Punta Lobos, Pichilemu ante forzantes climatológicas, hidrológicas y tectónicas, a través de mediciones, modelación numérica, e imágenes satelitales.

Objetivos Específicos

1. Identificar la variabilidad temporal y espacial de las forzantes para determinar mediante procesos multifactoriales la respuesta morfodinámica de la línea de costa y asociarlas a comportamientos climáticos globales.
2. Identificar si el clima de oleaje responde, por sí solo, a procesos de erosión y progradación de la playa asociada a eventos extremos en escalas temporales reducidas.

4. Metodología

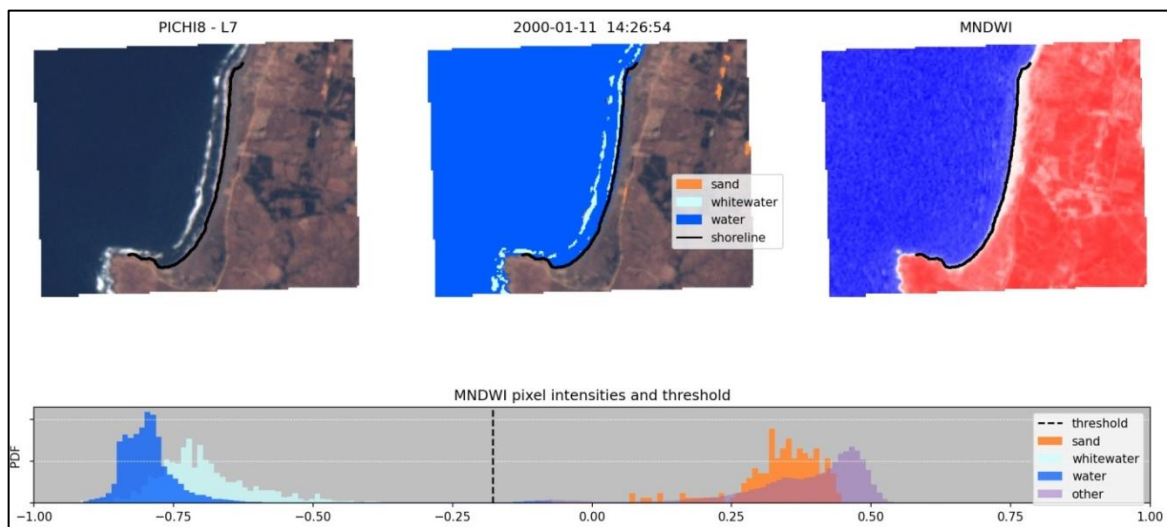
4.1 Introducción

En este acápite se describirán las metodologías utilizadas para la determinación de la línea de costa de la playa Punta Lobos, Pichilemu, debido a ser una de las playas con altos índices erosivos, por presentar deformaciones verticales cosísmica-inter-sísmicas y una falla cortical transversal. Posteriormente se hará referencia a los factores que inciden en la variabilidad de la línea de costa, como los aspectos climatológicos, oceanográficos, geofísicos e hídricos para luego evaluar un modelo de regresión lineal múltiple. Se detallará adicionalmente, el análisis estadístico a las variables oceanográficas de Temperatura Superficial del Mar (TSM), Nivel del Mar (NM) y datos de oleaje como altura de ola, periodo y dirección.

4.2 Determinación Línea de Costa mediante CoastSat

Para determinar la variabilidad de la línea de costa de la playa de Pichilemu, se utiliza la herramienta de código abierto CoastSat (Vos *et al.*, 2019) realizado en Python, que permite obtener series de tiempo de la posición de la costa a partir de imágenes satelitales (Landsat y Sentinel-2) a través de Google Engine de manera libre y gratuita. La herramienta permite detectar líneas de costas, donde el límite entre la arena y agua se determina mediante el Índice Normalizado de Diferencias de Agua Modificado (MNDWI, en sus siglas en inglés) que dependen de la intensidad de píxel en la banda infrarroja de onda corta y banda verde, tal como se representa en el ejemplo de la Figura 5. De esta manera cada línea de costa es obtenida ubicando el umbral en la posición idónea en las intensidades de pixeles.

Figura 5: Determinación Línea de Costa mediante CoastSat en Punta Lobos.

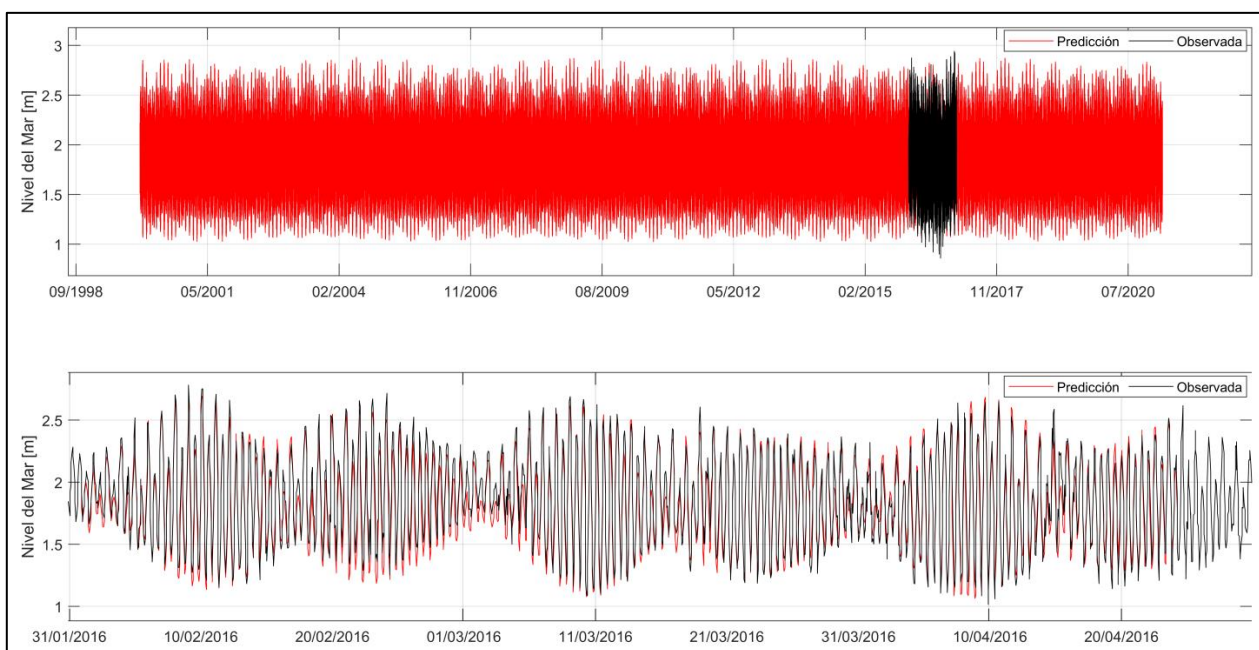


Fuente: CoastSat -<https://github.com/kvos/CoastSat>.

El periodo de análisis para la playa de Punta Lobos fue de 20 años desde el 01-01-2000 al 31-12-2020, considerando la descarga de imágenes de los satélites, LandSat 5, LandSat 7, LandSat 8 y Sentinel-2. De esta forma, se recopilaron 1036 imágenes y posteriormente se trazaron 11 perfiles transversales para la obtención de la serie de tiempo de erosión y progradación. En la Tabla 1, se presentan las coordenadas de los perfiles y en la Figura 8 el trazado en planta.

Dentro de las capacidades que otorga la herramienta, permite incorporar información de Nivel del Mar, debido a que cada imagen se captura en un nivel de marea diferente, por lo tanto, permite realizar correcciones y eliminar los cambios aparentes debido a las fluctuaciones mareales. Para la obtención del Nivel del Mar de la localidad de Punta Lobos, se solicitó 1 año de información cada 1 hora al Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC) para su estación de Nivel del Mar en Bucalemu. De esta manera se realiza un pronóstico de Nivel del Mar para 21 años con la herramienta T_tide, elaborado por Pawlowicz *et al.*, (2002), obteniendo las principales constituyentes armónicas: N2, M2, S2, K1 y O1. En la Figura 6 se representa el Nivel del Mar para la Estación de Bucalemu (SHOA) del año 2016 (color negro) y la predicción para 21 años (color rojo).

Figura 6: Predicción y observación de Nivel del Mar en Estación del Nivel del Mar de Bucalemu (SHOA).



Posteriormente con la herramienta CoastSat se determina el Nivel del Mar en los instantes de adquisición de las imágenes para luego efectuar la corrección respectiva (ver Figura 7) que corresponde al cociente entre el Nivel del mar y la pendiente de la playa. Cabe destacar que la herramienta contiene otro *toolbox* específico para la determinación de la pendiente de la playa (CoastSat.slope), el cual no se utilizó en este estudio y que se determinó tomando como referencia lo realizado por Soto *et al.*, (2015), siendo estimada en 0.1. Por otro lado, la configuración admite modificar aspectos como nivel de nubosidad de las imágenes y áreas específicas de pixeles de arenas de colores, entre otras.

Figura 7: Niveles de marea al momento de adquisición de imágenes.

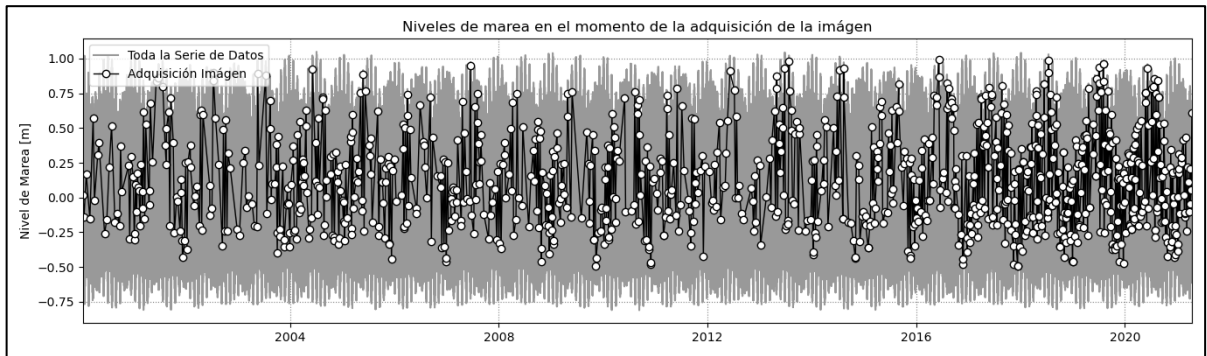
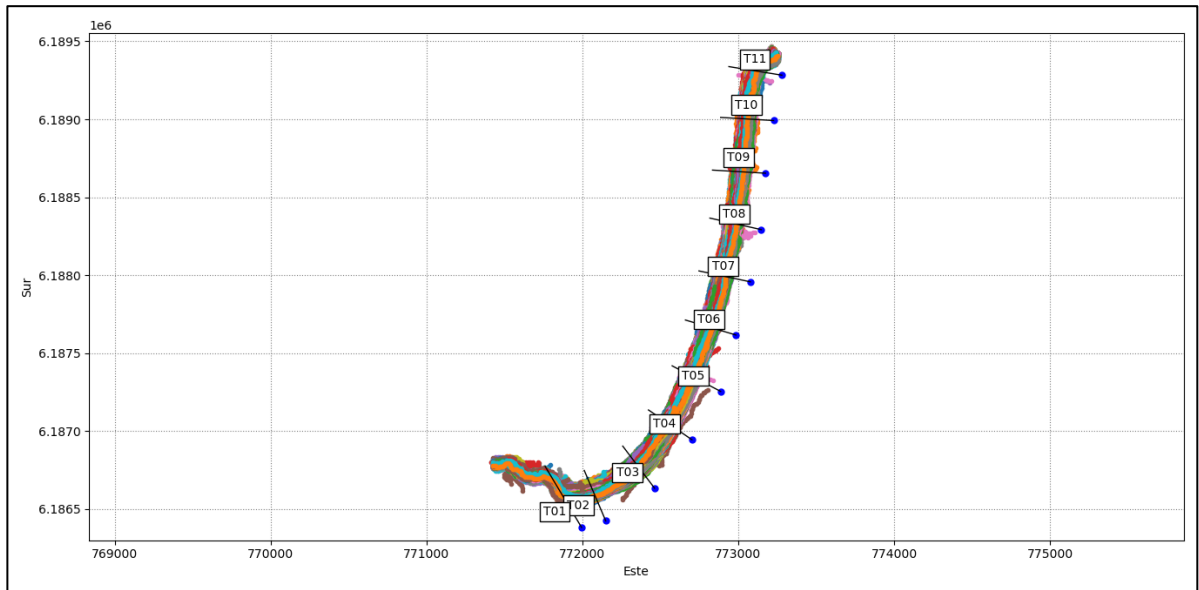


Tabla 1: Coordenadas de perfiles trazados para la obtención de las Líneas de Costas en Punta Lobos.

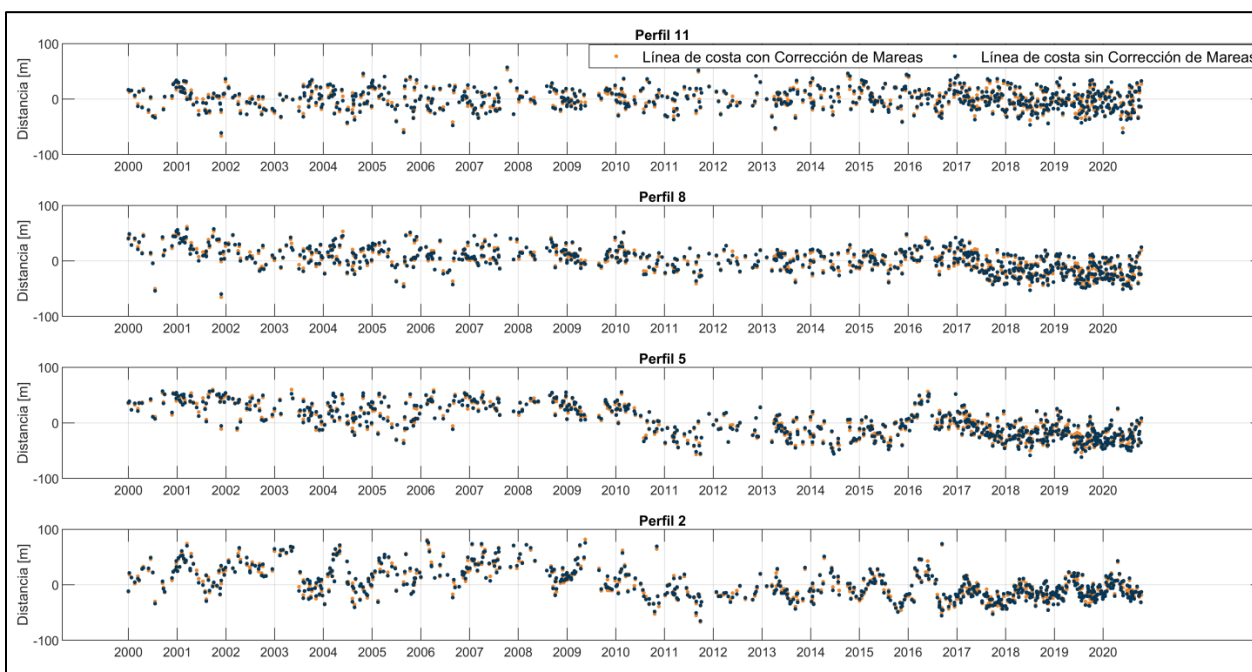
Perfiles	Puntos en tierra (UTM)		Puntos en mar (UTM)	
	Coordenada E	Coordenada S	Coordenada E	Coordenada S
Perfil 1	771995	6186381	771761	6186773
Perfil 2	772150	6186423	772012	6186747
Perfil 3	772463	6186633	772259	6186903
Perfil 4	772703	6186944	772424	6187135
Perfil 5	772887	6187254	772576	6187418
Perfil 6	772985	6187616	772661	6187712
Perfil 7	773078	6187957	772748	6188027
Perfil 8	773148	6188292	772818	6188366
Perfil 9	773175	6188654	772835	6188674
Perfil 10	773227	6188992	772887	6189012
Perfil 11	773280	6189283	772940	6189338

Figura 8: Trazado de perfiles transversales para obtención de Línea de Costa en Punta Lobos.



Una vez configurado los parámetros idóneos para la determinación de la línea de costa en la herramienta CoastSat, se obtienen las series de tiempo para cada uno de los perfiles trazados sin y con correcciones de marea, como se presenta en la Figura 9. La anomalía de la línea de costa fluctúa positiva o negativamente dependiendo del estado dinámico de la playa. Si es negativa, la línea de costa ha retrocedido con respecto a la primera imagen adquirida y se infiere que es un estado erosivo, por el contrario, si el índice es positivo, la línea de costa ha avanzado, y por ende, se deduce que se encuentra en un estado de progradación. Para la determinación de los estados es necesario obtener los cambios netos y no el valor absoluto, puesto que no se podría identificar la variabilidad de la línea de costa. De esta forma, se utiliza la línea de costa de la primera imagen obtenida como parámetro inicial y se determinan los cambios con respecto a esta.

Figura 9: Series de tiempo de las Líneas de Costa, obtenidas por CoastSat en Punta Lobos.



Con el objetivo de lograr comprender el comportamiento de estas series de tiempo, se opta posteriormente, efectuar también un análisis para la localidad de Cahuil, 11 km al sur de Punta Lobos, Pichilemu.

En la Tabla 2 se representan las coordenadas de los 2 perfiles trazados en la localidad de Cahuil y en la Figura 10, los perfiles en planta.

Tabla 2: Coordenadas de perfiles trazados para la obtención de las Líneas de Costas en Cahuil.

Perfiles	Puntos en tierra		Puntos en mar	
	Coordenada E	Coordenada S	Coordenada E	Coordenada S
Perfil 1	773420	6181723	772263	6181491
Perfil 2	772273	6184682	771279	6184421

Consecutivamente a lo realizado en Punta Lobos, se descargaron 839 imágenes para la localidad de Cahuil para el mismo periodo de análisis (Figura 11), obteniendo las series de tiempo de la línea de costa con la misma base de datos de predicción de mareas (Figura 12).

En la Figura 13 se visualizan los 11 perfiles trazados en Punta Lobos y los 2 perfiles cercanos a la desembocadura del Estero de Cahuil.

Figura 10: Trazado de perfiles transversales para obtención de Línea de Costa en Cahuil.

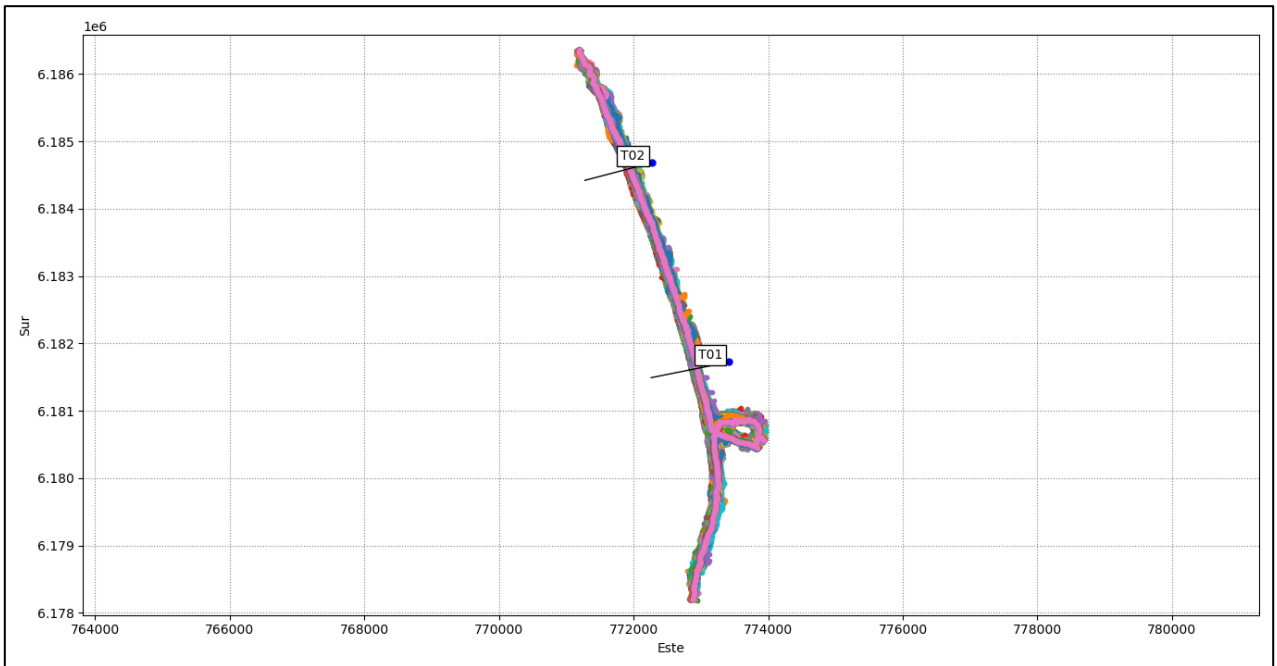


Figura 11: Determinación Línea de Costa mediante CoastSat en Cahuil.

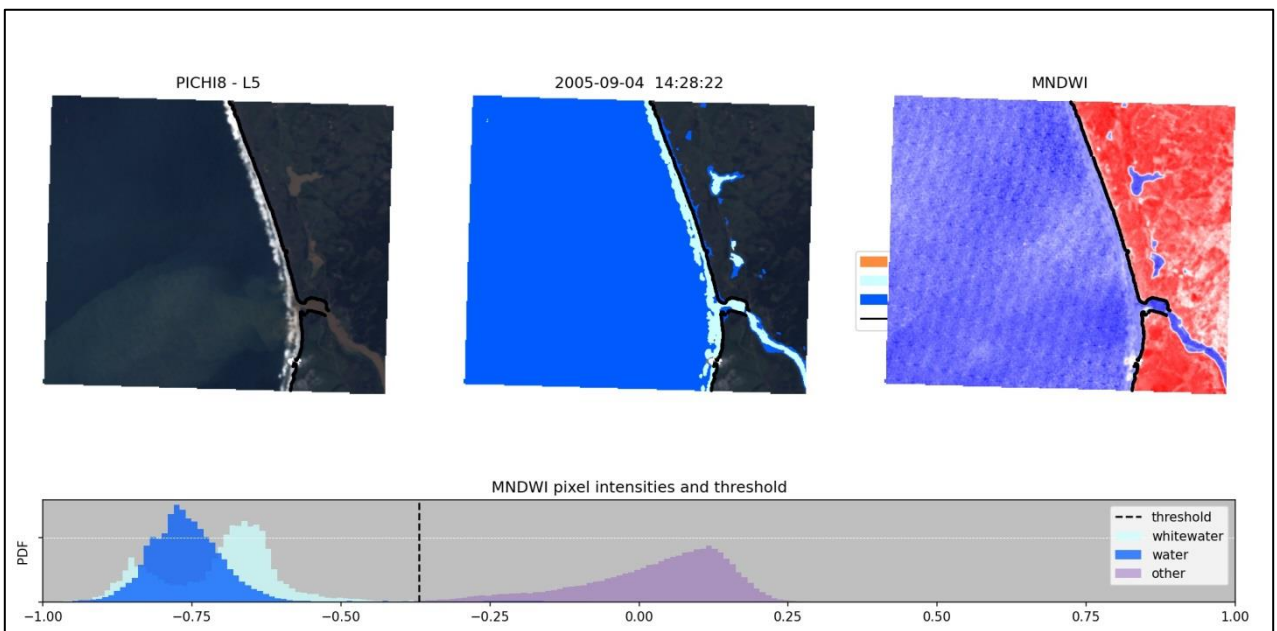


Figura 12: Series de tiempo de las Líneas de Costa, obtenidas por CoastSat en Cahuil.



Figura 13: Perfiles transversales en Punta Lobos y Pichilemu.



4.3 Modelación numérica de oleaje mediante Simulating Waves NearShore (SWAN)

Las playas se encuentran en plena interacción con el oleaje y en ocasiones, ésta es la principal forzante que genera cambios relevantes en la dinámica sedimentaria. Por lo tanto, es menester conocer el clima del oleaje en la zona de interacción con el lecho marino cercano a la costa. Para ello, existen diversos modelos numéricos que permiten obtener una caracterización de las componentes principales de oleaje, como la altura de oleaje espectral (H_{m0}), periodo peak (T_p) y dirección media (θ_m). En esta investigación se emplea el uso del modelo numérico SWAN (Simulating WAVE Nearshore) por ser una herramienta de código abierto y espectral que permite obtener las componentes mencionadas anteriormente de manera representativa de acuerdo al estado del arte. Si bien el modelo no resuelve la fase sino la promedia, la representación de nodos en aguas intermedias frente a playas abiertas sin obstáculos que interfieran en la propagación energética, permite obtener una caracterización del clima de oleaje idónea para el análisis de esta investigación, específicamente para la determinación de la variabilidad de la línea de costa.

El modelo SWAN es un modelo de tercera generación (Booji *et al.*, 1999) desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft, que determina diferentes procesos de generación y procesos físicos en zonas costeras y aguas profundas, entre ellas se destaca la generación de oleaje por viento, interacción ola-corriente, interacción ola-ola, disipación por whitecapping, disipación por fondo, shoaling o asomeramiento, rompiente, interacción de triadas, cuádrupletos, entre otros. El modelo permite utilizar diversas grillas computacionales, tanto estructuradas como no estructuradas. Para esta investigación se optó por utilizar una grilla no estructurada triangular para todo el dominio, abarcando la información espectral de aguas profundas.

Para lograr caracterizar el oleaje en la zona de Punta Lobos, Pichilemu, se recurre a nodos espectrales en aguas profundas para posteriormente propagarlos a aguas someras a una profundidad de 15 [m] aproximadamente. El rango temporal de análisis es de 21 años desde el 2000 hasta el 2020. La calibración y validación del modelo se realizó utilizando datos de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), el cual fue instalado por el INH el año 2013, de acuerdo al proyecto CORFO INNOVA para el periodo desde el 27 de marzo al 25 de junio. La calibración se basó en ajustar las interacciones físicas principales y una combinación de ellas.

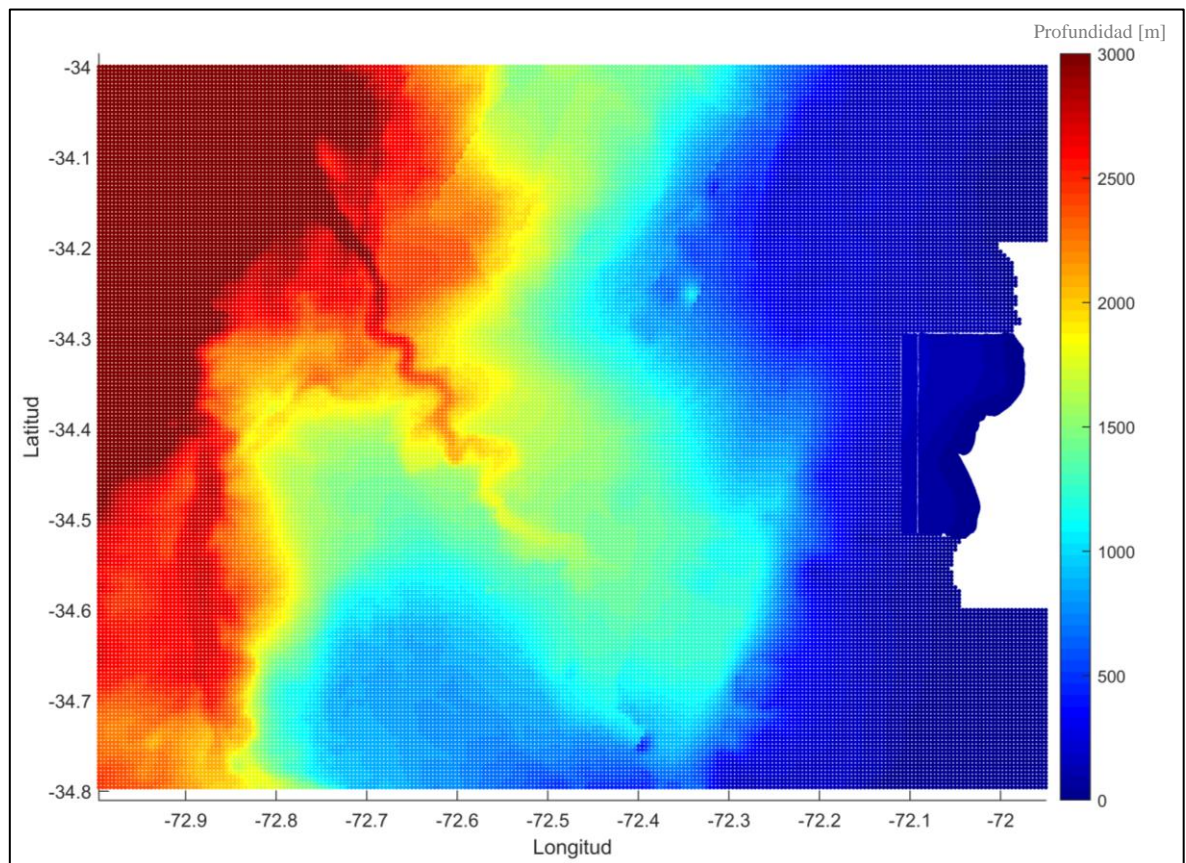
4.3.1 Modelo de Elevación Batimétrica

Para obtener una caracterización del clima de oleaje en la zona de Punta Lobos Pichilemu, es necesario en primera instancia, implementar un modelo de elevación digital batimétrica. Para aquello se recopiló información por diversas entidades como se detalla a continuación:

1. GEBCO Compilation Group (2019) para una grilla desde los -34 a -34.8 y -73 a -71.5 con una resolución espacial de 15 segundos de arco.
2. Cartas de Inundación Por Tsunami (CITSU) con batimetría de alta resolución de la localidad de Pichilemu.
3. Cartas Náuticas del SHOA.
4. Batimetría del Instituto Nacional de Hidráulica de acuerdo a proyecto CORFO INNOVA 09CN14-5718.

El conjunto de todos los datos batimétricos recopilados, se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 14: Recopilación de datos batimétricos.



Sin embargo, los datos batimétricos en zonas costeras no presentaba una alta densidad, debido a que la zona de Pichilemu es conocida por sus grandes olas, la zona de rompiente es compleja de medir, por lo que se optó por determinar perfiles batimétricos utilizando la técnica de Dean (2001), el cual establece la ecuación de perfil de playa de equilibrio, tal como se expresa a continuación:

$$h(y) = A(d)y^{2/3}$$

donde:

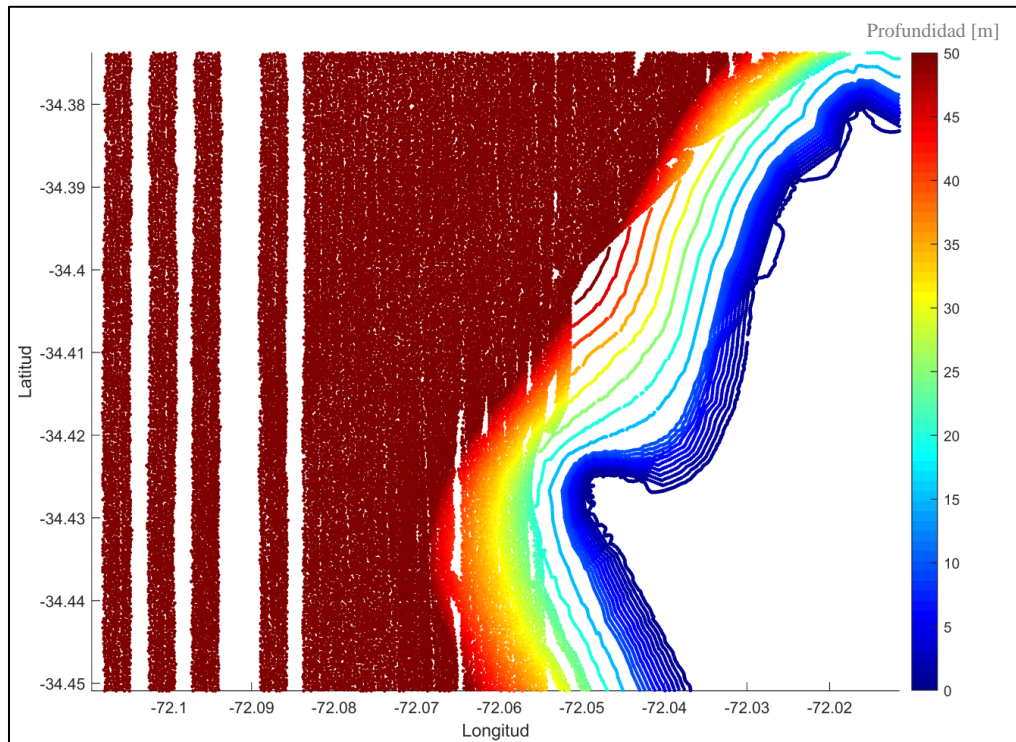
h: profundidad del mar

A: factor de escala del perfil

y: distancia desde un punto hacia aguas afuera.

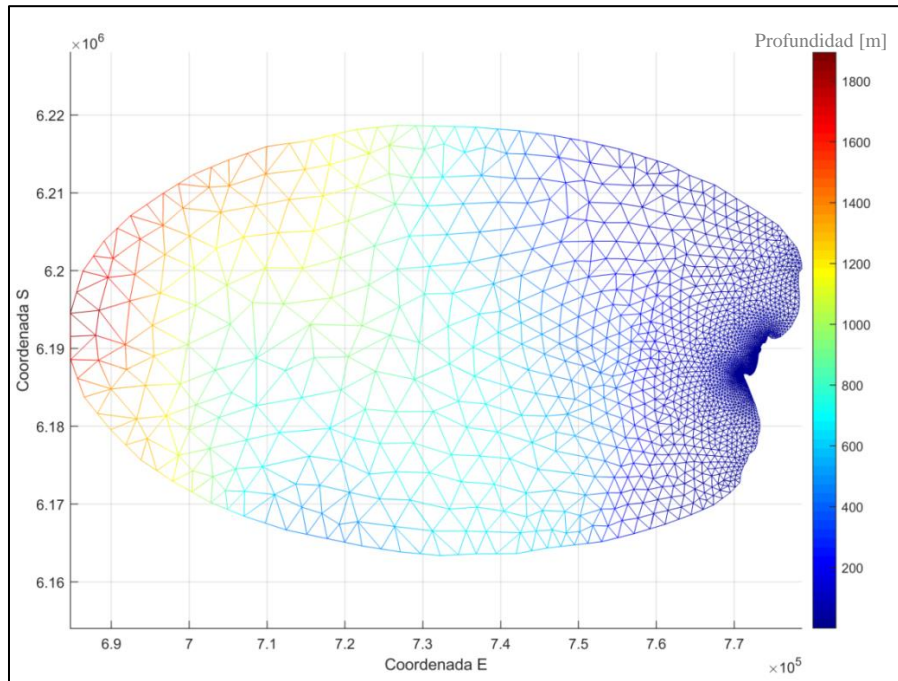
De esta manera se determina los perfiles de equilibrio para las zonas donde no se presenta información batimétrica. Luego se elaboran isobatas con el resultado de los perfiles de equilibrio, determinando una aproximación, tal como indica la Figura 15.

Figura 15: Determinación de isobatas por medio de perfiles de equilibrios.



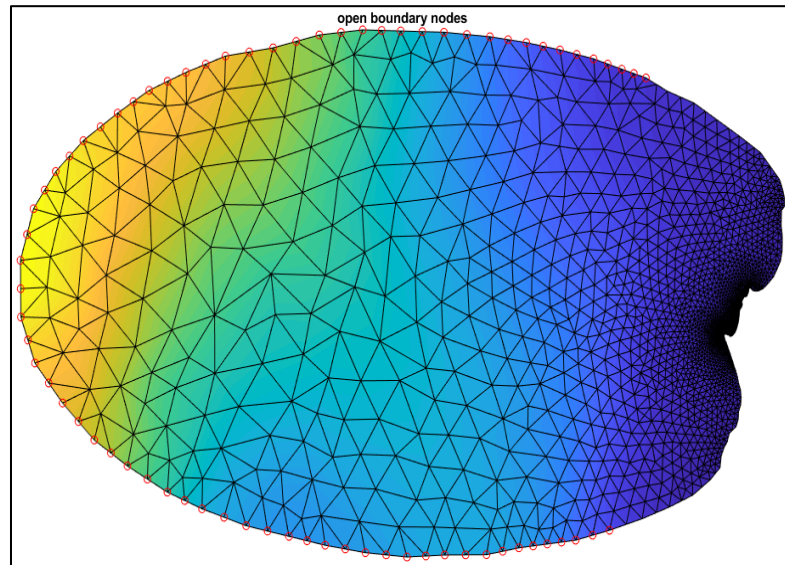
Posteriormente se realiza una grilla computacional con Matlab, que para este estudio será triangular no estructurada, con los datos batimétricos recopilados. La malla presenta 2498 números de nodos y 4697 números de celda, tal como se presenta en la Figura 16.

Figura 16: Malla computacional triangular no estructurada para modelo de oleaje.



Dentro de los archivos de entrada que solicita el modelo SWAN, es necesario generar uno de malla no estructurada, identificando que puntos específicos serán las condiciones de borde con el cual se forzarán el modelo en el proceso arranque. El nodo más cercano a la costa se encuentra a 500 [m] de profundidad donde el espectro presenta un frecuencia mínima de 0.037 [Hz], pero con escasa presencia en esas bandas energéticas, por lo que el espectro no presenta significativas variaciones. En el archivo creado con extensión “.node”, se identifican las condiciones de borde, tal como se detalla en círculos rojos en la Figura 17.

Figura 17: Grilla computacional y detalle de Condiciones de Borde.



4.3.2 Nodo espectral de oleaje en Aguas Profundas

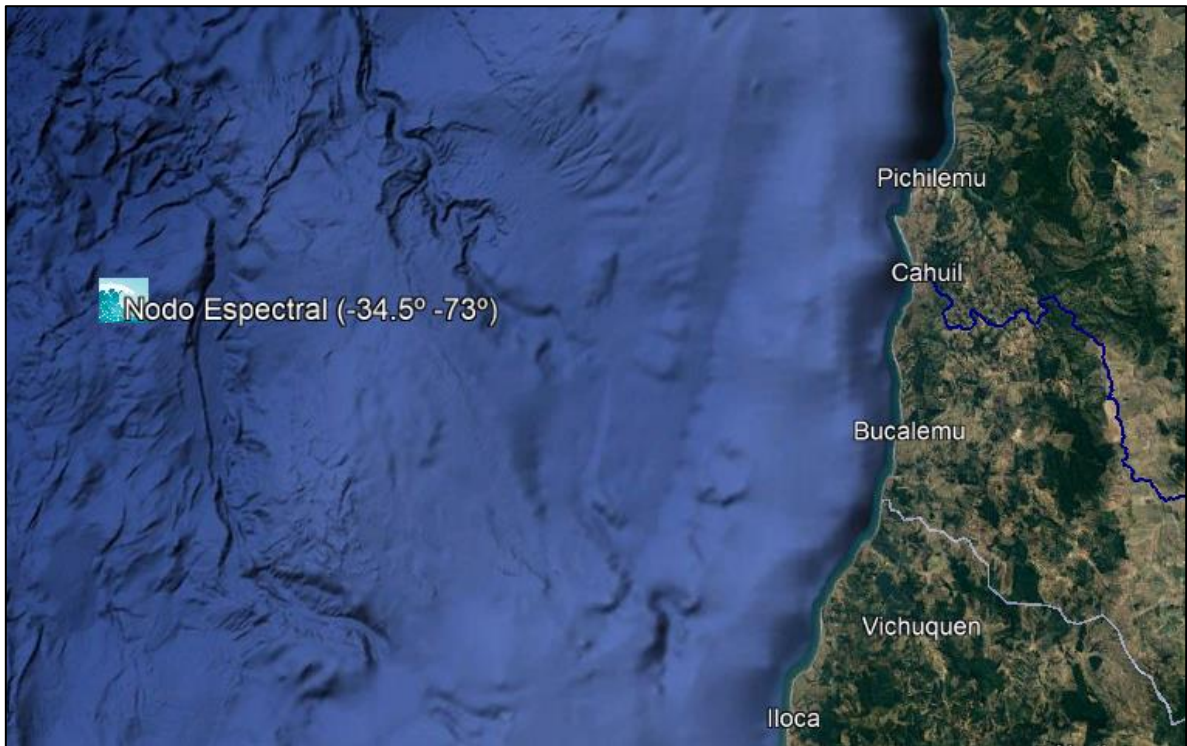
Una vez elaborada la grilla computacional es necesario incorporar las condiciones de borde asociadas a los espectros energéticos de oleaje. Para aquello es menester conocer el clima de oleaje en aguas profundas, para posteriormente propagar la energía mediante modelación numérica a zonas costeras.

De acuerdo al trabajo realizado por el MMA (2019), se efectuaron modelaciones numéricas en aguas profundas mediante el modelo numérico WAVEWATCH III en nodos cercanos a la zona de interés, para una serie de tiempo de 21 años de oleaje espectral, con estados de mar cada 1 hora, el cual permite resolver los procesos físicos del oleaje a escalas oceánicas. Cada estado de mar se caracterizó con un espectro bidimensional (energía en el dominio frecuencia-dirección).

El modelo WAVEWATCH III permite configurar salidas de espectro bidireccionales, dicha información es valiosa ya que representa las condiciones de oleaje provenientes de todas las direcciones y todas las frecuencias, como también la información de la energía dominante. Con aquella información es posible generar los parámetros de altura, periodo y dirección lo que hace que sea una de las maneras más completas de definir el oleaje.

Los datos fueron adquiridos y otorgados por el MMA (2019) en formato NetCDF espectrales para cada año de estudio, abarcando información direccional, energética y de frecuencia del oleaje. La ubicación del nodo espectral se representa en la Figura 18, la cual se encuentra a 1.800 [m] de profundidad aproximadamente y a 88 [km] lineales desde Punta Lobos, Pichilemu.

Figura 18: Ubicación Nodo Espectral, otorgado por MMA (2019).



Las características de los espectros de oleaje en aguas profundas otorgados son los siguientes:

- Información cada 1 hora por 1 año (8760 datos)
- Coordenadas geográficas en grados decimales (Latitud, Longitud)
- 32 frecuencias, desde los 0.0373 [hz] hasta los 0.7159 [hz].
- 24 direcciones cada 15 grados, desde los 0° hasta los 345°.
- Energía espectral [$m^2/Hz/deg$] con dimensiones de 24x32x1x8760.

Los archivos de espectros de oleaje que necesita el modelo SWAN como parámetros de entrada, requieren un formato específico para su lectura, el cual se describe en el manual de usuario de este. Para su elaboración, se realizó mediante Matlab un *script* de lectura y generación de archivos con formato “.sp2”, los cuales corresponden a 183.960 para 21 años de análisis, desde al año 2000 al año 2020.

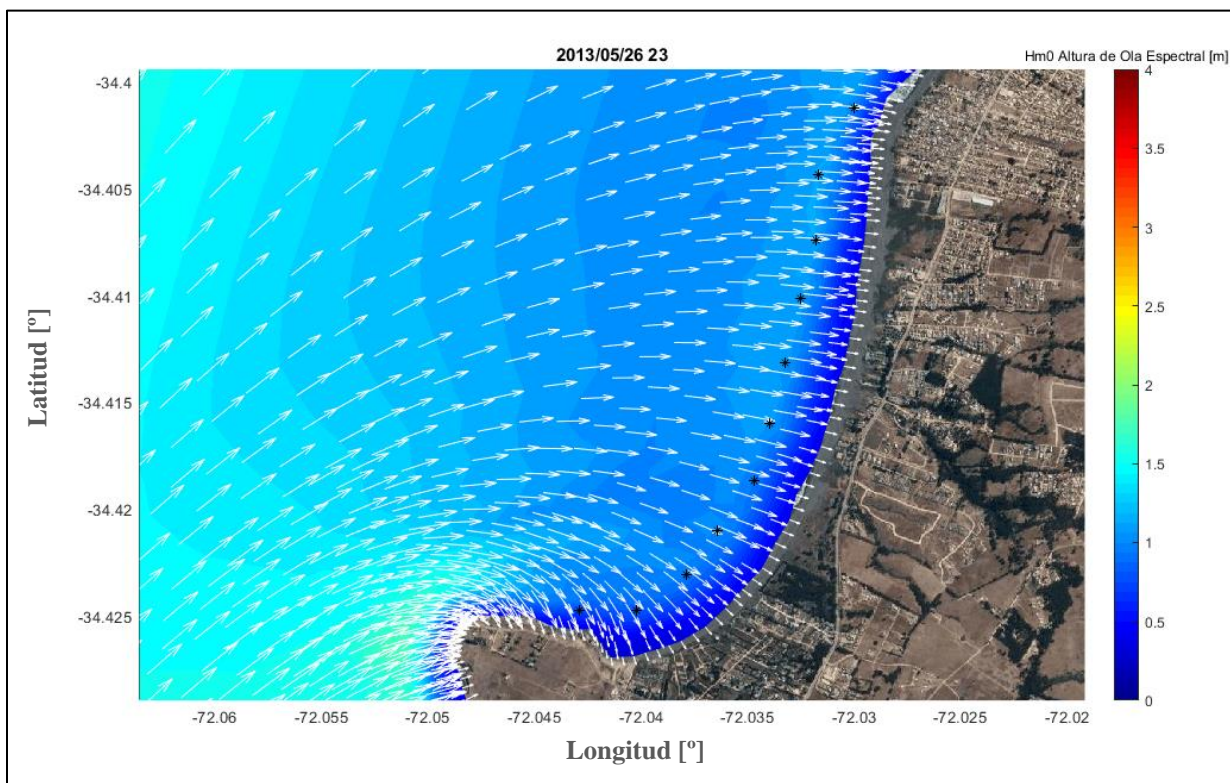
En el acápite 9.1, se presenta como ejemplo, un archivo espectral de oleaje utilizado en la modelación.

4.3.3 Implementación Simulating Waves NearShore (SWAN)

Puesto que la cantidad de simulaciones a realizar son 183.960, es necesario configurar el modelo para que se ejecute de manera paralela y no en serie. Para aquello se instaló el software y

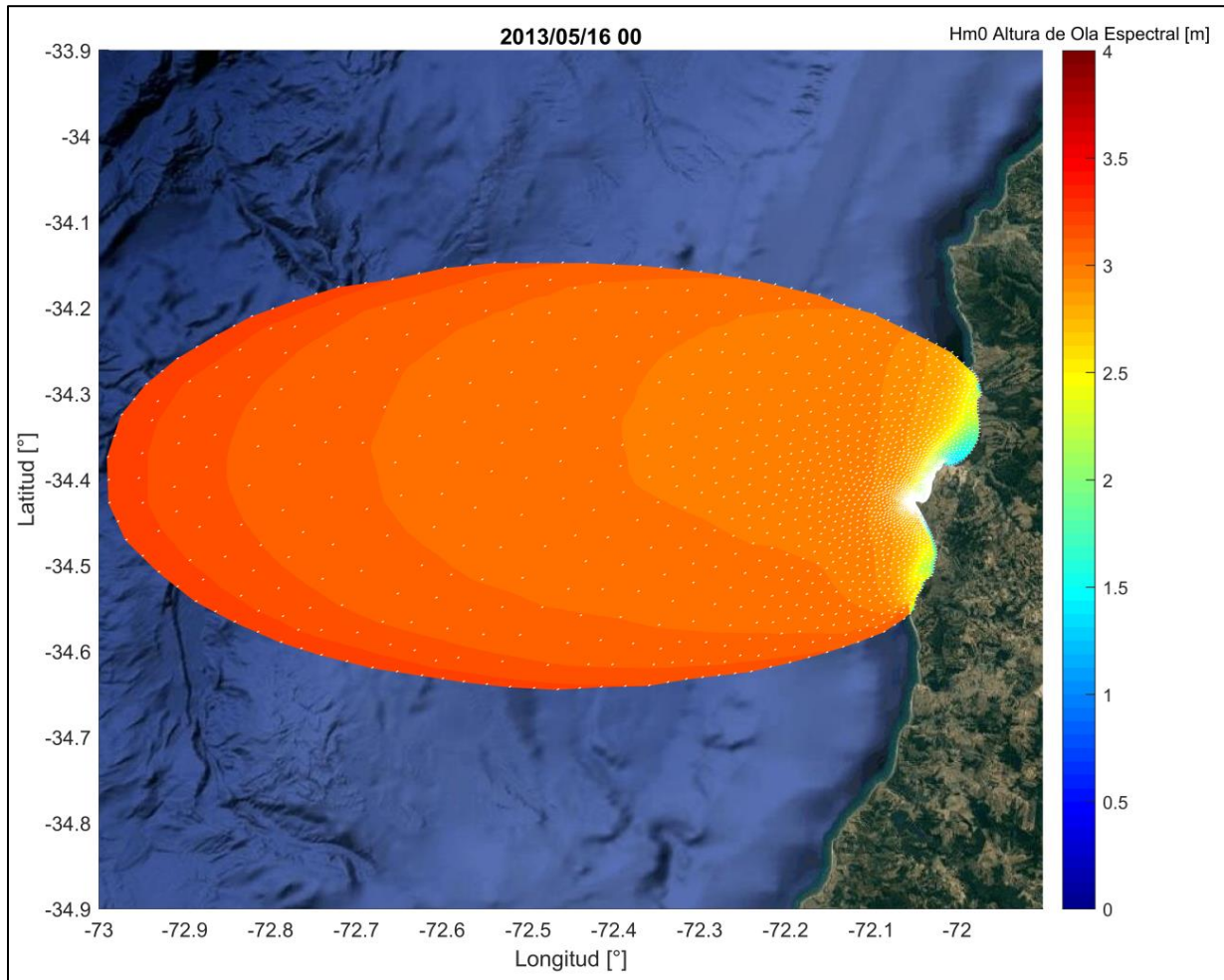
versión 41.31 con las indicaciones de paralelización en un servidor con sistema operativo LINUX, alojado en el SHOA con 16 núcleos y 64 procesadores. La configuración del modelo destaca la implementación de un estado estacionario con coordenadas cartesianas, el uso del proceso físico GEN3 el cual incluye procesos mejorados de viento, whitecapping y cuádrupletos. La información de los parámetros y los archivos necesarios para ejecutar el modelo, se denotan en el acápite 9.2. Ya ejecutado el modelo, se obtienen 8760 archivos para cada año con información de posición, profundidad, altura de ola, periodo peak, dirección, periodo T_{m01} y T_{m10} . Posteriormente se identifican 11 puntos de extracción (Figura 19) de información de oleaje coincidentes con los perfiles trazados en la herramienta CoastSat, donde las flechas representan la direccionalidad del oleaje.

Figura 19: Puntos de Extracción de oleaje mediante modelo SWAN.



En la Figura 20 se representa un ejemplo de la salida con los parámetros descrito anteriormente con el modelo SWAN, específicamente para un evento de marejada el año 2013.

Figura 20: Datos de salida, modelo SWAN con grilla No estructurada.

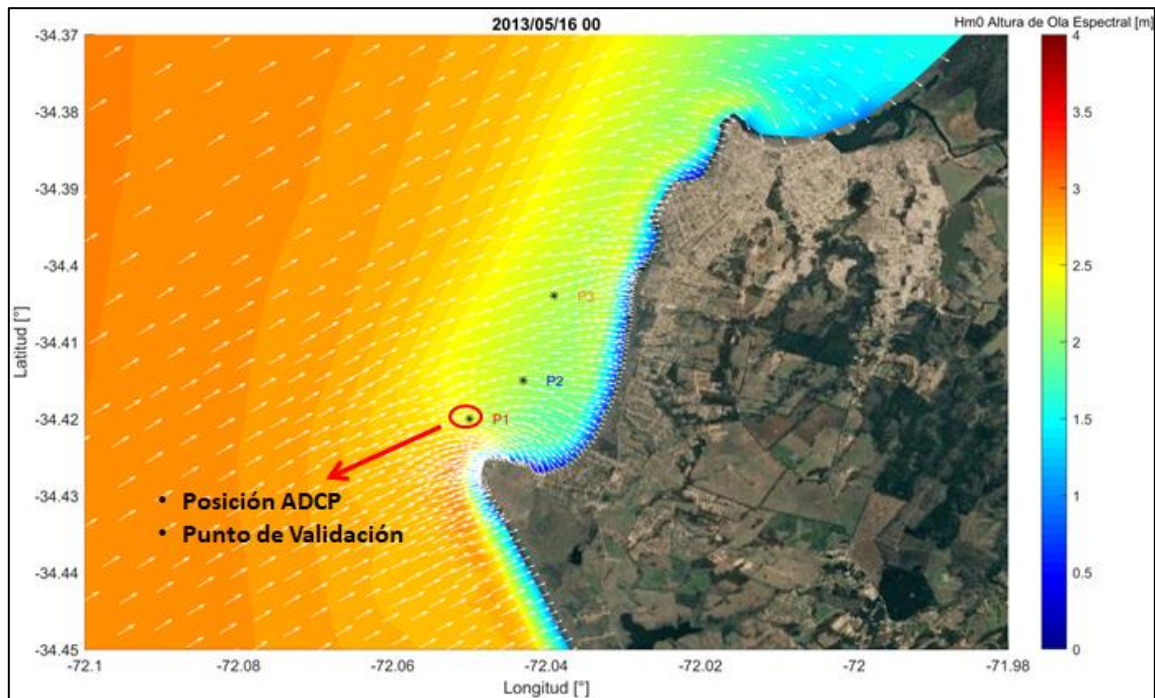


4.3.4 Calibración y validación del modelo SWAN

La calibración y validación del modelo se realizó para diferentes combinaciones de forzantes físicas y de paquetes fuente, entre ellas las interacciones ola-ola, fricción por fondo, rompiente, cuádrupletos, triadas, whitecapping, entre otros. Adicionalmente se ejecuta el paquete ST6, el cual incorpora un término de fuente de viento, disipación por espuma blanca e interacciones ola-turbulencia. Para lograr validar el modelo, se utiliza la medición del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) mediante un ADCP, ubicado cercano a Punta Lobos, la cual se detalla en la Figura 21. Las coordenadas del punto de fondeo son: -33.42 y -72.05.

En este mismo punto se extrae información de oleaje del modelo para verificar y validar su correcta interpretación de la marejada.

Figura 21: Ubicación ADCP y punto de Validación.



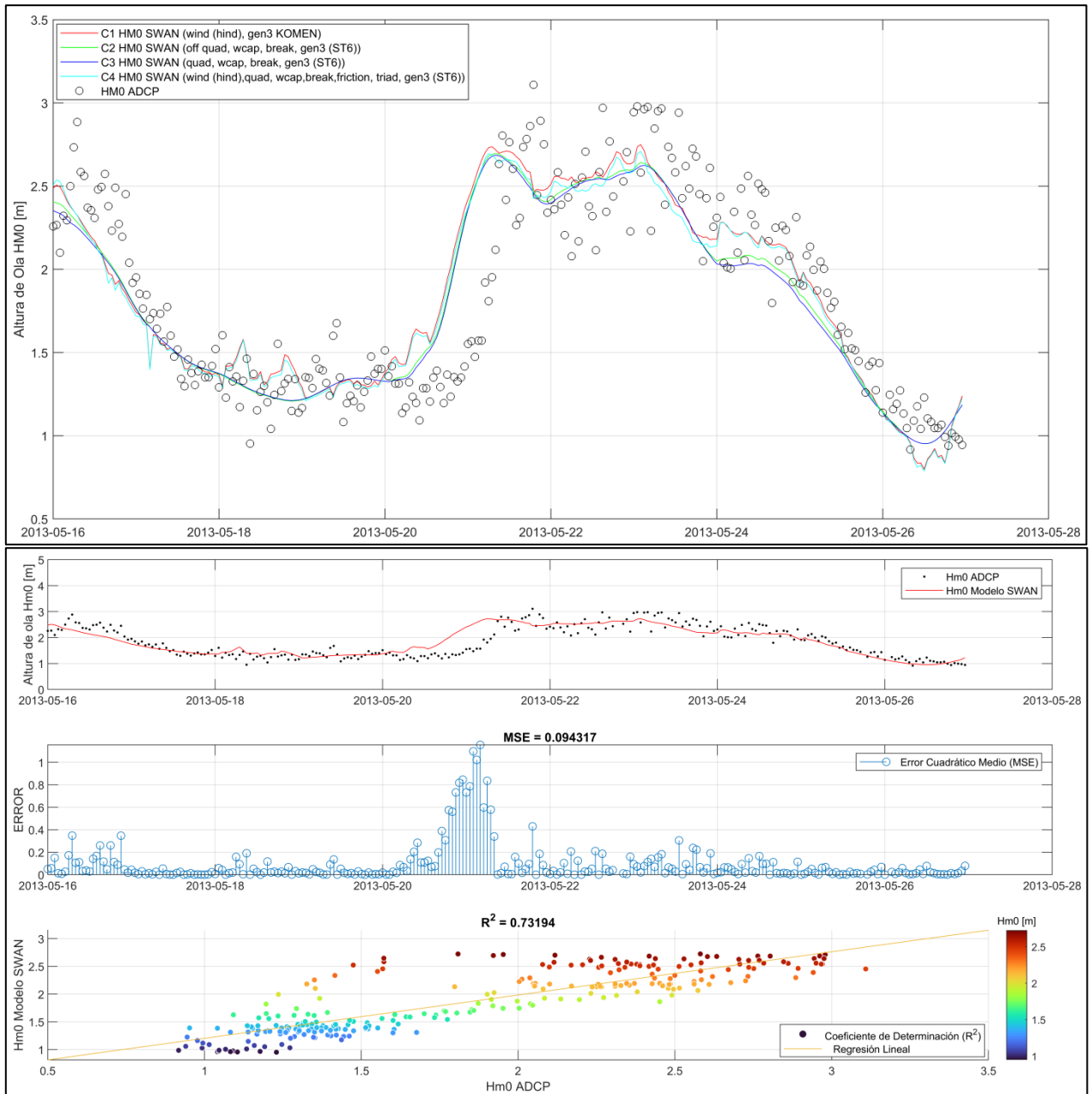
En la Figura 22 se observan 4 combinaciones de forzantes, las cuales no presentan mayores variaciones con respecto a la medición ADCP. Cabe destacar que el periodo fue para la marejada de mayo del 2013 y en el peak de la tormenta se puede apreciar que existe un leve desfase, es decir, reconoce de manera temprana el aumento de magnitud. Esto se explica debido a que los modelos de oleaje costeros presentan incertidumbres con respecto a la asimilación de datos de los modelos globales, principalmente a modelos atmosféricos de gran escala, que pueden presentar fuentes de errores debido a eventos naturales extremos. Cabe distinguir que las 4 combinaciones de forzantes representan las parametrizaciones físicas del modelo, las cuales no varían en gran medida, por lo que el desfase del modelo de oleaje se puede atribuir a factores atmosféricos del modelo global.

Antes y después del peak de la marejada, las combinaciones del modelo se ajustan adecuadamente, sin embargo, cuando se incluye viento en las parametrizaciones físicas, las combinaciones presentan mayores perturbaciones y pequeños peak en la modelación, por lo que finalmente no se consideran.

Posteriormente se realiza un ajuste lineal, obteniendo parámetros de correlación como el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio (MSE), siendo de 0.73 y 0.09 respectivamente. Estos valores indican una representación adecuada del modelo con respecto a las mediciones instrumentales.

Dado lo anterior, se opta para el uso representativo del oleaje en aguas someras, la combinación que contiene todas las forzantes.

Figura 22: Calibración modelo SWAN.



4.4 Línea de costa

De acuerdo a lo descrito en el acápite 4.2, se obtuvieron para la playa de Punta Lobos, 1036 imágenes satelitales, las cuales fueron distribuidas para 4 diferentes proyectos de obtención de series de satélites (ver Figura 23). La diferencia temporal en la obtención de cada imagen satelital es variable durante los 21 años, siendo el rango de clase entre 0-5 días las que presentan más del 35% de las imágenes y el rango entre 30 y 50 días solo el 6%, es decir, pocas imágenes superaron el mes de diferencia, lo que no alteraría un análisis estadístico mensual (Figura 24).

Figura 23: Cantidad imágenes por proyecto satelital.

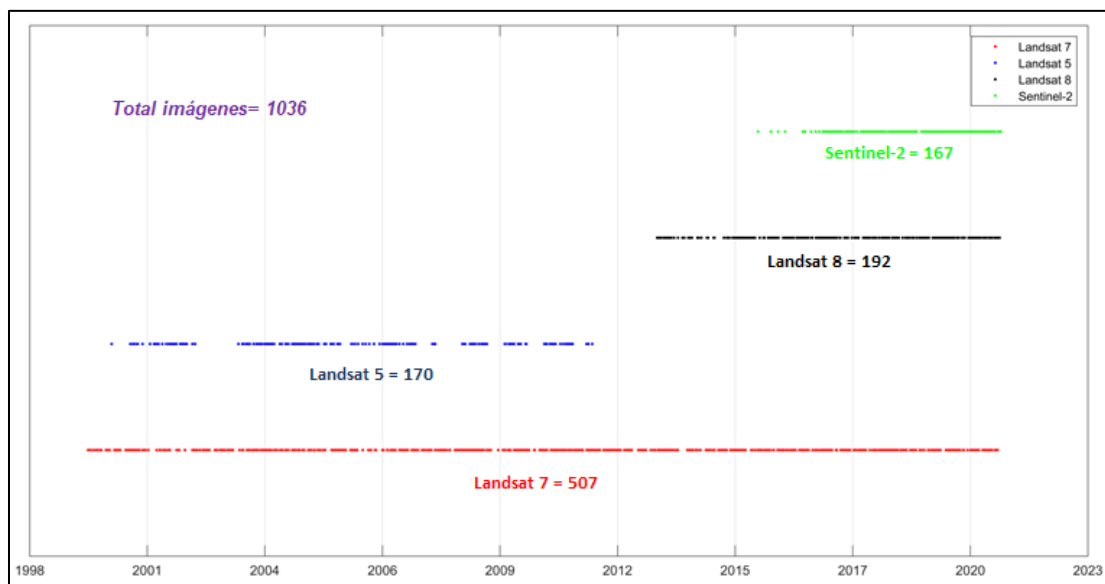
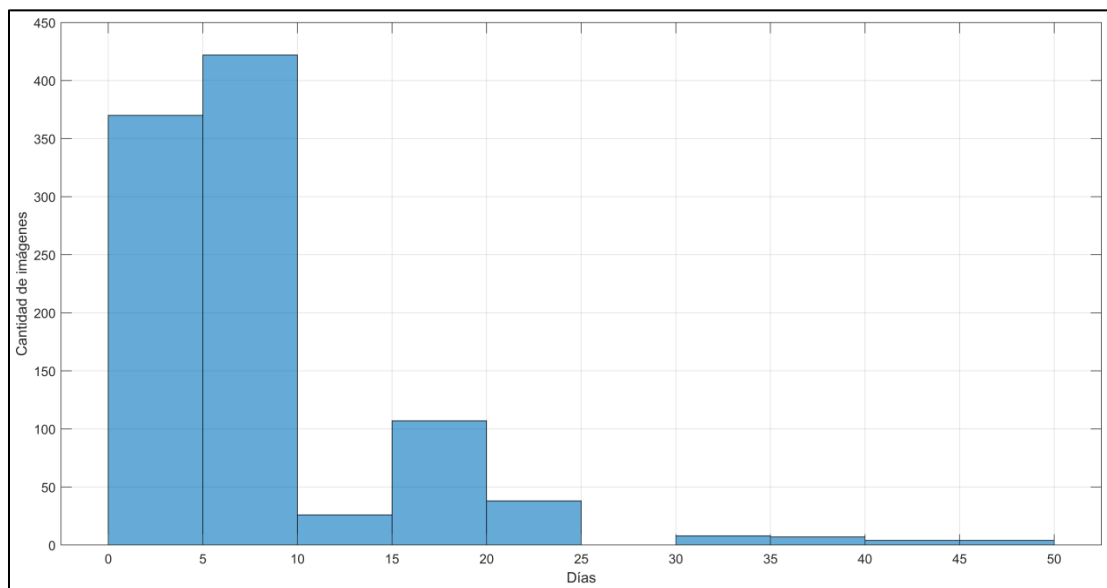
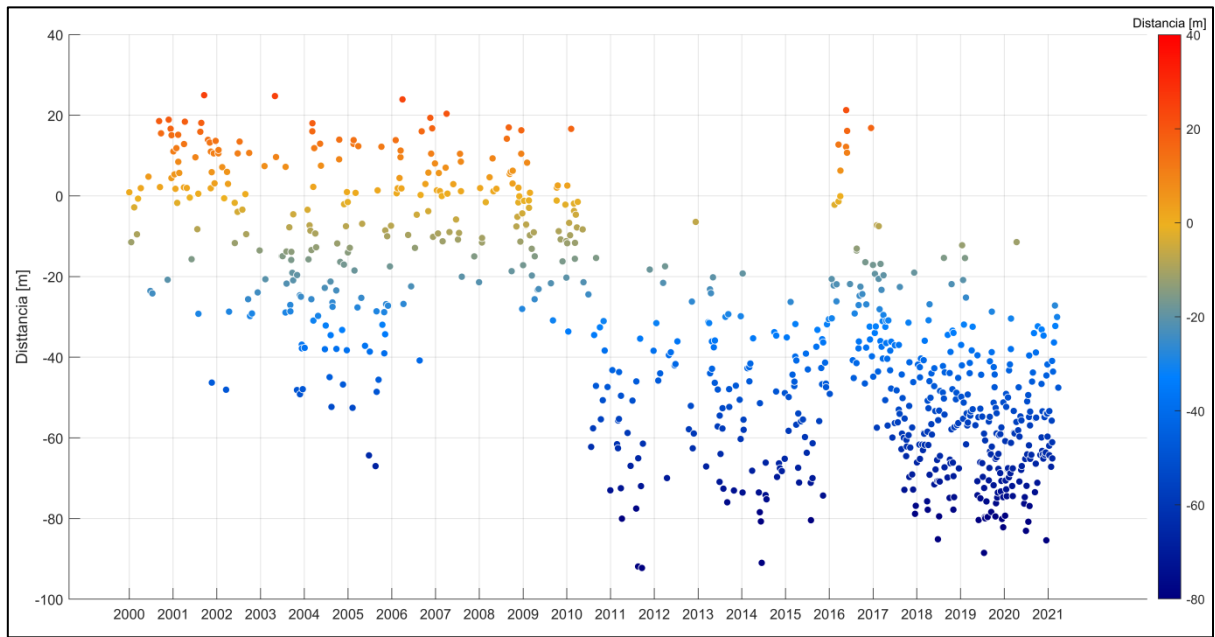


Figura 24: Histograma de imágenes satelitales obtenidas por CoastSat.



Como manera ilustrativa, en la Figura 25 se representa el perfil 7 para demostrar la variabilidad de la línea de costa a través de lo obtenido por CoastSat, siendo la degradación de color rojo un estado de acreción y la degradación del color azul un estado de erosión, obtenido como la línea de costa menos el promedio de la serie de tiempo.

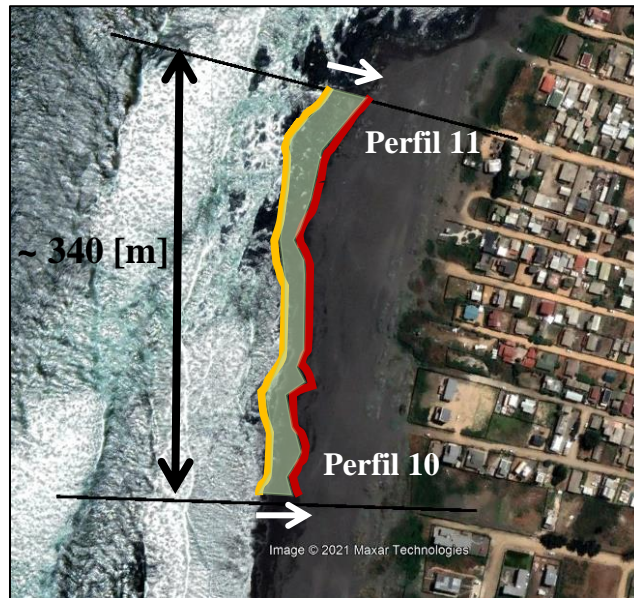
Figura 25: Variabilidad de Línea de Costa en perfil 7.



De acuerdo a lo anterior, se puede observar que existen sucesos de erosión y progradación sedimentaria a lo largo del tiempo, pero solo en un perfil. Para determinar y cuantificar el volumen y transporte de sedimentos en el tiempo se determinó para cada Δx entre perfiles el área superficial, la cual fue determinada calculando los puntos espaciales para cada perfil en cada instante de tiempo. En la Figura 26 se ilustra una aproximación en el cálculo del área, tomando como referencia la variación en cada perfil con respecto a la línea base medida y se obtiene un promedio entre ambos por el largo (Δx) que es aproximadamente 340 [m]. Debido a que el análisis es con respecto a la variación de la línea de costa y no del perfil, se asume una profundidad de 1 [m].

De esta forma, se obtiene una matriz de volumen para todos los perfiles en cada instante de tiempo, de acuerdo a la adquisición de la imagen satelital. En los casos que la variación Δt supere los 30 días, el dato obtenido será nulo para una simplicidad en el análisis.

Figura 26: Cálculo área entre perfiles.



4.5 Caracterización factores oceanográficos

4.5.1 Oleaje

Los efectos del oleaje han indicado que su predominancia han afectado directamente las zonas costeras, especialmente las playas. En el caso de Chile un importante porcentaje indica que las playas se encuentran en erosión MMA (2019), por lo que en este acápite se describirá el proceso y análisis de las principales variables de oleaje, como la altura de ola, periodo, dirección y potencia. Por esta razón, se evalúa en primera instancia la variabilidad de la línea de costa y la cantidad de imágenes que se poseen, con el fin de trabajar con la misma escala temporal.

La energía del oleaje permite obtener una caracterización de la potencia en algún punto en específico, la cual proviene de la determinación del flujo de masa, superficie libre y velocidad. Utilizando la Teoría Lineal del Oleaje, la energía es igual a:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

Por lo tanto, la potencia por unidad de longitud, será igual a la energía por la velocidad de grupo que se desplaza tal energía, resultando:

$$J = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g = \frac{\rho g H^2 T}{32\pi}$$

Se asume para una simplificación del análisis, la potencia será igual a $H^2 T$.

Como primera aproximación se efectuó el análisis con una escala temporal cada 24 horas para la altura de ola, realizando histogramas temporales, comparando la línea de costa con la diferencia espacial y temporal entre imágenes. Posteriormente se analiza la pendiente de la ola utilizando el parámetro Ho/Lo, donde Ho y Lo es la altura y longitud de ola en aguas profundas, respectivamente. Agredano *et al.*, (2019) y Poate *et al.*, (2014) establece umbrales para la evolución de playas asociadas a erosión y acreción, siendo Ho/Lo < 0.003 un estado erosivo; 0.003 < Ho/Lo < 0.01 un proceso de acreción; 0.01 < Ho/Lo < 0.03 un estado de acreción y suavizado y valores superiores a 0.03 son representativos de una fuerte erosión.

Cabe destacar que este proceso no es representativo en su totalidad debido a que los procesos morfodinámicos, por ejemplo a causa de una marejada, suceden a escalas reducidas de tiempo y no se logrará interpretar adecuadamente el proceso. No obstante se realiza un promedio mensual para la línea de costa como para las variables de altura, periodo, dirección y potencia de oleaje para los 11 puntos de control de acuerdo a la Figura 19.

Una vez determinado los promedios mensuales para cada punto de control, se realiza una climatología para las variables de oleaje, es decir, una caracterización mensual de los datos de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\bar{C} = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{N_{meses}} \bar{X}_{mesj}$$

$$\bar{X}_{mesj} = \sum_{i=1}^{N_{años}} X_{i,j} \frac{1}{N_{años}}$$

$$X_{i,j} = \frac{1}{N_{D_{i,j}}} \sum_{k=1}^{N_{D_{i,j}}} X_{i,j,k}$$

Dónde:

- \bar{C} : Climatología anual.
- $X_{i,j}$: Valor de la variable en el mes j,i.
- $N_{D_{i,j}}$: Número de datos en el mes j del año i.

De acuerdo a la expresión anterior, se realiza una climatología que corresponde al promedio de cada mes para los 21 años en estudio. De esta forma, se logra identificar la variabilidad mensual del oleaje para cada perfil trazado a lo largo de la playa. Luego se obtiene las anomalías climáticas la que corresponde a la desviación de cada variable respecto a su valor esperado. De esta forma, es posible verificar si efectivamente existe un aumento en las intensidades y frecuencia de oleaje con respecto a un valor normal y si se correlaciona con la variabilidad de la línea de costa. Para determinar las anomalías se utiliza la expresión:

$$Anomalía_j = \bar{X}_{mesj} - \bar{C}$$

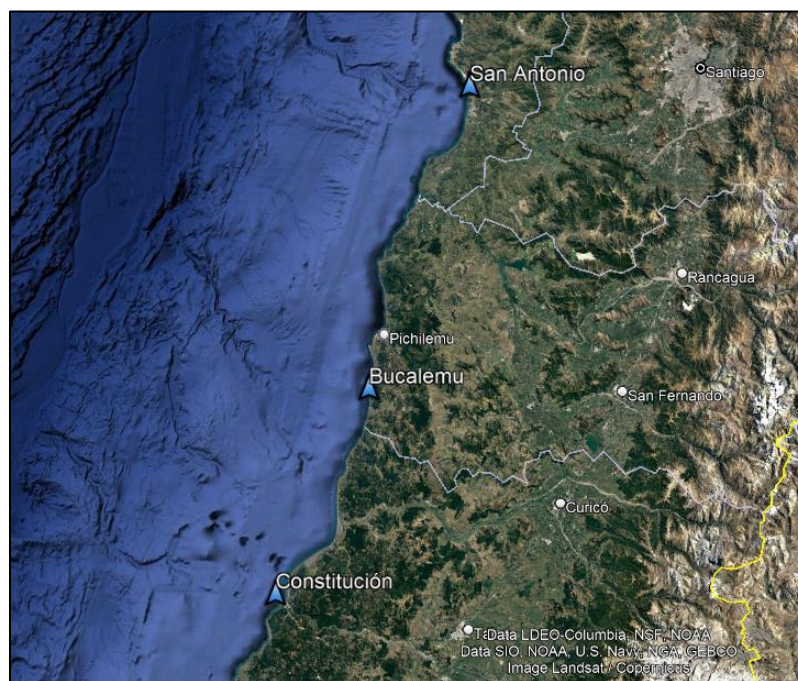
Finalmente para el proceso que se detalla en el acápite 4.9, se utilizan las variables de oleaje correspondientes al instante en la cual fueron obtenidas las fotografías aéreas, es decir diarias, de acuerdo a los perfiles obtenidos por CoastSat.

4.5.2 Temperatura Superficial del Mar y Nivel del Mar

La variabilidad climática es uno de los fenómenos que está afectando directamente el comportamiento dinámico de las playas, la cual presenta variados factores que la involucran, entre ellas es la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y el Nivel del Mar (NM). En esta sección se analizará la metodología usada para el análisis de las Estaciones del Nivel del Mar (ENM) de San Antonio, Bucalemu y Constitución, pertenecientes al SHOA y que fueron otorgadas por el CENDHOC, donde se busca interpretar si existe una variabilidad y asociación con fenómenos como El Niño.

Las ubicaciones de las ENM se presentan en la Figura 27, las cuales corresponden a las más cercanas disponibles al punto de interés que es la playa de Punta Lobos.

Figura 27: Ubicaciones geográficas de ENM.



La metodología empleada es la misma utilizada en la sección 4.5.1, utilizando promedios mensuales y una climatología de 21 años para luego determinar la anomalía. Con esto se busca comparar el comportamiento de cada estación con índices globales atmosféricos como el Índice Niño Oceánico (ONI) y PDO y determinar si existe una similitud o correlación entre ellas. De encontrar una dependencia, la TSM o NMM de la estaciones podría responder a estos índices y a una posible respuesta a la variabilidad de la línea de costa.

4.6 Caracterización factores meteorológicos e hidrológicos

El Fenómeno de El Niño y otros aspectos ambientales como los ríos atmosféricos, producen un alto índice de humedad y precipitaciones en la zona centro y sur de las costas chilenas, las que han disminuido en aproximadamente un 50% en comparación con los valores históricos (Masotti *et al.*, 2018). También la mega sequía que ha estado afectando la última década la zona central de Chile y ha contribuido a la disminución de los caudales de los principales ríos fluviales (Saldías *et al.*, 2016), no aportando el sedimento promedio histórico en las costas, generando cambios en las tasas de transporte en las playas.

Por esta razón, se analizan los caudales del Estero Nilahue en Santa Teresa, cercano a Cahuil, Río Maipo en su estación de Cabimbao, Río Mataquito en Licanten y Río Maule en Forel (Figura 30). La información se obtuvo de la Dirección General de Aguas en la sección de Hidrometeorología y Calidad de Aguas para caudales medios mensuales y diarios.

Los caudales se ven también afectados por los derechos de captación de agua a empresas y personas naturales en toda la cuenca hidrológica. En la VI Región entre el año 2007 y 2008 se otorgaron derechos a más captación de caudales, siendo el Río Rapel y Nilahue los más afectados en la extracción. En relación a la VII Región, posterior al año 2009 hubo una mayor captación de agua en los ríos Mataquito y Maule, afectando el caudal natural de las cuencas.

Figura 28: Derechos de agua VI Región en caudales medio anual.

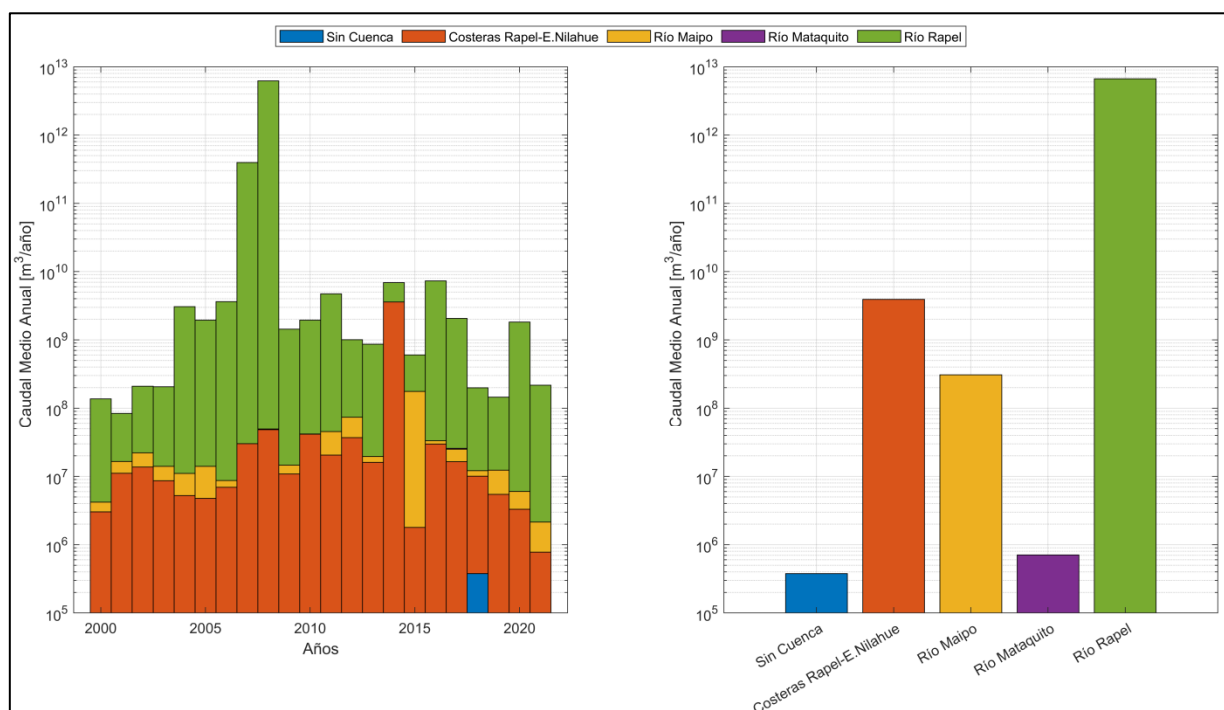


Figura 29: Derechos de agua VII Región en caudales medio anual.

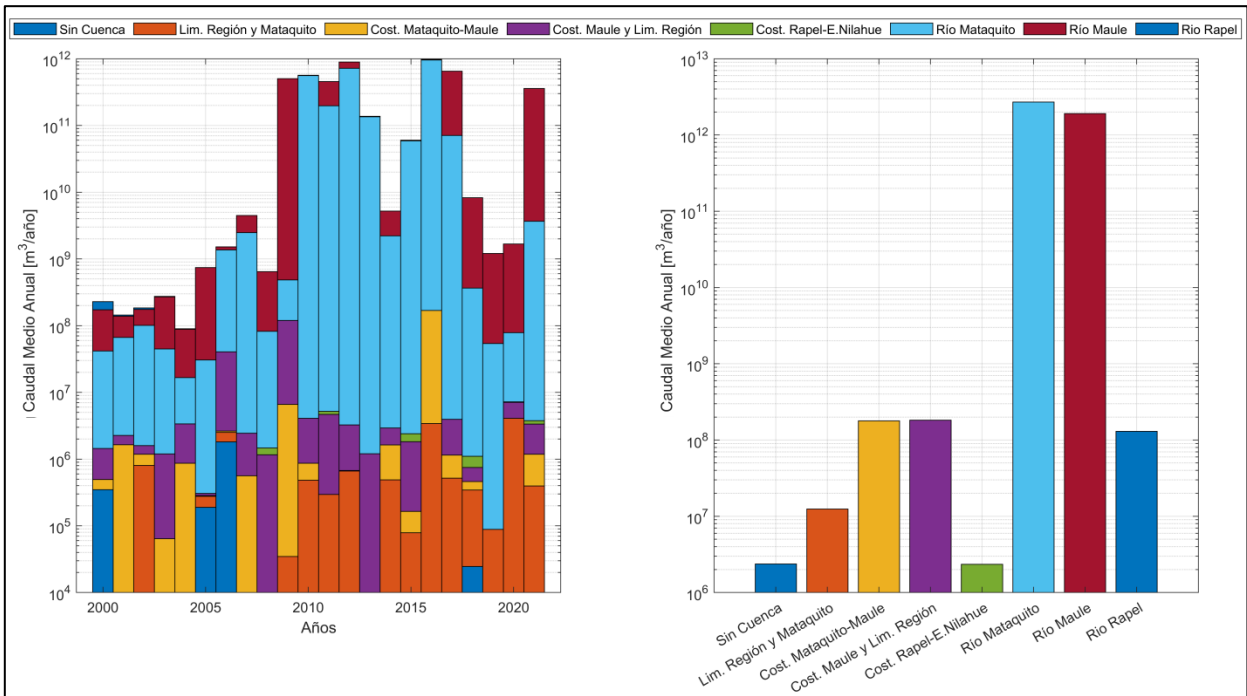
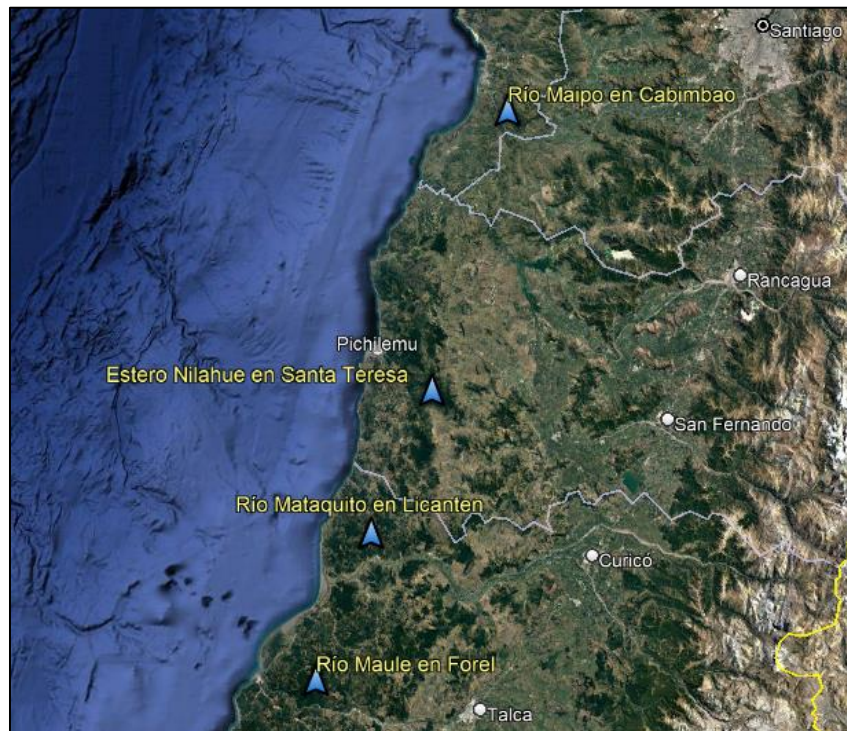


Figura 30: Ubicación Estaciones Fluviométricas.



Los caudales medios diarios se analizarán con el objetivo de realizar una regresión lineal que se describirá en la sección 4.9 y unificar todas las variables a la misma escala temporal.

4.7 Caracterización factores geofísicos

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo y las consecuencias de un terremoto afectan a gran parte del territorio (CSN, 2021), siendo las zonas costeras las más afectadas debido a posibles tsunamis posteriores al sismo que ocasionará inundaciones de gran magnitud. Estos fenómenos alteran significativamente la dinámica y el sedimento de una playa, generando procesos erosivos y/o de acreción. Sin embargo, esta dinámica sedimentaria se puede deber a movimiento verticales tanto en el proceso cosísmico como en el post-sísmico e intersísmico, variando la tasa de acuerdo a la escala temporal.

De acuerdo a Farías *et al.*, (2010), el 11 de marzo del 2010 en la costa de Pichilemu ocurrió un sismo de 7.0 Mw, por una reactivación de fallas de orientación NW-SE producto del sismo 8.8 Mw, indicativo de una ruptura cortical. El conjunto de estos dos sismos, produjo un levantamiento de 0.20 [m], no obstante, hubo un tsunami que azotó la playa, erosionando la playa y retrocediendo la línea de costa (Soto *et al.*, 2015).

Dado lo anterior, se recurre a datos de GNSS disponibles por el Laboratorio Geodésico de Nevada y por Blewitt *et al.*, (2018). La estación disponible por el laboratorio es la de Pichilemu que se encontraba situada en la posición -34.391°S y -72.003°W a una altura de 46.5 [m]. La información disponible cuenta con desplazamientos verticales, desplazamientos Este y Norte cada 1 día desde el 01-04-2010 hasta el 23-11-2017. Se disponen por lo tanto, 2682 datos sobre el movimiento vertical ocasionado después del sismo. Cabe resaltar que existían pocas estaciones GNSS instaladas previo al terremoto y en Pichilemu se instalaron posterior a este. Existe una estación ubicada en San Antonio, pero la falla del sismo no abarco tal zona, produciendo un movimiento vertical descendiente, contrario a lo ocurrido en Pichilemu. Las deformaciones de la falla se pueden encontrar en Pulido *et al.*, (2011).

4.8 Caracterización factores meteorológicos de escala global

Para poder caracterizar y comparar los datos obtenidos por las ENM, se recurre a la información de índices de escala global como son el ONI (Oceanic Niño Index) y PDO (Pacific Decadal Oscillation). De acuerdo al criterio del Western Regional Climate Center, El Niño y La Niña se clasifican según la anomalía en la TSM, según la Tabla 3. El índice ONI corresponde al índice que indica periodos cálidos y fríos bajo el umbral $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para una media móvil de 3 meses. Cuando la anomalía con respecto a la climatología de 30 años es superior a 0.5°C , se atribuye un comportamiento cálido asociado a El Niño, por el contrario, si la anomalía es inferior a 0.5°C , el comportamiento es frío asociado a La Niña. Si se encuentra entre ambas anomalías de temperatura es un periodo neutro.

El índice PDO, por el contrario, es un fenómeno que se encuentra en el Pacífico Norte y tiene 2 fases principalmente, al igual que ONI, una fase cálida y otra fría (Mantua & Hare, 2002), que

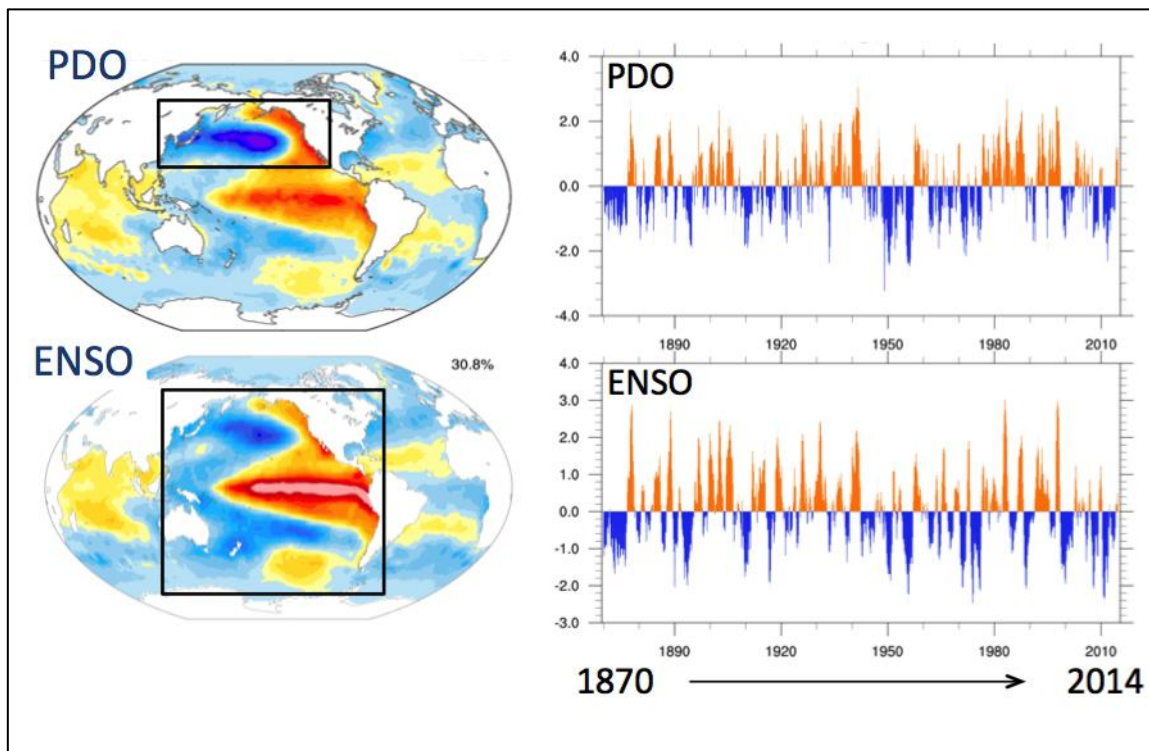
suelen alternarse entre 10 a 40 años (decadal). La principal diferencia, por lo tanto entre ambos índices, es la oscilación temporal, tal como se presenta en la Figura 31.

Tabla 3: Clasificación fases del El Niño y La Niña.

Intensidad del Evento	Anomalía °C
El Niño Muy Fuerte	$> + 2.0$
El Niño Fuerte	+ 1.5 a + 2.0
El Niño Moderado	+ 1.0 a + 1.5
El Niño Debil	+ 0.5 a + 1.0
Neutro	+ 0.5 a - 0.5
La Niña Debil	- 0.5 a - 1.0
La Niña Moderado	-1.0 a - 1.5
La Niña Fuerte	-1.5 a -2.0
La Niña Muy Fuerte	$< - 2.0$

Los datos ONI se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional de EEUU, en el Centro de Predicción Climática, disponible en su página web y los datos PDO desde NCDC de la NOAA, a través de lo efectuado por (Mantua & Hare, 2002).

Figura 31: Índice ONI y PDO.



Fuente: Deser (2016).

4.9 Modelo lineal múltiple

Para evaluar la evolución histórica, se realiza un modelo de regresión lineal múltiple, siendo la línea de costa de Punta Lobos la variable dependiente y como variables independientes los caudales medios diarios, nivel del mar, temperatura superficial del mar, deformación vertical con GNSS, índices globales como ONI y PDO y datos de oleaje, como altura de ola, potencia y dirección.

Se realizaron diversas combinaciones para cuantificar la mejor respuesta lineal a la línea de costa.

$$\text{Línea de Costa} = \beta_0 + \beta_1 Q_m + \beta_2 \text{NM} + \beta_3 \text{TSM} + \beta_4 \text{Oleaje} + \beta_5 \text{Índices}_{\text{ONI-PDO}} + \beta_6 \text{GNSS} + \beta_7 \text{LC}_{\text{CAHUIL}}$$

Dónde:

β_n	: Coeficientes de regresión múltiple.
Q_m	: Caudales medios diarios del Estero Nilahue (Cercano a Cahuil), río Maipo, río Mataquito y río Maule.
NM	: Nivel del mar.
TSM	: Temperatura Superficial del Mar
Oleaje	: Altura, Potencia y Dirección de oleaje.
Índices _{ONI-PDO}	: Índices ONI y PDO.
GNSS	: Estación GNSS en Pichilemu.
LC _{CAHUIL}	: Línea de Costa de Cahuil

Para poder implementar el modelo de predicción, es necesaria una selección temporal de las variables, por lo que se determina el día en el cual fueron tomadas las imágenes satelitales por CoastSat. Luego se determina la media para aquel día en todas las variables independientes con el propósito de observar el cambio en la misma escala.

La regresión múltiple se utiliza para hacer estimaciones del efecto que produce cada variable en combinación con las demás. Se incluye influencias simultáneas e individuales de varias variables independientes y así construir una predicción en la variabilidad de la variable dependiente. En este método se puede incluir variables con distintas unidades ya que dependen de coeficientes lineales constantes para cada variable independiente y que son parámetros en el modelo de regresión lineal. Estos coeficientes dependen de que otras variables se incluyan en el modelo. El coeficiente β_j indica la variación de la línea de costa, dada una variación unitaria de una variable independiente.

La variación de la variable dependiente es compleja de estimar porque las variables independientes se encuentran relacionadas no solo con la variable dependiente sino también entre sí. Por ejemplo el índice ONI se relaciona a la variabilidad de la línea de costa, pero también se relaciona con la potencia del oleaje y ambas modulan simultáneamente. Si dos variables independientes o más varían en una relación lineal directa entre sí, es complejo determinar el efecto que produce cada variable independiente en la variable dependiente. Por lo tanto se asumirá para cada combinación independiente, es decir, las perturbaciones aleatorias son independientes entre sí.

5. Resultados

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis para distintas variables tanto oceanográficas, hidrológicas, meteorológicas y geofísicas en distintas escalas temporales para luego compararlas con la evolución de la línea de costa y verificar si existe una correlación a su movimiento. Como primera fase, se presentan los resultados de las evoluciones de las líneas de costas de la playa de Punta Lobos y Cahuil con el fin de cerciorar si existe una similitud en su comportamiento y que los procesos erosivos o de progradación son fenómenos a escala global y no local. Luego se obtiene un diferencial entre ambos análisis para eliminar las componentes externas asociada a los procesos erosivos y/o de acreción, como los aportes de sedimentos fluviales o forzantes de oleaje que podrían incidir en la variabilidad. Como segunda fase se presenta el resultado de la modelación numérica de oleaje y luego se analiza para distintas escalas temporales, tanto para altura, periodo, dirección y potencia de ola. Como tercera fase, se presentan los resultados de los aspectos oceanográficos, hídricos y geofísicos y su relación con la línea de costa. Finalmente, se evalúa la capacidad de modelos de correlación lineal múltiple construidos a partir de las combinaciones de las variables medidas y modeladas, de predecir la evolución de la línea de costa observada. Se contrastan los resultados para cada variable y combinación, obteniendo el mejor ajuste a la línea de costa mediante el coeficiente de correlación de Pearson y valores de dispersión.

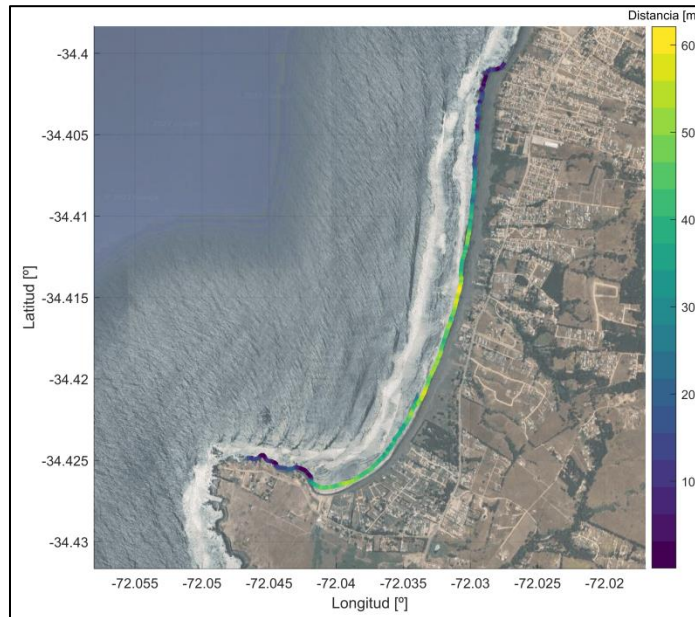
5.2 Variación líneas de costas

5.2.1 Playa Punta Lobos

De acuerdo a la literatura se ha mencionado que la playa de Punta Lobos ha presentado importantes retrocesos en su línea de costa, por lo que se calcula las diferencias entre la primera línea de costa obtenida y la última. En la Figura 32 se representa el cambio neto de la línea de costa por un periodo de 21 años, comparando el año 2000 con el año 2021, en la cual se puede inferir que en toda la playa ha existido un retroceso y estados de erosión, siendo los extremos donde el retroceso ha sido menor con 10 [m] y en la zona central de la playa de hasta 60 [m]. Por lo tanto, según el estado de arte e investigaciones, los resultados indican que efectivamente existe un retroceso de la playa a lo largo del tiempo y que sus variaciones dependerán de la escala temporal en la que se mida y la disponibilidad de información.

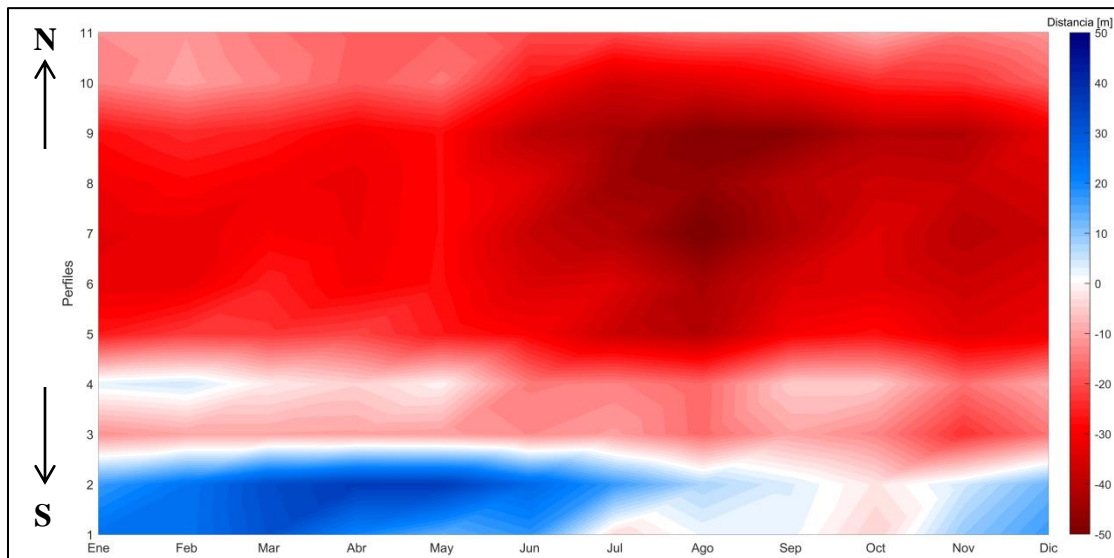
De esta manera, se obtiene una climatología mensual de la línea de costa de Punta Lobos para determinar cuál es su variación y verificar cuando existe una condición de acreción y/o erosión para esta escala de tiempo.

Figura 32: Variación métrica de la playa Punta Lobos luego de 21 años.



En la Figura 33 se presenta la condición dinámica de sedimentos a lo largo de la playa Punta de Lobos de 21 años, considerando el comportamiento de un año promedio (siendo el signo negativo erosión y positivo acreción), observando un cierto pivote cercano al perfil 5 con pequeñas variaciones mensuales, sin embargo, hacia el norte, la playa presenta retrocesos de hasta 50 [m] y hacia el sur, avances de 40 [m]. En los meses de marzo a mayo, los perfiles al sur del pivote, presentan un avance en la línea de costa. Por el contrario, en los meses desde junio a noviembre, los perfiles al norte del pivote presentan un fuerte retroceso (cambios netos). Ahora bien los perfiles más extremos de la playa son los que presentan más variación en los respectivos meses mencionados. Esto sugiere un posible transporte a lo largo de la playa, que no se considerará en análisis posteriores.

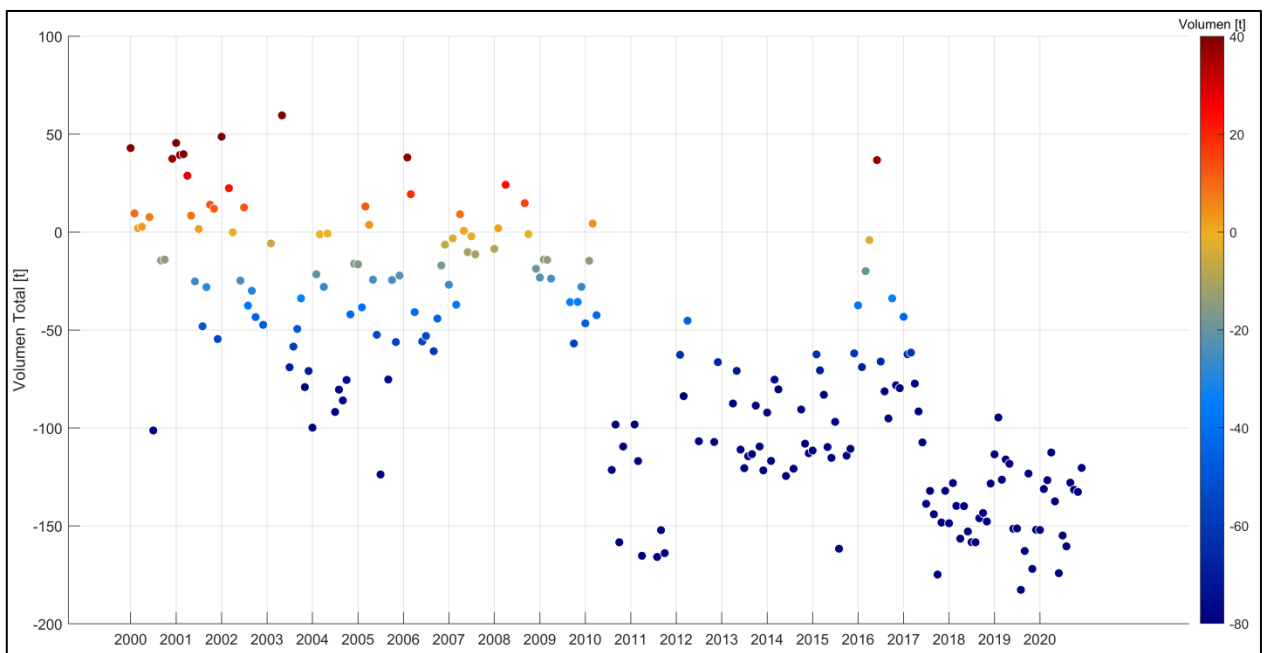
Figura 33: Variación temporal mensual de la Playa de Punta Lobos.



5.2.2 Tasa de Volumen de Sedimentos en Playa Punta de Lobos

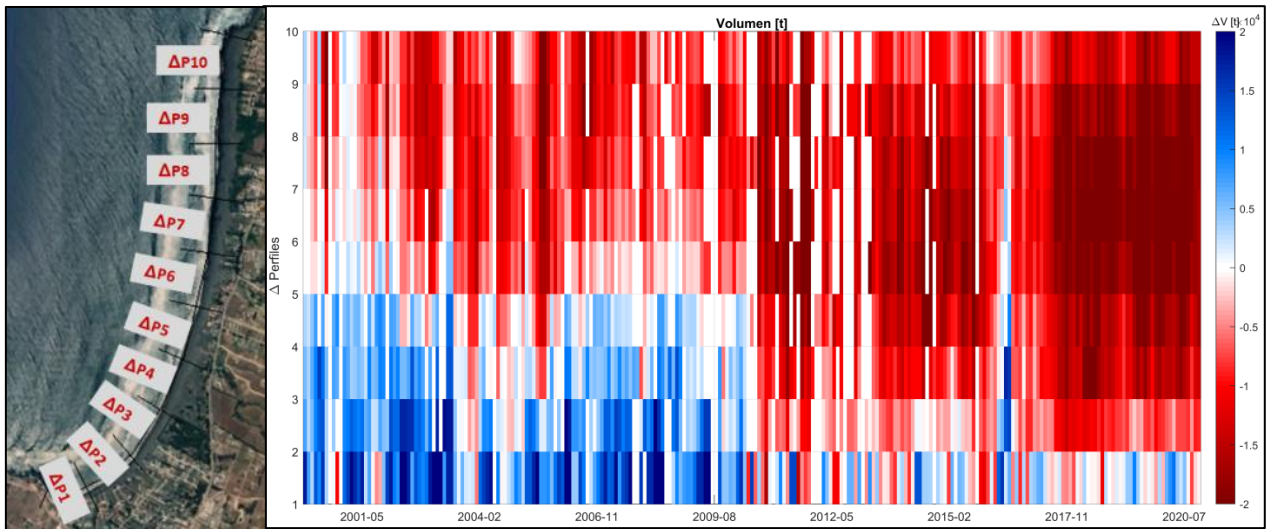
De acuerdo a la metodología y lo descrito en la Figura 26, se determina la variación de volumen total a lo largo la playa, la cual presenta una similitud en su comportamiento en relación a la variación de un perfil medio (Figura 34). Se observa, que durante los años 2000-2009, existía un equilibrio en el volumen transportado, visualizando estados de erosión y acreción que fluctúan con una tendencia leve de erosión. Sin embargo, en el año 2010, en conjunto con el evento de La Niña y el sismo 8.8 Mw, se presenta un retroceso en el volumen total de la playa. También se destaca un pico en el volumen de sedimentos el año 2016, factor que es coincidente con la relación del evento El Niño y la relación con el índice PDO, expuesto en el acápite 5.2.4.

Figura 34: Variación de volumen en playa Punta de Lobos.



Así mismo, para observar la variación en cada perfil de manera independiente, se determina el cambio de volumen de sedimentos por tramos, según la metodología descrita en 4.4. En la Figura 35 se observan los cambios, principalmente en el año 2010 y la disminución de volumen para la gran mayoría de perfiles. Durante el año 2015-2016 se observa un aumento de volumen para todos los tramos al sur del perfil 8, hacia el norte se presenta una leve disminución. Posterior, se visualiza una fuerte disminución de sedimentos en todos los perfiles desde el invierno de 2017 hasta agosto 2020. Cabe destacar que aproximadamente del año 2013 que se dispone imágenes de 3 satélites, Sentinel-2, Landsat 8 y Landsat 7, por esa razón, la densidad de información es mayor y con mejor calidad de resolución. Previo a este periodo se disponía solo de Landsat 7 y 5, siendo las imágenes del último de baja resolución y con mayor diferencia temporal (ver Figura 23).

Figura 35: Variación de volumen en playa Punta de Lobos por diferencia entre perfiles.

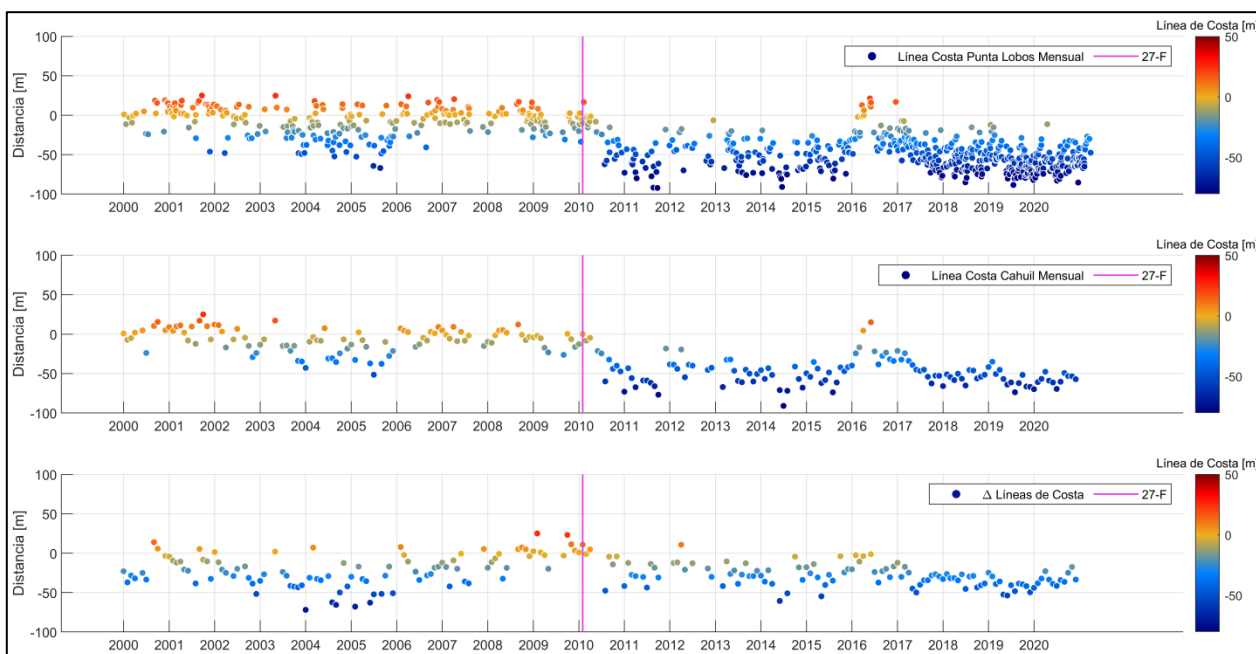


5.2.3 Relación de Playa Punta Lobos y Cahuil

Para una representación evolutiva de la línea de costa de Punta Lobos se considera un perfil medio de la playa y para Cahuil el más cercano al Estero. Posteriormente se realiza un diferencial entre ambas para verificar su variación.

En la Figura 36 se representan ambas líneas de costa y el diferencial entre ambas, de la cual se puede observar que desde el año 2000 hasta antes del terremoto y posterior tsunami del año 2010, la variación de la playa de punta Lobos y Cahuil presentan con un estado similar de equilibrio sin grandes cambios en el volumen de sedimentos, pero posterior al año 2010, ambas líneas de costa presentan un retroceso, coincidente con lo observado en el estado de arte y literatura. Luego en los siguientes años, las playas no presentan las condiciones de restablecerse como se encontraban originalmente, permaneciendo en un estado erosivo hasta aproximadamente los años 2015-2016, cuando la línea de costa avanza considerablemente, visualizando un pico local en ambas playas.

Figura 36: Series de tiempo de Punta Lobos, Cahuil y diferencial.



5.2.4 Playa Punta Lobos y su relación con ONI y PDO

Como factores que pueden influir en un comportamiento de la evolución de la línea de costa, se compara con la oscilación de los índices ONI y PDO, para determinar si el comportamiento de erosión o acreción es debido a fenómenos de escala global.

Como se representa en la Figura 37, se incluye los índices ONI y PDO en las series de tiempo de la línea de costa y en la Figura 38 los límites de escala, identificando que el índice ONI, que es medido en la línea ecuatorial, presenta varios eventos de El Niño desde el año 2000, siendo los del año 2002, 2006, 2009-2010, 2014-2016 y 2018-2019 los principales. Dentro de la escala temporal que se está trabajando existe un evento de El Niño considerado como muy fuerte o popularmente conocido como *El Niño Godzilla*, entre los años 2014-2016. Durante este periodo las precipitaciones en la Estación pluviométrica de Pichilemu eran superiores que los años anteriores debido al evento de escala global, al igual que los caudales de los principales ríos fluviales cercanos a Pichilemu. Se observa que posterior al evento de *El Niño Godzilla*, se observa un avance de la línea de costa de Punta Lobos como de Cahuil de manera desfasada, aproximadamente 200 días después, como posible causa de aporte de sedimentos fluviales.

Coincidentemente existe una transición de El Niño a La Niña en el momento que ocurrió el sismo 8.8 Mw el año 2010, identificando un retroceso de la línea de costa con un evento La Niña.

Se podría inferir, por lo tanto, que las mayores variaciones de avance de la línea de costa, tanto para Punta Lobos como para Cahuil, ocurren cuando existe un evento El Niño superior a la anomalía de $+2^{\circ}\text{C}$, como se representa en la Figura 38 con línea horizontal roja. La variación del

índice PDO es similar al ONI, con una oscilación más suave temporalmente, indicando un aumento de temperaturas antes de los procesos de progradación en las playas. Tanto la playa de Punta Lobos como Cahuil, se comportan de manera análoga con respecto a las oscilaciones de los índices climáticos, destacando, por lo tanto, la posibilidad que los efectos que ocurren en la playa de Punta Lobos no son locales sino más bien a causa de procesos globales desfasados.

Figura 37: Comparación Líneas de Costas con índices ONI y PDO.

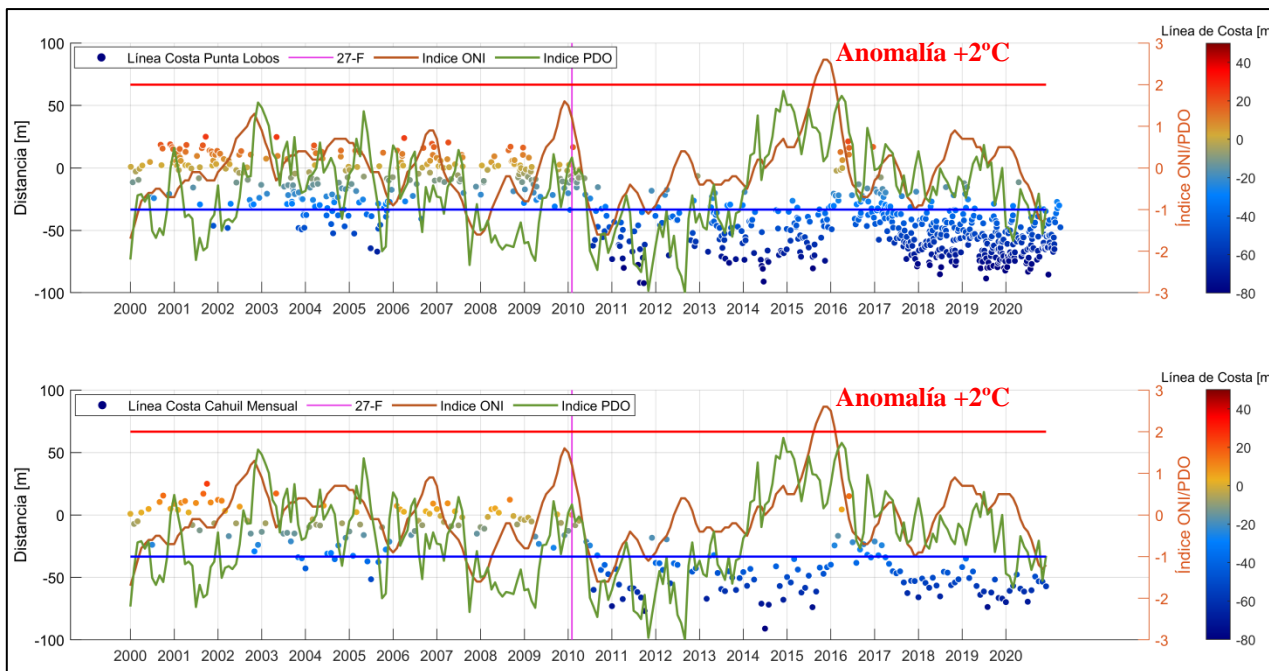
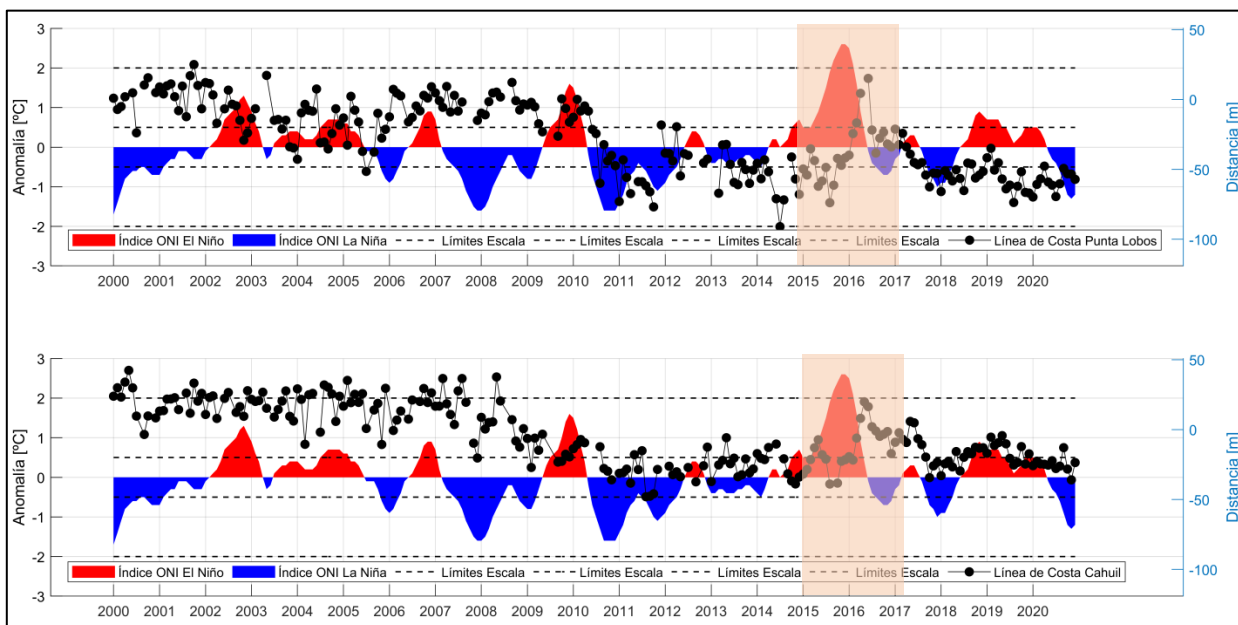


Figura 38: Comparación Líneas de Costas e índices ONI.

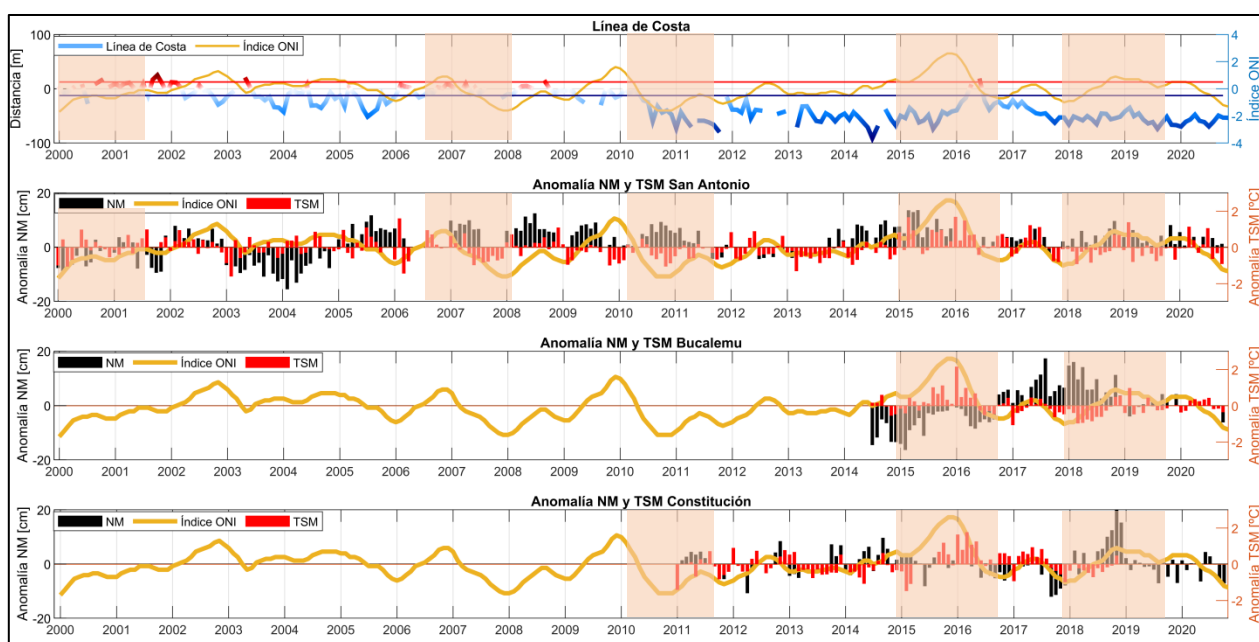


5.2.5 Relación Línea de Costa, NM y TSM

De acuerdo a lo estipulado en MMA (2019), el nivel absoluto del nivel del mar aumentará en el orden de ± 0.1 [m] a lo largo de Chile y ± 0.15 [m] al sur. Por otro lado, según reportes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), indican proyecciones en el marco de la RCP 2.6 y la RCP 8.5, un aumento promedio de 3°C para la TSM. Dado estos índices se utilizó datos de las ENM del SHOA para determinar la variabilidad del NM y TSM de las estaciones de San Antonio, Bucalemu y Constitución. En la Figura 39 se representa la variación de la línea de costa de Punta Lobos con el índice ONI y las anomalías del NM y TSM media mensual. De ella se puede observar que la TSM (color rojo) se ajusta, en gran medida, a la oscilación del índice ONI para los periodos con mayor rango de anomalía, es decir, para eventos La Niña y El Niño. En el caso del NM para la estación de San Antonio existe un aumento en conjunto con la TSM para *El Niño Godzilla*, debido como en algunos casos, a ondas Kelvin propagadas desde el Ecuador (Hormazabal *et al.*, 2001). Las estaciones de Bucalemu y Constitución no presentan mayores similitudes al índice ONI con respecto al NM.

Por lo tanto, las ENM representan una aproximación al aumento de la TSM a nivel global, sin embargo, el NM no se ajusta en las 3 estaciones, solo en San Antonio para un evento El Niño.

Figura 39: Línea de costa y la relación con NM y TSM.



5.2.6 Relación Línea de Costa y caudales de ríos medios mensuales

Dada la Mega Sequía que azota a Chile en la última década y con el propósito de inferir si los aportes de sedimentos por los ríos podrían contribuir a la erosión y/o acreción de la playa de Punta Lobos, se utilizan los caudales medios mensuales. En la Figura 40 se presentan los caudales medios mensuales, observando una disminución para los 3 ríos y estero en 21 años. Durante el año 2000 y 2007 aproximadamente, el río Maipo y Estero Cahuil contenían caudales mayores al promedio de 21 años, sin embargo, luego del 2007, se ha observado una disminución considerable, debido probablemente, a la escases de precipitaciones y/u otro factores no climáticos. Para el caso del río Mataquito, los caudales presentan medias mensuales superiores, al igual que el Río Maipo, para los años 2000-2007, posterior a esa fecha se visualiza una disminución constante. El Río Maule, al igual que los ríos al norte, presenta una disminución en sus caudales.

La línea de costa ha retrocedido posterior al terremoto y posterior tsunami del año 2010, pero paralelamente la zona central de Chile, ha disminuido los caudales y precipitaciones, factor que podría potenciar la dinámica de la playa. Anterior al año 2010, las precipitaciones eran abundantes (en comparación a la actualidad) y no se presentaban índices de erosión relevante, sino más bien cambios estacionales estables debido a la acción del oleaje y/o aporte de sedimentos por ríos. Otro factor que podría inducir a la disminución de caudales en zonas de desembocaduras o cercanos al mar, es el aspecto antropogénico provocado principalmente por la construcción de obras hidráulicas que interfiere el flujo natural de los cauces aguas arriba y que han ido en aumento en la última década, como también en la extracción de áridos en playas. Cabe mencionar que la zona central del país es donde más embalses existen, tal como lo representa la Figura 41 y que pueden, de cierta manera, influir en los aportes de sedimentos a la zona costera. En el Caso de Pichilemu, existen alrededor y cercanías una gran cantidad de embalses.

Figura 40: Línea de costa de Punta Lobos y caudales medios mensuales.

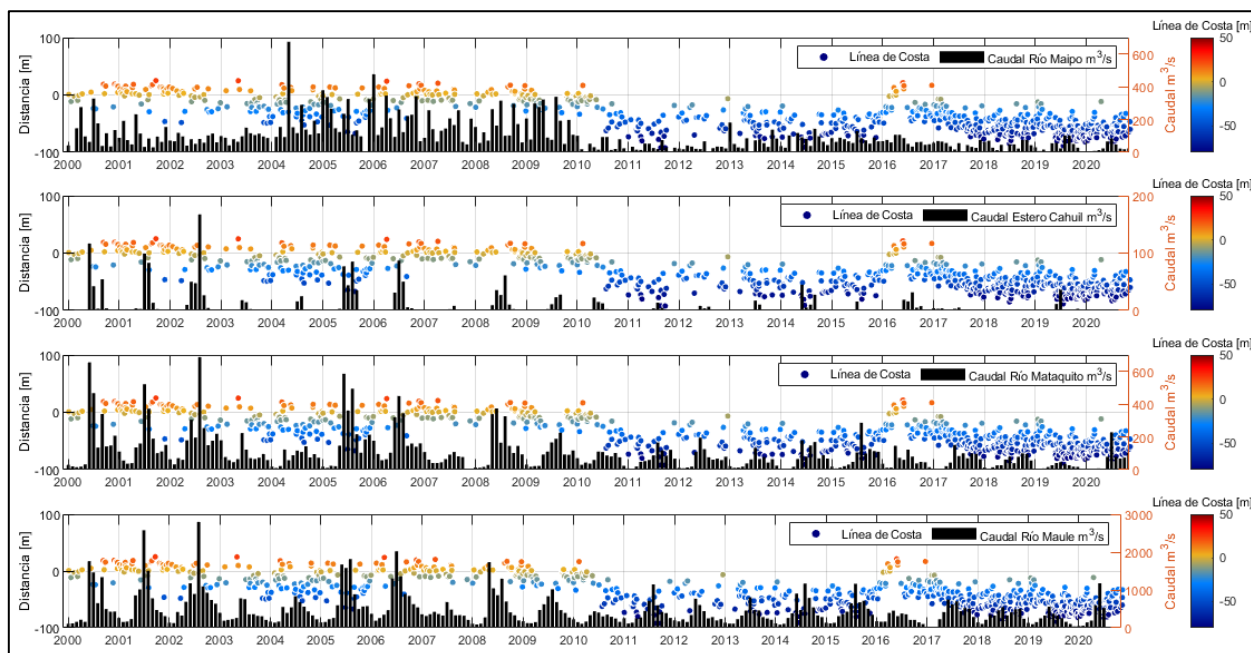
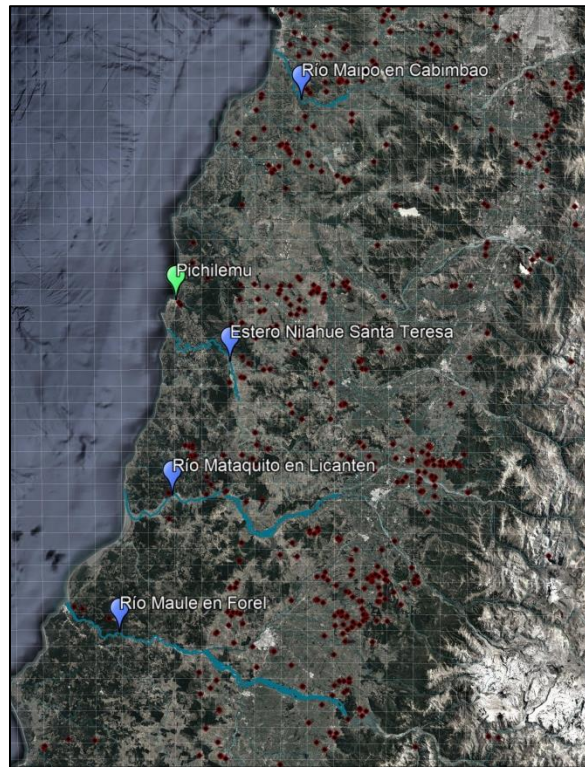


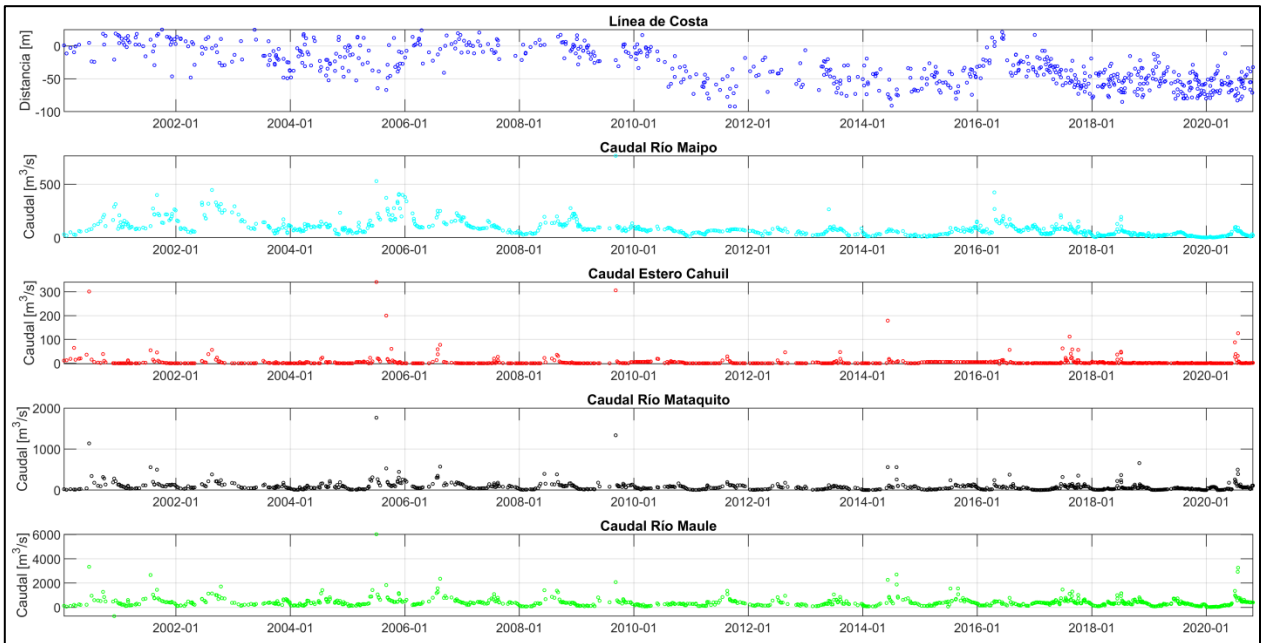
Figura 41: Embalses de Chile (círculos rojo) y estaciones de la DGA.



Fuente: Datos de DGA.

Para ilustrar el comportamiento en el instante preciso de la línea de costa, se utilizan caudales medios diarios, con el propósito de identificar los eventos de El Niño y La Niña a escalas reducidas e inmediatas. La Figura 42 representa por lo tanto, la línea de costa media diaria con los caudales medios diarios, donde se observan importantes peak de caudales para los eventos climáticos referidos anteriormente. Cabe distinguir que los peak más relevantes fueron para el año 2006 e inicios del 2010, en coincidencias con evento de El Niño y avance de la línea de costa, en excepción el año 2010 por causas del sismo 8.8 Mw. Se identifica que los aportes del Río Maipo el año 2015 es el que contribuye al avance de la línea de costa, posiblemente en mayor medida que los otros ríos que se encuentran más lejanos a la zona de interacción. Para todos los casos se observan menos cantidad de peak a partir del año 2010, identificando la disminución de precipitaciones y caudales.

Figura 42: Línea de costa de Punta Lobos y caudales medios diarios.



5.2.7 Relación Línea de Costa y deformación vertical por sismo

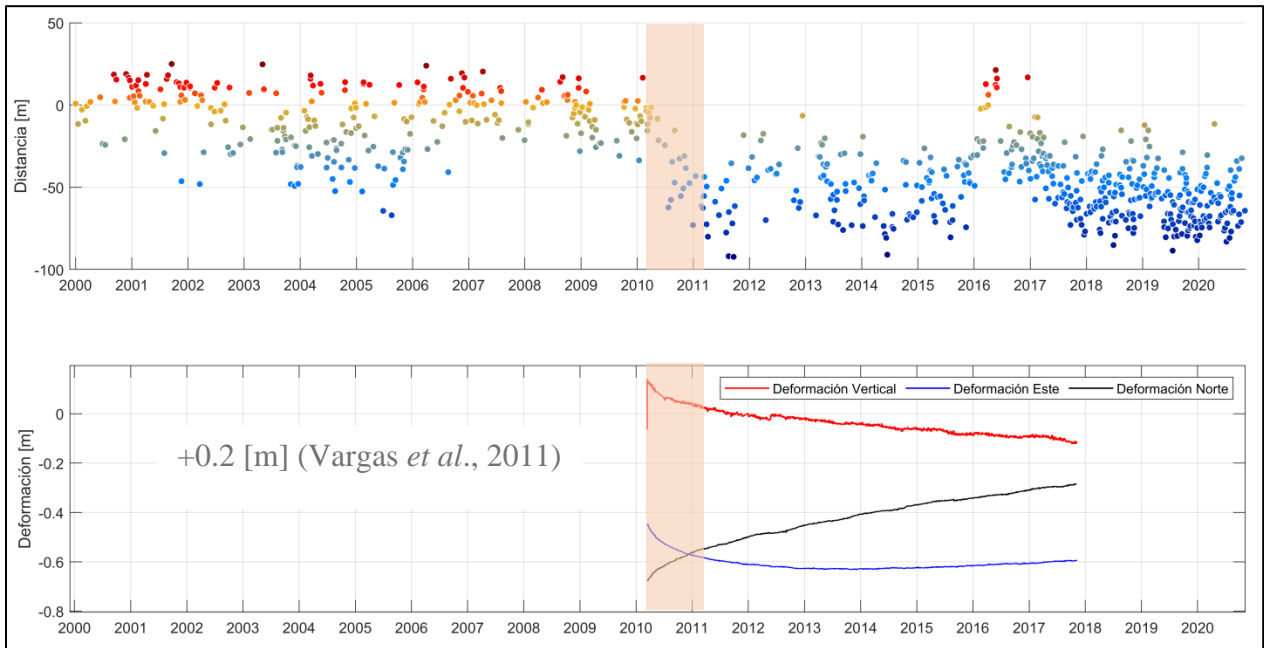
Posterior al sismo 8.8 Mw, hubo un levantamiento del terreno en diversas localidades, tal como lo expone Vargas *et al.*, (2011), tal es el caso de Pichilemu con 20 [cm], de acuerdo a mediciones visuales. El instrumento GNSS fue instalado el 01-04-2010 antes del evento, por lo que no se pudo adquirir la medición de la deformación mediante instrumentos. Posterior al desplazamiento cosísmico, la etapa intersísmica ha evidenciado un hundimiento en el tiempo (7.65 años) de 26 [cm], mayor al desplazamiento provocado por el sismo.

Como se expone en el acápite 5.2, la línea de costa posterior al sismo 8.8 Mw y tsunami del año 2010, retrocedió evidenciando un proceso erosivo en la playa Punta Lobos. Si bien existió un levantamiento de 20 [cm], el tsunami erosionó la playa, independiente del proceso de desplazamiento vertical positivo. Luego de ambos eventos, el terreno de la playa se ha hundido en el tiempo, provocando posiblemente los procesos erosivos en la playa.

Existen diversos factores que pueden haber incidido en los cambios de la playa, ya sean por el levantamiento vertical cosísmico, el tsunami y posterior hundimiento intersísmico.

En la Figura 43 se representa los desplazamientos verticales, Este y Norte del GNSS instalado en Pichilemu y la variación de la línea de costa. Se observa, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, que posterior al año 2010 la línea de costa se ha encontrado en un proceso erosivo al mismo modo que el proceso de hundimiento del terreno de 26 [cm].

Figura 43: Deformación vertical en Pichilemu, posterior al 27 febrero de 2010.



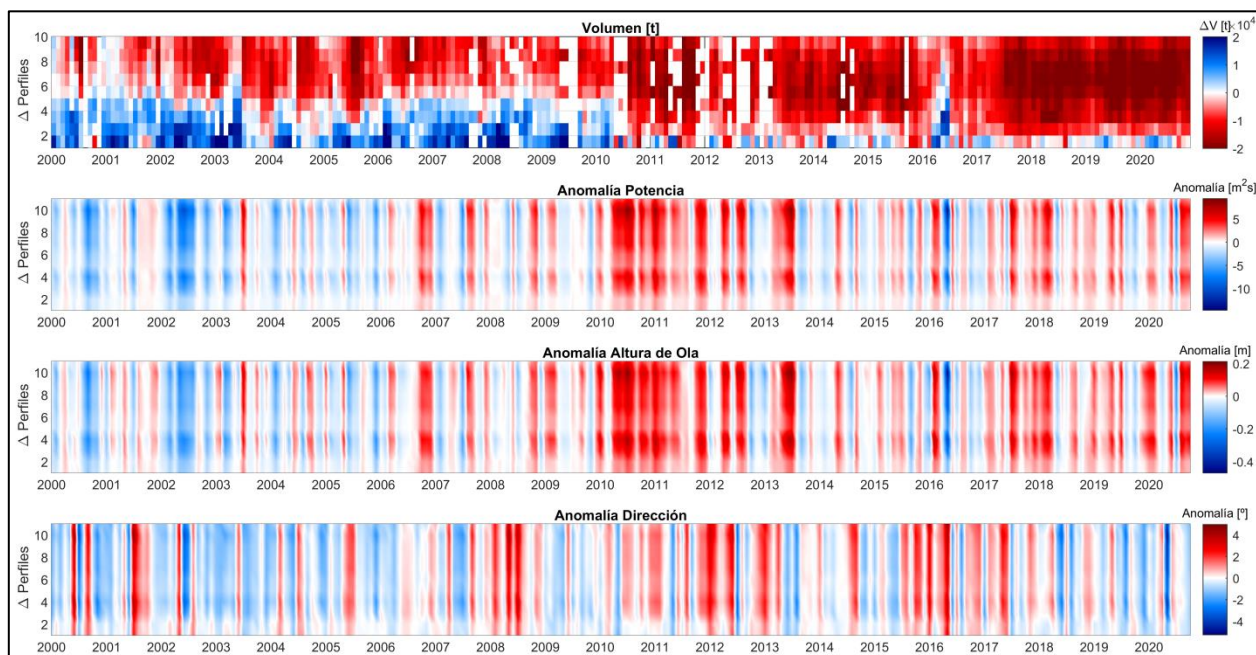
5.3 Resultados Modelación Numérica de Oleaje

En este acápite se describirán los resultados obtenidos para la modelación numérica mediante SWAN en puntos de control cercanos a la costa y las diferentes variaciones que presentan las variables de potencia, altura y dirección de oleaje en el tiempo. Posteriormente se compara con los cambios de la línea de costa, con el objetivo de evaluar las variaciones en el oleaje son las que inciden en los cambios locales de corto y largo plazo en la playa de Punta Lobos.

En la Figura 44 se representa la variación de anomalías de la potencia, altura de ola y dirección media mensual y el volumen a lo largo de la playa mediante los perfiles trazados. Cabe mencionar que se utilizó una climatología de 21 años para la determinación de las anomalías. De la figura se puede observar que para la potencia y altura de ola, desde el año 2010 se presentan anomalías positivas (es decir, mayor energía y altura) hasta el año 2014 aproximadamente con $5 \text{ [m}^2\text{s]}$ de diferencia y 0.2 [m] , respectivamente. Posterior a aquello, se observa una variación estacional constante, con anomalías positivas y negativas sin una tendencia o aumento en la magnitud o frecuencia. Durante los años 2000 a 2010 se observa una mayor frecuencia de anomalías negativas que se intensificaron el año 2010. No se observa una tendencia clara en la distribución, con excepción al año 2010, coincidente con el terremoto 8.8 Mw y posterior tsunami, donde el volumen a lo largo de la playa disminuye con un aumento en la potencia y altura de oleaje. En relación a los cambios de dirección, se observa que durante el rango 2010 al 2014 hubo una reorientación del oleaje de hasta $+4^\circ$ girando al

norte, como en el año 2015-2017. Posterior a esta fecha, se observa una reorientación de -4° , indicando que el oleaje proviene más desde el sur.

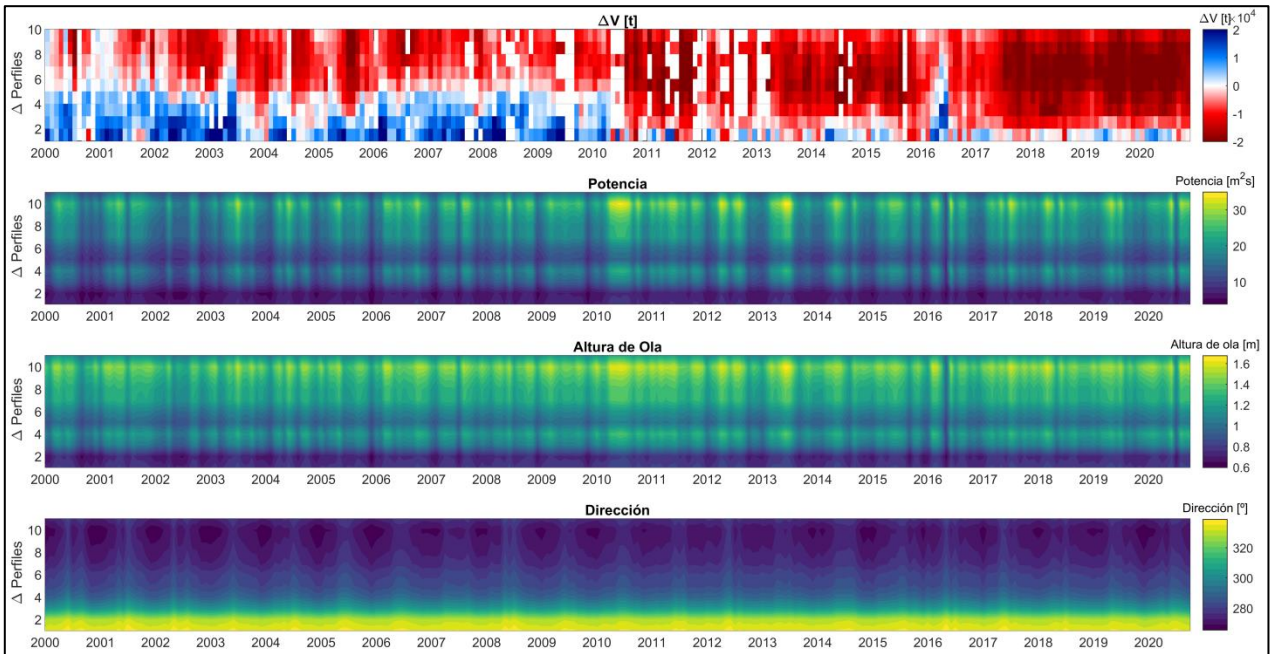
Figura 44: Variación anomalías de oleaje con Línea de Costa de Punta de Lobos.



Para poder visualizar los comportamientos con las unidades correspondientes de magnitud, se presenta en la Figura 45, en donde se observa un aumento en la potencia como altura de ola en el periodo del año 2010. Se denota además, en el perfil 4 un aumento en la potencia en relación a los perfiles colindantes, posiblemente debido a oleaje proveniente del hemisferio norte o por el llamado oleaje aleutiano. En relación a la dirección, se deduce que entre los años 2000 y 2006 como desde el 2018 a 2020, una reorientación del oleaje hacia más al sur, sin embargo, entre estas fecha se observa una orientación más hacia el norte. Los perfiles ubicados hacia el norte de la playa, se ven afectados por frentes provenientes de oleaje desde los $250 [^\circ]$ aproximadamente y los perfiles del sur se reorientan hacia el norte por efectos de difracción y refracción.

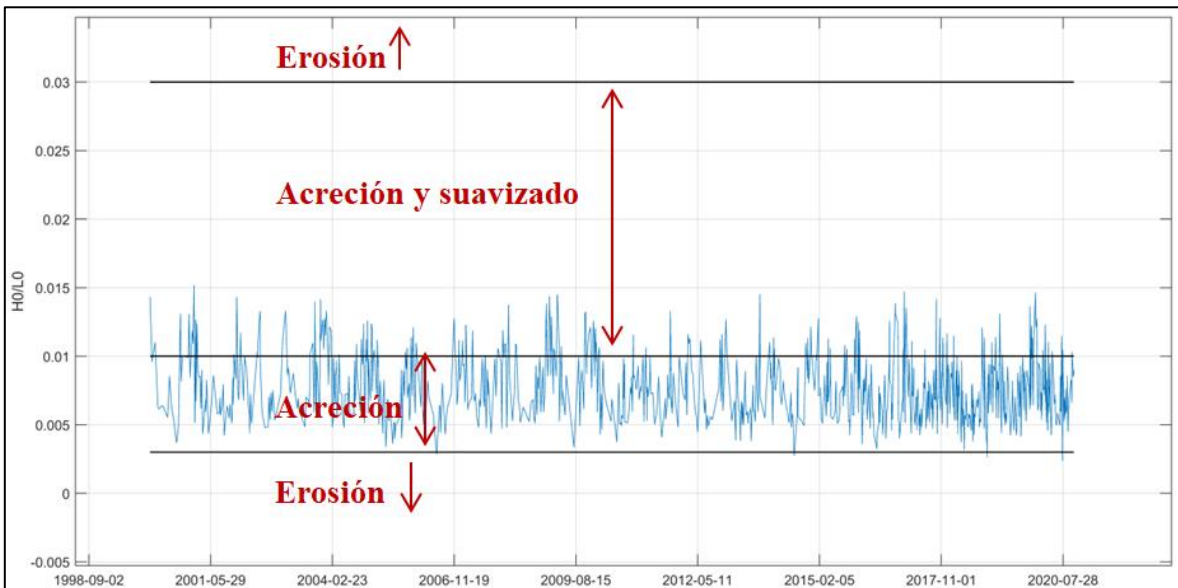
Se infiere, que la potencia y altura de ola aumentan su magnitud en el año 2010 donde la variación de volumen de sedimentos de la playa se reduce y que durante el periodo de *El Niño Godzilla* (2015-2017), la magnitud disminuyó, coincidente con un aumento de volumen en la playa. Por otro lado, se observa que no existe un aumento en la magnitud de oleaje en los últimos años en la playa Punta de Lobos, sino más bien se observa un proceso estacional normal para los 21 años de estudios.

Figura 45: Tasa de cambio de volumen y variables de oleaje con Línea de Costa de Punta de Lobos.



Para identificar posibles procesos de progradación y erosión de una playa, se determina la pendiente de la ola utilizando el parámetro H_o/L_o (Agredano *et al.*, 2019). Con los resultados no se logra interpretar un patrón de progradación o erosión en la playa, por lo que se realiza un análisis a escala temporal de meses a lo largo de toda la playa. La serie de tiempo para estos umbrales se representa en la Figura 46 con los umbrales establecidos por (Agredano *et al.*, 2019) y el peralte de la ola obtenidos por el modelo SWAN en el perfil medio de la playa Punta Lobos.

Figura 46: Peralte de la ola H_o/L_o en playa Punta Lobos.



5.4 Correlación línea de costa

En este acápite, se detalla la implementación de un modelo de regresión múltiple para todas las variables mencionadas anteriormente, debido a su aproximación a los cambios de la línea de costa y los factores involucrados directa e indirectamente.

Para determinar que variable es la que se aproxima de manera óptima a los cambios evolutivos de la línea de costa, se realiza manera individual una regresión lineal como primera fase y posteriormente de manera colectiva para distintas combinaciones una regresión lineal múltiple.

Las variables utilizadas y las combinaciones respectivas se representan en la Tabla 4 del anexo 9.3, siendo 44 la totalidad de modelos de regresión realizados. Para cada una de las variables y combinaciones se obtienen parámetros estadísticos como los coeficientes de correlación de Pearson, promedios, desviación estándar y error cuadrático medio y se representan mediante diagramas de Taylor.

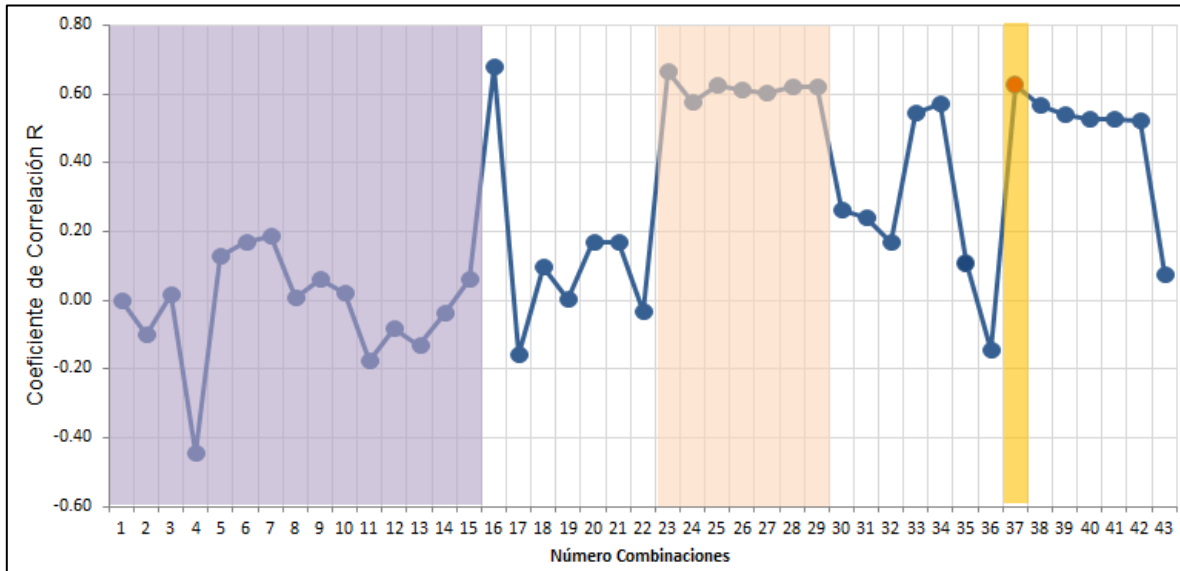
En primera instancia se determinan las correlaciones para los caudales del estero Cahuil, río Maipo, Río Mataquito y Río Maule, siendo la que mayor se ajusta la del río Maipo, especialmente en el periodo del año 2014-2016. Posteriormente se obtienen las correlaciones de las variables de oleaje, tanto de altura, potencia y dirección, observando una correlación baja para cada una de ellas, las cuales no responden por sí solas al cambio de la línea de costa. En el caso del NM y TSM, se visualiza el mismo resultado, donde cada variable por sí sola no responde al movimiento evolutivo de la playa. Sin embargo, al realizar la regresión para el índice PDO y ONI, se observa una oscilación en la predicción del modelo lineal con la línea de costa, pero el coeficiente de correlación es bajo. Finalmente el resultado del modelo de predicción para la línea de costa de Cahuil es la que mejor se aproxima a lo que ocurre en Punta Lobos, debido a que el fenómeno que se está comparando es el mismo. Por esta razón se realizan combinaciones con la línea de costa de Cahuil de forma ilustrativa para demostrar la similitud del fenómeno a escala global. En las figuras del anexo 9.3 se ilustran los resultados y las predicciones de series de tiempo para cada variable y para cada combinación.

Luego se realizan predicciones para una regresión lineal múltiple, utilizando los mayores coeficientes de correlación de Pearson en las combinaciones y así obtener una aproximación más representativa. Los resultados de las predicciones se pueden observar en la Tabla 5 del anexo 9.3 y en la Figura 47 de la que se puede observar que la primera área achurada corresponde a las variables independientes por sí solas, luego el área central corresponde a las correlaciones cuando se incluía la línea de costa de Cahuil y el área final es la que obtuvo mayor correlación. Además, se puede inferir que las mayores correlaciones se establecieron cuando la variable de la línea de costa de Cahuil (N°16) se encontraba en las combinaciones (N°23 al N°29). Por otro lado se observa que las mejores correlaciones por variable independiente son el desplazamiento vertical medido por el GNSS (N°33) y el río Maipo (N°4), por sobre los resultados de variables de oleaje como de NM Y TSM, PDO, ONI y caudales. Cuando se incluyen estas 2 variables de mejor desempeño en las correlaciones, la predicción del modelo de regresión lineal es más

representativa, siendo el N°37 la combinación que mejor se ajusta a los cambios de la línea de costa de Punta Lobos, siendo $R = 0.626$. La combinación está constituida por las variables:

$$\text{Línea de Costa} = Q_{\text{Maipo}} + Q_{\text{Cahuil}} + Q_{\text{Mataquito}} + Q_{\text{Maule}} + \text{Potencia Dir.} + \text{Índices}_{\text{ONI-PDO}} + \text{GNSS} + \text{Ho/Lo}$$

Figura 47: Coeficientes de Correlación R para todas las variables y combinaciones.



De manera análoga, los menores errores cuadráticos medios se establecen para la misma combinación N°37, siendo el $\text{RMSE} = 20.2$ [m] (ver Figura 48).

La predicción del modelo lineal se observa en la Figura 49 en conjunto con la variabilidad y cambios de la línea de costa de la playa Punta Lobos.

Figura 48: Error cuadrático medio para todas las variables y combinaciones.

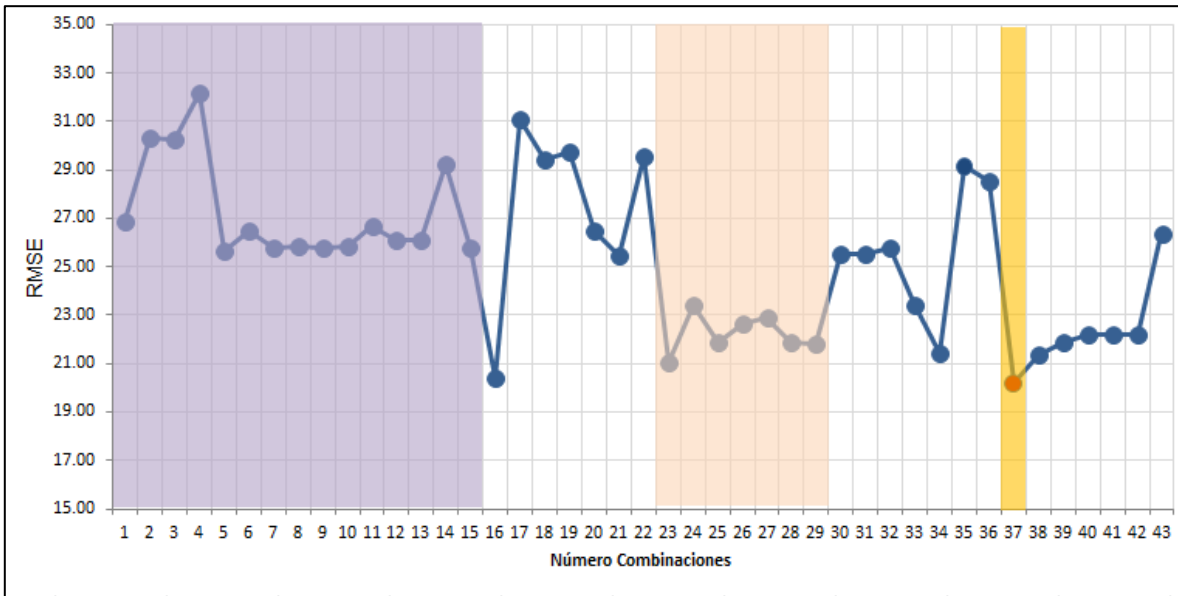
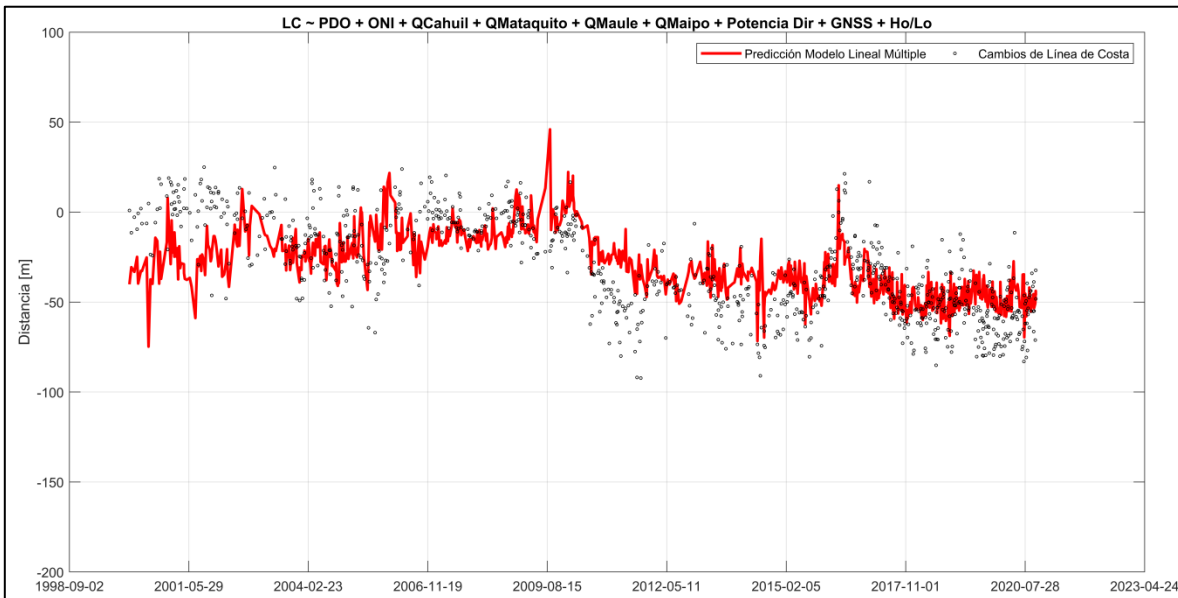


Figura 49: Predicción modelo lineal.



6. Discusión

El estado de arte y la literatura actual ha indicado que existe la necesidad de indagar, experimentar y profundizar la comprensión de los mecanismos de causa y efecto para diferentes escalas espacio-temporales que puedan incidir en la variabilidad de una línea de costa, tales como sismos, agentes globales climatológicos-oceanográficos.

En esta investigación se efectúa una recopilación de diferentes mecanismos que puedan influir de manera directa como en conjunto mediante un modelo de predicción lineal. Existen estudios que infieren que la mayor frecuencia y magnitud de marejadas es la causante principal de erosión de las playas, que en conjunto con el aumento del nivel del mar podría generar una amenaza directa en la zona costera (Martínez *et al.*, 2018). Sin embargo, estos estudios difieren de los resultados obtenidos, ya que el oleaje, principalmente parámetros de altura, dirección y potencia, presentan por si solas un coeficiente de correlación máximo de 0.2 con respecto a la línea de costa de Punta Lobos, es decir, la variabilidad y los estados de erosión de la playa se ven alteradas de manera poco significativa. Puesto que la adquisición de imágenes satelitales no es diaria, no se tiene una variación inmediata de los cambios de la playa por oleaje extremo, pero si se obtiene una tendencia a largo plazo la cual mantiene un estado estacional. Si bien existen estudios que cuantifican la erosión de las playas a causa del oleaje, la escala temporal de medición adquiere un rol relevante, tomando en consideración que las líneas de costa presentan estados de equilibrios propios y de estabilización. Ahora bien, esos estados de equilibrio se pueden ver influenciados directamente por la combinación del oleaje y por la escasa precipitación en las cuencas hídricas en la última década, las cuales contribuyen, mediante el aumento del caudal en el flujo de los ríos, el transporte de masa.

Otros estudios indican que factores climáticos y atmosféricos inciden en los cambios de la línea de costa (Morim *et al.*, 2019), pero no cuantifican sus resultados en los estados de erosión ni tampoco lo validan con imágenes satelitales.

Por otro lado, existe un inminente estado de sequía en la zona central de Chile, que representa un déficit fluviométrico que afecta los principales caudales de ríos y desembocaduras en zonas costeras (Garreaud *et al.*, 2019). Las plumas de sedimentos han sido estudiadas en otras investigaciones y se ha tomado como referencia sus resultados para inferir que la reducción de los aportes fluviales y precipitaciones han afectado directamente el estado morfodinámico de la playa Punta Lobos. Así, se verifica que el río que más se correlaciona a la variabilidad de la línea de costa es el Río Maipo, principalmente en el periodo de El Niño del año 2016 donde se observa, principalmente, un aumento considerable en la pluma de sedimentos en el río (Figura 50). Sin embargo existen cauces y ríos cercanos con caudales medios diarios de menor escorrentía que se deberían incorporar para un análisis más exhaustivo y representativo al momento de realizar la predicción con el modelo lineal múltiple. Si bien el análisis se efectuó para la localidad de Punta Lobos, una aproximación que se obtuvo y que se evalúa como una futura proyección a otras zonas, es lo obtenido en la localidad de Cahuil, con un coeficiente de correlación de 0.68 (ver Figura 36). Debido a que Punta Lobos presenta una falla sísmica cortical transversal a la playa, se infería que

los procesos y estados de erosión eran locales y propios del lugar, no obstante, lo obtenido en Cahuil genera una discusión a los procesos erosivos de las playas en la zona central, por lo cual se debería cerciorar que la variabilidad de las líneas de costas podrían ser un efecto de erosión global desfasada, dependiendo intrínsecamente de la escasas sedimentaria fluvial de ríos cercanos. Por esta razón y como futuras investigaciones se hace presente la necesidad de proyectar estudios al sur de Pichilemu y verificar los estados erosivos a causa de los aportes fluviales.

Figura 50: Pluma de sedimentos en Río Maipo, año 2016.



Fuente: Rescatado de <https://podaac.jpl.nasa.gov/dataaccess>.

En relación a la correlación existente entre las deformaciones verticales cosísmicas y el estado de erosión de la playa, su aproximación es de 0.54, lo que genera una modulación en el modelo predictivo. La actividad tectónica se atribuye como en diversos estudios, un factor que incide sobre las fuertes tendencias erosivas de las playas en las últimas décadas, coincidentes con los resultados de esta investigación. Sin embargo hubo un aumento de la playa de aproximadamente 20 [cm] en Pichilemu, post terremoto 8.8 Mw del año 2010, pero que ha descendido en el intersísmico 0.26 [cm]. Para una proyección futura a las nuevas investigaciones, es menester considerar las deformaciones presísmicas, cosísmicas como intersísmicas y para ello la instalación de GNSS en playas con alto riesgo erosivo, por ejemplo Hornitos, Algarrobo y Santo Domingo (MMA, 2019) o playas al sur de Pichilemu para evaluar el desfase morfodinámico probable descrito anteriormente. La información contribuirá a generar mejores predicciones de modelo lineal múltiple, debido que para esta investigación se dispuso datos geofísicos posterior al terremoto 8.8 Mw, por lo que no se pudo identificar el levantamiento cosísmico por medición, sino solo de manera visual.

La variación temporal de los índices ONI y PDO, son factores que influyen en la variabilidad de la línea de costa, a pesar que sus coeficiente de correlación son bajos en comparación a la potencia del oleaje y la deformación vertical cosísmica. Si el índice PDO es negativo se infiere que existe un periodo decadal frío con escasas precipitaciones, factor que es coincidente con la estadística de caudales medios diarios de los ríos en estudios. Cuando el índice ONI es positivo y mayor a 2, las variaciones de la línea de costa presentan estados de progradación, como el periodo de El Niño del año 2015-2016.

Se identifican de manera exploratoria, distintas componentes que pueden influir en la variabilidad de la línea de costa, las que corresponden a NM, TSM, caudales medios diarios y mensuales, parámetros de oleaje como altura, dirección y potencia y deformaciones verticales cosísmicas e intersísmicas. Los resultados de esta investigación aproximan el modelo lineal múltiple a un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.62, las que podrían mejorar obteniendo información de deformaciones sísmicas, en lo posible antes del sismo, durante y después, con el propósito de identificar el movimiento completo. Por otra parte si se adquieren mediciones del transporte de masa de un río en su desembocadura, se podría cuantificar su depósito en las playas e incorporarlo en el modelo de predicción.

En esta misma línea, si se obtienen pronósticos de oleaje, como la potencia y caudales de ríos, es posible determinar cómo se comportará la playa en esa escala temporal. Estas aproximaciones contribuirán en la identificación de procesos de erosión y/o acreción de playas y de su estabilización dinámica.

Si se identifica a futuro que los procesos de erosión al sur de Pichilemu dependen intrínsecamente de los aportes de masa fluvial, se podría inferir que las playas de la zona central de Chile se encuentran desfasadas en erosión y el proceso es un comportamiento global y no local propio de un lugar. Cabe mencionar que cada zona costera es distinta y puede variar de acuerdo a sus condiciones geográficas, exposición al oleaje y si se encuentra cercana a una cuenca hídrica.

Los procesos definidos son complejas interacciones físicas multifactoriales que no dependen de si solas para la identificación exacta de la variabilidad de una línea de costa, sino más bien son procesos combinados, tanto en componentes atmosféricas, oceanográficas como geofísicas, por lo que los resultados de esta investigación, aproximan el comportamiento dinámico de la playa.

6.1 Análisis de Varianzas Factorial (ANOVA)

Debido a que la regresión lineal múltiple realiza interacciones multifactoriales para toda la escala temporal en estudio, se desconoce que variable es la más representativa en el modelo de predicción en relación a la variabilidad de la línea de costa, por lo que se realizan análisis de varianzas para n factores (ANOVA), el cual consiste en comparar las varianzas entre las medias de diferentes grupos o variables independientes que afectan a la variable dependiente (en este estudio la línea de costa), con el propósito de identificar si existen interacciones entre los factores. En un análisis de varianzas factorial, existe una hipótesis nula por cada factor y por cada combinación de factores, por lo que en el análisis se afirma que las medias de los factores son iguales.

ANOVA identifica que para cada efecto existe una hipótesis y para cada hipótesis un estadístico F, el cual consiste es una estimación de la varianza poblacional basada en la variabilidad existente entre las medias de cada grupo. Es un cociente entre la variación de las medias de las muestras y la variación dentro de las muestras. Un valor F bajo representa un modelo donde las medias de los grupos están cercanas entre sí, es decir presentan baja variabilidad en relación con la variabilidad dentro de cada grupo. Al contrario, si el valor F es alto, el modelo representa una variabilidad media de los grupos alta. Para interpretar un rechazo de la hipótesis nula de los factores asociados al modelo de regresión, es necesario que F tenga un valor F alto.

La distribución de F asume que la hipótesis nula es verdadera, por lo que es necesario determinar las probabilidades de observar una estadística F que sea al menos tan alto como el valor que se obtuvo en el estudio. Esta probabilidad se le denomina valor P y permite determinar qué tan común es el valor F bajo el supuesto de que la hipótesis nula es verdadera y la significancia estadística de la prueba. Generalmente se utiliza un nivel de significancia (α) de 0.05 lo que indica un riesgo de un 5%. Cuando $p \leq \alpha$ el modelo explica la variación en la respuesta, de lo contrario si $p > \alpha$ no existe suficiente evidencia para concluir que el modelo explica la variación en la respuesta. Por lo tanto el valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula.

Como primer paso, se divide la escala temporal de la línea de costa en 3 tramos, debido a que en los 20 años de estudio han ocurrido procesos de cambio en la línea de costa a causa de distintos factores. El objetivo es lograr identificar el comportamiento de las variables de manera segregada mediante ANOVA y determinar que factor/es es/son el/los de mayor significancia para los distintos tramos.

- Tramo 1: Desde enero del año 2000 a diciembre del año 2009.
- Tramo 2: Desde enero del año 2010 a mayo del año 2012.
- Tramo 3: Desde junio del año 2012 a octubre del año 2020.

Se determinan los modelos de regresiones para los distintos tramos, los cuales se identifican en la Figura 51. Se observa que la regresión por tramos es distinta a la regresión general para toda la escala temporal, esto probablemente a causa de que los factores incidentes con mayor significancia actúan con representatividad para cada tramo. Esta diferencia en el resultado de regresión se puede observar en la Figura 52.

El coeficiente de correlación R de Pearson para el tramo 1 es de 0.23, para el tramo 2 es de 0.81 y para el tramo 3 es de 0.41, por lo que el tramo 2 es el que presenta una mayor correlación. Para identificar cuáles son las variables con mayor significancia se aplica ANOVA para cada tramo y se determina el valor p, los cuales se presentan en la Figura 53. Se puede inferir que las variables con suficiente evidencia y que explica la variación en la respuesta del tramo 1 son el índice PDO y el caudal del río Maule con un valor $p \leq 0.05$. Para el tramo 2 las variables que responden significativamente a la variabilidad de la línea de costa de manera descendente, post terremoto y post tsunami del año 2010 son el caudal del río Maule, potencia del oleaje direccional, caudal del estero Cahuil y el índice ONI, no obstante las variables de deformación vertical GNSS

Figura 51: Predicción modelo lineal para distintos tramos.

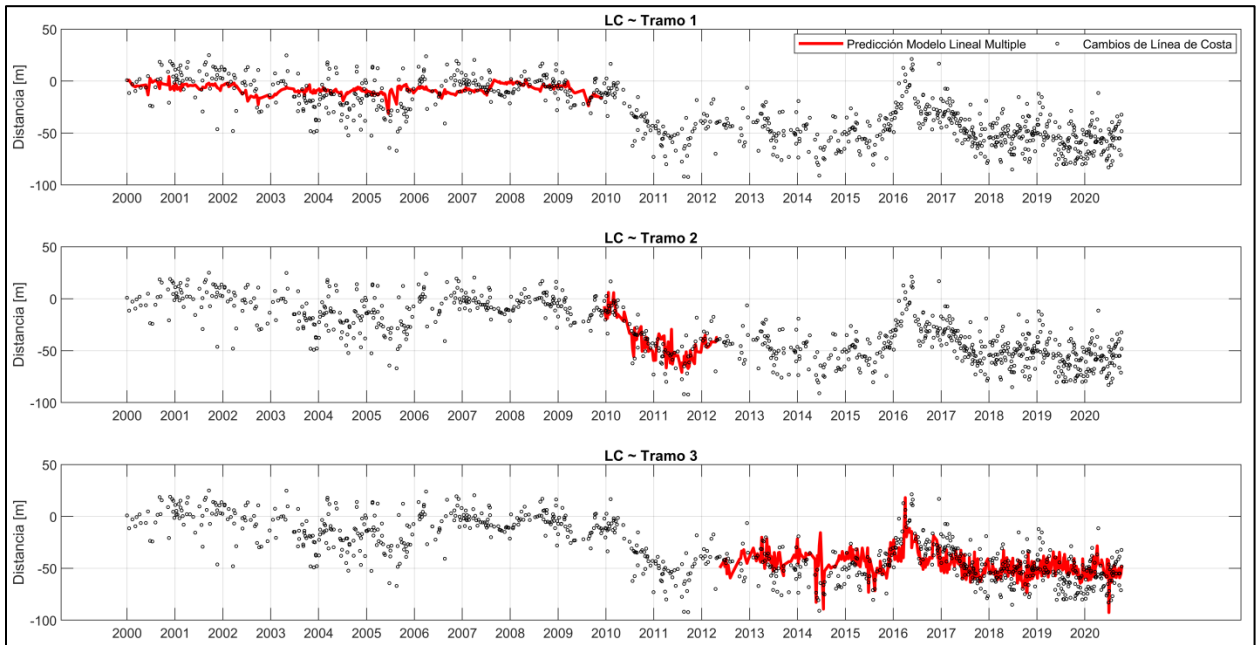
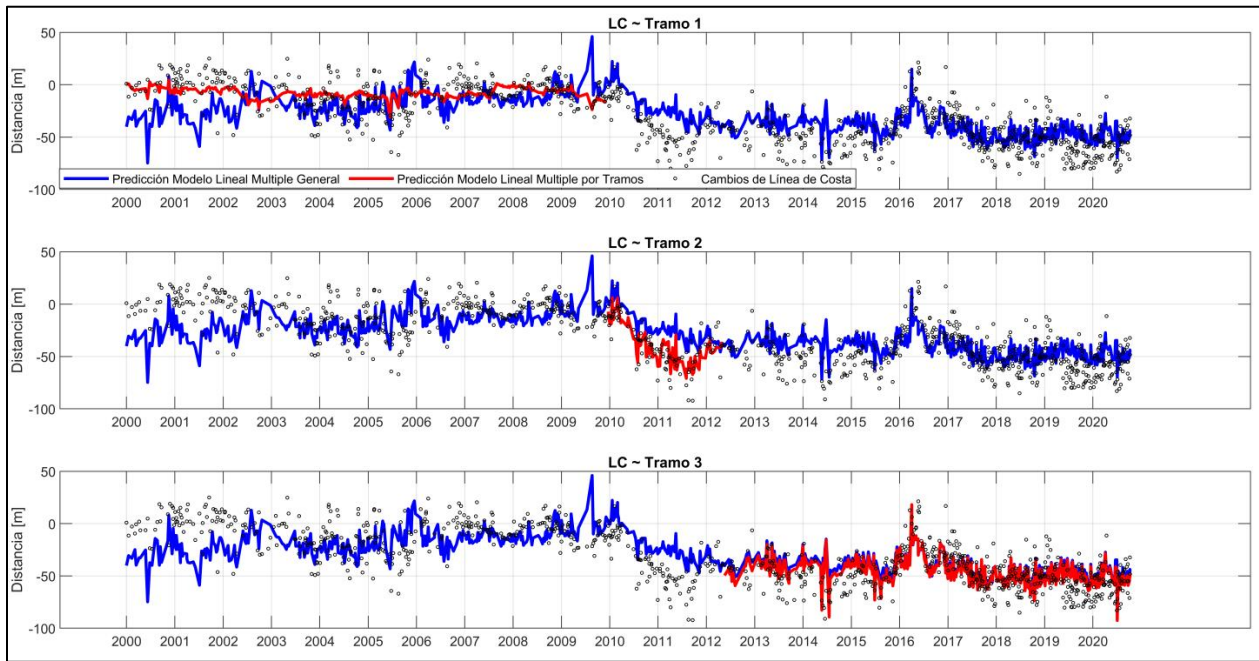


Figura 52: Predicción modelo lineal general v/s Predicción modelo lineal por tramos.

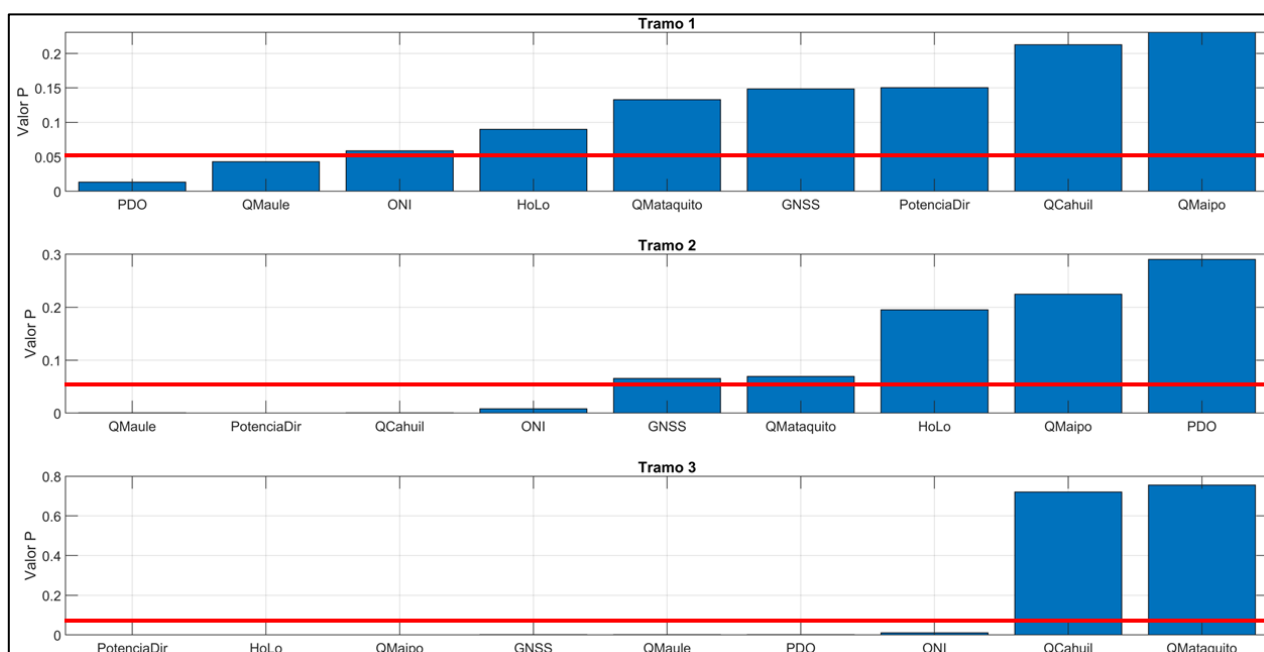


y caudal del río Mataquito exceden mínimamente el umbral de significancia. En relación al tramo 3 las variables con mayor representatividad en la regresión son la potencia de oleaje direccional, la relación Ho/Lo, el caudal del río Maipo, la deformación vertical GNSS, el caudal del río Maule, el índice PDO y el índice ONI. Los caudales del estero Cahuil y Mataquito exceden el nivel de significancia, por lo que la asociación de estas variables no es estadísticamente significativa.

La respuesta de las variables mediante ANOVA, indica que durante los años 2000 a 2009, los cambios de la línea de costa en Punta Lobos, Pichilemu se asocian estadísticamente a factores climáticos globales como el índice ONI y a factores hídricos como es el caudal del río Maule. Durante los años 2010 y 2012 los factores que se encuentran presentes en la respuesta a la variabilidad de la línea de costa son hídricos, de oleaje y climáticos, destacando nuevamente la presencia del caudal del río Maule. Para los años 2012 a 2021 la variable que presenta una asociación estadística significativa mayor es la potencia de oleaje direccional y luego factores hídricos, de deformación vertical e índices climáticos globales.

Las variables que mayor presencia tuvieron en la respuesta del modelo es el caudal del río Maule, la potencia de oleaje direccional, índice PDO y el índice ONI, tomando en consideración la separación temporal por tramos.

Figura 53: Valores p para cada tramo mediante ANOVA.



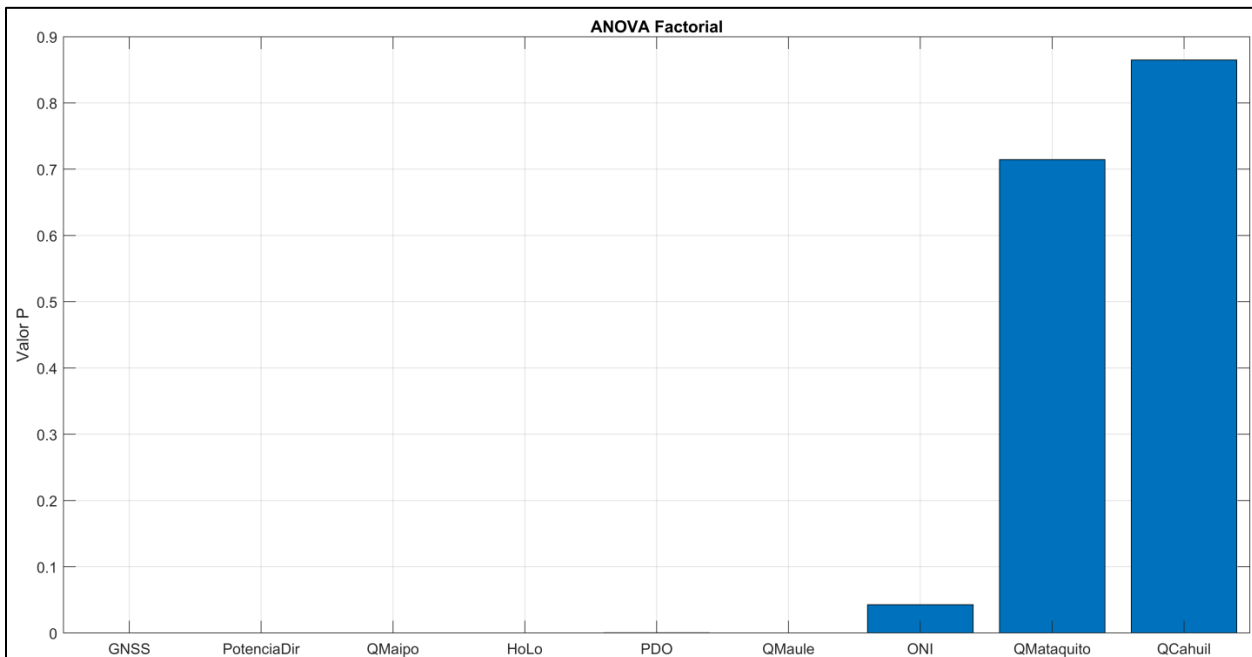
El análisis de varianzas general, no subdividido por tramos, da una respuesta similar a lo determinado en el tramo 3, pero sin dudas lo más destacable es la asociación de significancia de la deformación vertical del terreno mediante medición GNSS, la cual responde a que la hipótesis nula es falsa y que su variabilidad responde de manera importante a los cambios de la línea de costa (ver Figura 54).

Los factores geofísicos, de oleaje, hídricos y climáticos se deben tomar en consideración al momento de realizar un análisis de línea de costa en Chile, principalmente debido a que son estos los que actúan de manera simultánea en la variabilidad morfodinámica de las playas y que algunos presentan un nivel de significancia mayores que otros en relación a la respuesta de la variable dependiente. Los efectos de la mega sequía han contribuido a generar erosión y/o retroceso en la playa Punta Lobos, distinguiendo la significancia en los resultados del río Maule y río Maipo,

como también los efectos sísmicos que alteran significativamente el nivel del suelo y por ende de la cantidad de arenas en las playas.

Es necesario indagar estos efectos en distintas playas colindantes a Punta Lobos para cerciorar que los efectos de erosión y de cambios de la línea de costa son procesos de desfase global y que dependen de los factores mencionados anteriormente. Si se cumple el comportamiento, se podrá determinar con mayor eficacia los cambios dinámicos de las playas y prevenir riesgos en las zonas costeras.

Figura 54: Valores p para modelo general mediante ANOVA.



7. Conclusiones

El objetivo de esta investigación ha sido evaluar la respuesta morfodinámica de la playa Punta Lobos ante forzantes climatológicas, hidrológicas y tectónicas por medio de modelaciones numéricas e imágenes satelitales. Para llevar a cabo la evaluación, se identificaron y reconocieron las componentes que influían directa como indirectamente en la variabilidad de la línea de costa mediante una estadística descriptiva para cuantificar la tendencia de la línea de costa y las variables estudiadas.

Para las variables oceanográficas como el NM y TSM, se identificó que el coeficiente de correlación de Pearson es menor a 0.2 en relación al cambio temporal mensual de la línea de costa. Se visualiza un estado de acreción de la playa cuando existe un aumento de la TSM coincidente con el fenómeno de El Niño cuando presenta una anomalía superior a 2, como en el año 2016, que conllevó a un aumento consecutivo de precipitaciones, y por ende, en los caudales medios diarios. En relación al NM, la estación de San Antonio es el lugar donde se presenta un aumento del NM coincidente con un aumento del índice ONI, precisamente en el año 2016. Por lo tanto existe un avance en la línea de costa cuando existe un aumento climatológico en las anomalías de NM y TSM e índice ONI.

Se evidencia que los aportes de sedimentos provenientes de los ríos aledaños a la playa de Punta Lobos, adquieren un rol protagónico en la variabilidad de la línea de costa. Se infiere que la mega sequía que azota el país desde hace una década, ha provocado un déficit de precipitaciones y caudales de los ríos que aportan en el transporte de sedimentos hacia la desembocadura y zonas costeras. Se analizaron 4 ríos que corresponden a Río Maipo, Estero Cahuil, Río Mataquito y Río Maule, el cual presenta una mayor correlación proveniente del norte, es decir el Río Maipo. Sin embargo, se determinó que la variabilidad de la línea de costa de la localidad de Cahuil, al sur de Pichilemu, presenta una similitud en su evolución histórica con respecto a la playa de Punta Lobos, determinando un coeficiente de correlación de 0.68. Esto de a concluir que los cambios de líneas de costa, pueden ser, procesos desfasados a escala global y no local, y que dependen directamente de los aportes fluviales.

Se determinó el efecto del oleaje sobre la playa de Punta Lobos identificando 11 puntos de control desde la zona norte a sur, identificando que la variabilidad de la altura de ola, dirección y potencia son procesos estacionarios y no existe un aumento de frecuencia, magnitud ni de direccionalidad. Se identifica, no obstante, aun aumento en la potencia de oleaje el año 2010, coincidente con el sismo 8.8 Mw y un fenómeno de El Niño. La disminución de la línea de costa en ese periodo se puede atribuir a diferentes componentes y forzantes, como el sismo 8.8 Mw, el posterior tsunami, proceso de deformación intersísmica, el cual disminuyó 26 [cm] en 8 años.

Una aproximación a la variabilidad de la línea de costa se efectuó mediante un pronóstico de modelo lineal multifactorial, en el cual se realizaron 44 combinaciones para verificar cual se correlacionaba idóneamente con los cambios de la playa. Se infiere que de las 16 variables independientes analizadas, solo se correlaciona de manera óptima, la línea de costa de Cahuil, pero se descarta por ser una variable que se encuentra afecta a los mismos procesos físicos. Las

variables por sí solas no se correlacionan a la línea de costa y dependen de la interacción de ellas mismas para lograr una aproximación en el modelo.

Las variables utilizadas que más se aproximó a la línea de costa ($R = 0.63$) fue la combinación constituida por:

$$\text{Línea de Costa} = Q_{\text{Maipo}} + Q_{\text{Cahuil}} + Q_{\text{Mataquito}} + Q_{\text{Maule}} + \text{Potencia Dir.} + \text{Índices}_{\text{ONI-PDO}} + \text{GNSS} + \text{Ho/Lo}$$

Se realizó un ANOVA para distintos periodos temporales, determinando las variables con mayor significancia, siendo los caudales de ríos, potencia de oleaje direccional, deformación vertical y factores climáticos los de mayor ocurrencia entre las distribuciones. Para el tramo 1 el coeficiente de correlación es de 0.23, para el tramo 2 es de 0.81 y para el tramo 3 es de 0.41

El análisis de varianza se realizó también para el periodo de análisis completo, determinando que las variables y modelo explican la variación en la respuesta, siendo la deformación vertical del terreno, la potencia de oleaje direccional y caudales de ríos los de mayor representatividad y significancia.

8. Referencias

- [1] Agredano, R, Cienfuegos, R, Catalán, P, et al. (2019) Morphological changes in a cusped sandy beach under persistent high-energy swells: Reñaca beach (Chile). *Marine Geology* 417: 105988. DOI: 10.1016/j.margeo.2019.105988.
- [2] Aranguiz, R., Catálan, P. A., Cecioni, C., Bellotti, G., Henriquez, P., & González, J. (2019). *Tsunami resonance and spatial pattern of natural oscillation modes with multiple resonators. Journal of Geophysical Research: Oceans.* doi:10.1029/2019jc015206.
- [3] Bamunawala J, Maskey S, Duong TM, Van der Spek A. Significance of Fluvial Sediment Supply in Coastline Modelling at Tidal Inlets. *Journal of Marine Science and Engineering.* 2018; 6(3):79. <https://doi.org/10.3390/jmse6030079>
- [4] Barnard, Short, Harley, Splinter, Vitousek, Turner, Allan, Banno, Bryan, Doria, Hansen, Kato, Kuriyama, Randall-Goodwin, Ruggiero, Walker, and Heathfield (2015): *Coastal Vulnerability across the Pacific Dominated by El Niño/Southern Oscillation.* *Nature Geoscience* 8(10):801–7.
- [5] Barnard, P.L., Dugan, J.E., Page, H.M. et al. *Multiple climate change-driven tipping points for coastal systems.* *Sci Rep* 11, 15560 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94942-7>
- [6] Blaser, L., F. Krüger, M. Ohrnberger, and F. Scherbaum (2010), Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2914–2926.
- [7] Bletery, Q., Sladen, A., Delouis, B., & Mattéo, L. (2015). *Quantification of Tsunami Bathymetry Effect on Finite Fault Slip Inversion. Pure and Applied Geophysics*, 172(12), 3655–3670. doi:10.1007/s00024-015-1113-y.
- [8] Blewitt, G., W.C. Hammond, C. Kreemer, 2018, Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science, *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- [9] Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999), A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, 104(C4), 7649–7666, doi:10.1029/98JC02622.
- [10] Cappucci, S., Bertoni, D., Cipriani, L. E., Boninsegni, G., & Sarti, G. (2020). Assessment of the Anthropogenic Sediment Budget of a Littoral Cell System (Northern Tuscany, Italy). *Water*, 12(11), 3240. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12113240>
- [11] Catalán, P. A., et al. (2015), The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2918–2925, doi:10.1002/2015GL063333.

- [12] Campos R (2016). Memoria de titulación para optar al título de ingeniero civil oceánico “Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Universidad de Valparaíso.
- [13] Coastal Processes with Engineering Applications by Robert G. Dean (2004-03-25)
- [14] Cortés, P., P. A. Catalán, R. Aránguiz, and G. Bellotti (2017), Tsunami and shelf resonance on the northern Chile coast, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, doi: 10.1002/2017JC012922.
- [15] Cortés, P. and P. Catalán (2016), Atlas de Resonancia de Tsunami, Reporte CIGIDEN.
- [16] CSN, (2021). Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile. Obtenido de <https://www.csn.uchile.cl/csn-localizo-7-826-sismos-en-chile-durante-el-2020>.
- [17] Dean, R., & Dalrymple, R. (2001). Equilibrium Beach Profiles. In *Coastal Processes with Engineering Applications* (pp. 162-209). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511754500.008
- [18] Deser, Clara, Trenberth, Kevin & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 06 Jan 2016. "The Climate Data Guide: Pacific Decadal Oscillation (PDO): Definition and Indices." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/pacific-decadal-oscillation-pdo-definition-and-indices>.
- [19] Farias, M., Vargas, G., Tassara, A., Carretier, S., Baize, S., Melnick, D., & Bataille, K. (2010). Land-Level Changes Produced by the Mw 8.8 2010 Chilean Earthquake. *Science*, 329(5994), 916–916. doi:10.1126/science.1192094.
- [20] Fritz, H.M., Petroff, C.M., Catalán, P.A. et al. Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure Appl. Geophys.* 168, 1989–2010 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0283-5>
- [21] Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso-Águila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.6219
- [22] Garreaud, R. (2020). ¿Vuelven los Gigantes? Grandes crecidas en tiempos de mega sequía. XXIV Congreso chileno de Ingeniería Hidráulica SOCHID-UDP.
- [23] GEBCO Compilation Group (2019) GEBCO 2019 Grid (doi:10.5285/836f016a-33be-6ddc-e053-6c86abc0788e)
- [24] Geist, E. L., & Parsons, T. (2006). *Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards**. *Natural Hazards*, 37(3), 277–314. doi:10.1007/s11069-005-4646-z.

- [25] Ghanbari, M., Arabi, M., Kao, S.-C., Obeysekera, J., & Sweet, W. (2021). Climate change and changes in compound coastal-riverine flooding hazard along the U.S. coasts. *Earth's Future*, 9, e2021EF002055. <https://doi.org/10.1029/2021EF002055>.
- [26] Gómez, M., Villagrán, M., Martínez, C., & Belmonte, A. (2018). Characterizing the Longshore Sediment Transport Pattern on Beaches in the Gulf of Arauco, Chile, to Assess Morphological Shoreline Evolution. *Journal of Coastal Research*, 85, 656–660. doi:10.2112/si85-132.1.
- [27] Hayes, G. P., D. J. Wald, and R. L. Johnson (2012). Slab1.0: A three dimensional model of global subduction zone geometries, *J. Geophys. Res.* 117, no. B1, doi: 10.1029/2011JB008524.
- [28] Holman, R. A., & Stanley, J. (2007). The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 54(6-7), 477–491. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.
- [29] Hormazabal, S., Shaffer, G., Letelier, J., & Ulloa, O. (2001). Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C8), 16657–16671. doi:10.1029/2001jc900008.
- [30] Huang, C., Zhang, H., & Zhao, J. (2020). High-Efficiency Determination of Coastline by Combination of Tidal Level and Coastal Zone DEM from UAV Tilt Photogrammetry. *Remote Sensing*, 12(14), 2189. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/rs12142189>.
- [31] Kitamura, A., Ina, T., Suzuki, D. et al. Geologic evidence for coseismic uplift at ~ AD 400 in coastal lowland deposits on the Shimizu Plain, central Japan. *Prog Earth Planet Sci* 6, 57 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0305-y>
- [32] Kajiura, K. (1970), Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 48, 835 – 869.
- [33] LeVeque, R. J., K. Waagan, F. I. González, D. Rim, and G. Lin (2016), Generating random earthquake events for probabilistic tsunami Hazard assessment, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-016-1357-1.
- [34] Macías, J., Castro, M. J., Ortega, S., Escalante, C., & González-Vida, J. M. (2017). Performance Benchmarking of Tsunami-HySEA Model for NTHMP's Inundation Mapping Activities. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3147–3183. doi:10.1007/s00024-017-1583-1
- [35] Magoon Orville T., Williams S. Jeffress, Lent Linda K., Richmond James A., Treadwell Donald D., Douglass Scott L., Edge Billy L., Ewing Lesley C., Pratt Anthony P. (2005).



Economic Impacts Of Anthropogenic Activities On Coastlines Of The United States. *Coastal Engineering* 2004. 3022-3035.

- [36] Mantua, N. J., and S. R. Hare, 2002: The Pacific decadal oscillation. *J. Oceanogr.*, 58, 35–44, <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>.
- [37] Martínez, C., Rojas, D., Quezada, M., Quezada, J., & Oliva, R. (2015). Post-earthquake coastal evolution and recovery of an embayed beach in central-southern Chile. *Geomorphology*, 250, 321–333. doi:10.1016/j.geomorph.2015.09.01.
- [38] Martínez, C., Contreras-López, 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.
- [39] Martínez C., Hidalgo R., Henríquez C., Arenas F., Rangel-Buitrago N., Contreras-López M. 2019. La zona costera en Chile: adaptación y planificación para la resiliencia. Instituto de Geografía - Serie GEOLibros. ISBN 9789561424425.
- [40] Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M. A., Garreaud, R., Belmar, L., & Farías, L. (2018). The Influence of River Discharge on Nutrient Export and Phytoplankton Biomass Off the Central Chile Coast (33°–37°S): Seasonal Cycle and Interannual Variability. *Frontiers in Marine Science*, 5. doi:10.3389/fmars.2018.00423.
- [41] McSaveney, M.J., I.J. Graham, J.G. Begg, A.G. Beu, A.G. Hull, K. Kim, and A. Zondervan. 2006. Late Holocene uplift of beach ridges at Turakirae Head, south Wellington coast, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 49:337–358, <http://dx.doi.org/10.1080/00288306.2006.9515172>.
- [42] Ministerio del Medio Ambiente, 2019. Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgos en playas, en “Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile”, Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.
- [43] Montecinos, A. y Aceituno Gutiérrez, P. (2003-01-15). Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/126006>.
- [44] Morim, J., Hemer, M., Wang, X.L. et al. Robustness and uncertainties in global multivariate wind-wave climate projections. *Nat. Clim. Chang.* 9, 711–718 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0542-5>.
- [45] Liu PL-F (1981) Effects of the continental shelf on harbor resonance. In: Iida K, Iwasaki T (eds) *Tsunamis—their science and engineering*. Terra Science, Tokyo, pp 303–314.

- [46] Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R. et al. The State of the World's Beaches. *Sci Rep* 8, 6641 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>.
- [47] Okihiro M, Guza RT, Seymour RJ (1993) Excitation of seiche observed in a small harbor. *J Geophys Res* 98:18201–18211.
- [48] Omori, Macroseismic measurements in Tokyo, II and III, *Earthquake Investigation Communications* 11 (1902) 1–95.
- [49] Quezada, J.; Jaque, E.; Fernández, A.; Vásquez, D (2010). Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de Febrero de 2010 en el Centro-sur de Chile. *Rev. Geogr. Norte Gd.* 2012, 53, 35–55.
- [50] Pawlowicz R., B. Beardsley, and S. Lentz (2002), "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE", *Computers and Geosciences* 28 929-937.
- [51] Philip, S., Kew, S. F., van der Wiel, K., Wanders, N., & van Oldenborgh, G. J. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*. doi:10.1088/1748-9326/ab97ca.
- [52] Poate, T. G., Masselink, G., McCall, R., Russell, P. E., & Davidson, M. A. (2014). Storm-driven cusp behaviour on a high energy gravel beach. *Journal of Coastal Research*, 70, 645–650. doi:10.2112/si70-109.1
- [53] Poulos, Mauricio Monsalve, Natalia Zamora, Juan Carlos de la Llera (2019), An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2018; 109 (1): 66–74. doi: 10.1785/0120170160.
- [54] Power, W., and E. Tolkova (2013), Forecasting tsunamis in Poverty Bay, New Zealand, with deep-ocean gauges, *Ocean Dyn.*, 63(11–12), 1213–1232, doi:10.1007/s10236-013-0665-6.
- [55] Pugliano, G., Robustelli, U., Di Luccio, D., Mucerino, L., Benassai, G., & Montella, R. (2019). Statistical Deviations in Shoreline Detection Obtained with Direct and Remote Observations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5), 137. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/jmse7050137>.
- [56] Pulido, N., Yagi, Y., Kumagai, H., & Nishimura, N. (2011). Rupture process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule earthquake, Chile. *Earth, Planets and Space*, 63(8), 955–959. doi:10.5047/eps.2011.04.008.

- [57] Quezada, Jorge, Jaque, Edilia, Fernández, Alfonso, & Vásquez, Daniela. (2012). Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (53), 35-55. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022012000300003>
- [58] Rabinovich, A. B. (1997). Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects, *J. Geophys. Res.*, 102(C6), 12,663-12,676, doi: 10.1029/97JC00479.
- [59] Raichlen F, Lepelletier TG, Tam CK (1983) Tsunamis—their science and engineering. In: Iida K, Iwasaki T (eds) *The excitation of harbors by tsunamis*. Terra Science, Tokyo, pp 359–385.
- [60] Rodríguez-Padilla Isaac, Bruno Castelle, Vincent Marieu, Denis Morichon (2019). A Simple and Efficient. Image Stabilization Method for Coastal Monitoring Video Systems. *Remote Sensing*, MDPI, 2019, 12, 10.3390/rs12010070. hal-03043459.
- [61] Saldías, G. S., Largier, J. L., Mendes, R., Pérez-Santos, I., Vargas, C. A., & Sobarzo, M. (2016). Satellite-measured interannual variability of turbid river plumes off central-southern Chile: Spatial patterns and the influence of climate variability. *Progress in Oceanography*, 146, 212–222. doi:10.1016/j.pocean.2016.07.007
- [62] Sand, S. E. (1982). *Long waves in directional seas*. *Coastal Engineering*, 6(3), 195–208. doi:10.1016/0378-3839(82)90018-7.
- [63] Soto M., Arriagada J., Castro-Correa C, Ibarra I. y Rodolfi G. (2015). Condiciones geodinámicas derivadas del terremoto y tsunami de 2010 en la costa de Chile central. El caso de Pichilemu. *Revista de geografía Norte Grande*, (60), 79-95. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022012000300003>
- [64] Stehr A., C. Álvarez, P. Álvarez, J. L. Arumí, C. Baeza, R. Barra, C. A. Berroeta, Y. Castillo, G. Chiang, D. Cotoras, S. A. Crespo, V. Delgado, G. Donoso, A. Dussillant, F. Ferrando, R. Figueroa, C. Frêne, R. Fuster, A. Godoy, T. Gómez, E. Holzapfel, C. Huneeus, M. Jara, C. Little, K. Lizama, M. Musalem, M. Olivares, O. Parra, R. D. Ponce, D. Rivera, I. Rodríguez, A. Sepúlveda, M. Somos, F. Ugalde, R. Urrutia, M. Valenzuela, C. Vargas, X. Vargas, S. Vásquez, I. L. Vera, S. Vicuña, G. Vidal, M. Yevenes (2019). Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático. Comité Científico COP25 Chile.
- [65] Syvitski, J. P. ., Peckham, S. D., Hilberman, R., & Mulder, T. (2003). Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 162(1-2), 5–24. doi:10.1016/s0037-0738(03)00232-x.
- [66] Valdés-Pineda, R., García-Chevesich, PA, Alaniz, AJ, Venegas-Quiñones, HL, Valdés, JB, & Pizarro, R. (2021). El Impacto de la Falta de Estrategias Gubernamentales para la

Gestión Sostenible del Agua y Ordenamiento Territorial en la Hidrología de los Cuerpos de Agua: Lecciones Aprendidas de la Desaparición de la Laguna de Aculeo en Chile Central. *Sostenibilidad*, 14 (1), 413. MDPI AG.

- [67] Vargas, Gabriel, Farías, Marcelo, Carretier, Sébastien, Tassara, Andrés, Baize, Stéphane, & Melnick, Daniel. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean geology*, 38(1), 219-238.
- [68] Vousedoukas, M.I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L. et al. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nat. Clim. Chang.* 10, 260–263 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.
- [69] Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery . *Environmental Modelling and Software* (pág. 104528).
- [70] Vos, K., Harley, M., Turner, I., Splinter, K. (2021). Large regional variability in coastal erosion caused by ENSO. *Research Square*.
- [71] Walling, D. E. (2006). Human impact on land–ocean sediment transfer by the world’s rivers. *Geomorphology*, 79(3-4), 192–216. doi:10.1016/j.geomorph.2006.06.01.
- [72] Ward, P. J., Beets, W., Bouwer, L. M., Aerts, J. C. J. H., and Rensen, H. (2010), Sensitivity of river discharge to ENSO, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L12402, doi:10.1029/2010GL043215.
- [73] World Meteorological Organization (2021). The ocean our climate and weather. *Bulletin*. Vol. 70(1).
- [74] Winckler, P., Contreras, M., Beyá, J., Molina, M., 2015. “El Temporal del 8 de agosto de 2015 en la Bahía de Valparaíso”. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- [75] Xing X, Kou Z, Huang Z, Lee J-J (2013) Frequency domain response at Pacific coast harbors to major tsunamis of 2005–2011. *Pure Appl Geophys*. doi:10.1007/s00024-012-0526-0.
- [76] Yamazaki, Y., and K. F. Cheung (2011), Shelf resonance and impact of near-field tsunami generated by the 2010 Chile earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38), L12605, doi:10.1029/2011GL047508.
- [77] Zaytsev, O., A. B. Rabinovich, and R. E. Thomson Cheung (2016), A comparative analysis of coastal and open-ocean records of the Great Chilean Tsunamis of 2010, 2014 and 2015 off the Coast of Mexico, *Pure Appl. Geophys.*, 173(12), 4139–4178, doi:10.1007/s00024-016-1407-8.



9. Anexo A

9.1 Archivo espectral nodo aguas profundas

SWAN 1

\$ Data produced by SWAN version 41.31

\$ Project: 'projname' ; run number: 'runnum'

LOCATIONS

1

683619.00 6180587.00

RFREQ

32

0.037

0.041

0.045

0.050

0.055

0.060

0.066

0.073

0.080

0.088

0.097

0.106

0.117

0.129

0.142

0.156

0.171

0.189

0.207

0.228

0.251

0.276

0.304

0.334

0.367

0.404

0.445

0.489

0.538

0.592

0.651

0.716
 CDIR
 24
 0.0
 15.0
 30.0
 45.0
 60.0
 75.0
 90.0
 105.0
 120.0
 135.0
 150.0
 165.0
 180.0
 195.0
 210.0
 225.0
 240.0
 255.0
 270.0
 285.0
 300.0
 315.0
 330.0
 345.0
 QUANT
 1
 VaDens
 m2/Hz/deg
 -9.900000e+01
 FACTOR
 4.5063e-08

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0								
	9	11	6	25	91	114	2	0	0	1	3	3	0	0	0
0	1	2	3	5	7	9	10	11							
	251	303	126	1338	4296	3242	34	4	8	12	26	44	26		
5	2	6	11	20	46	118	188	249	298	302					
	767	900	1549	10245	18555	2716	20	62	893	1939	1374	475			
703	146	74	226	285	319	344	493	688	852	986	988				



9.2 Archivo entrada modelo SWAN

```
$*****CABECERA *****  
PROJ 'Pichilemu' 'C47193'
```

```
$*****DATOS DE ENTRADA**  
SET NAUTICAL  
MODE STATIONary  
COORD CART  
NUMERIC ACCUR 0.02 0.02 0.02 95  
SET maxerr 2  
CGRID UNSTRUC CIRCLE 24 0.0373 0.7159 32  
READGRID UNSTRUC TRIANGLE 'tst'  
INPGRID BOTTOM UNSTRUC  
READINP BOTTOM 1 'tst.bot' 3 0 FREE  
WIND 5.99 357.94  
GEN3 ST6 5.7E-7 8.0E-6 4.0 4.0 UP AGROW  
BOUNDspec SIDE 2 CCW CONstant file '20150521080000.sp2'
```

```
QUAD  
WCAP  
BREaking CONstant 1. 0.43  
TRIAD  
FRICTION JONSWAP
```

```
$***** OUTPUT REQUESTS ***  
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '20150521080000.mat' XP YP DEPTH HS RTP PER DIR  
DSPR TM01 TMM10  
TEST 1,0  
COMPUTE  
STOP
```

9.3 Modelo Regresión Lineal Múltiple

Tabla 4: Variables y combinaciones en Modelo de Regresión Lineal

Combinación	Variables	Combinación	Variables
1	Estero Cahuil (QCahuil)	23	QCahuil + LCC
2	Río Mataquito (QMataquito)	24	QCahuil + QMataquito + LCC
3	Río Maule (QMaule)	25	QCahuil + QMataquito + QMaule + LCC
4	Río Maipo (Qmaipo)	26	PDO + QCahuil + LCC
5	Altura de Ola (Hm0)	27	PDO + QCahuil + ONI + LCC
6	Potencia de Ola (Pot)	28	QCahuil + QMataquito + QMaule + LCC+ PDO
7	Dirección de Ola (Dir)	29	QCahuil + QMataquito + QMaule + LCC+ PDO + ONI
8	NM San Antonio (NMSA)	30	QCahuil + QMataquito + QMaule + Pot + PDO + ONI
9	NM Bucalemu (NMBU)	31	QCahuil + QMataquito + QMaule + PotDir+ PDO + ONI
10	NM Constitucion (NMCO)	32	QCahuil + QMataquito + QMaule + Hm0 + PDO + ONI
11	TSM San Antonio (TSM SA)	33	GNSS
12	TSM Bucalemu (TSM BU)	34	QCahuil + QMataquito + QMaule + Pot + PDO + ONI + GNSS
13	TSM Constitución (TSM CO)	35	QCahuil + QMataquito + QMaule+ PDO + ONI
14	PDO	36	Ho / Lo
15	ONI	37	QCahuil + QMataquito + QMaule + Qmaipo + PotDir + PDO + ONI + GNSS + Ho/Lo
16	Línea de Costa de Cahuil (LCC)	38	QCahuil + QMataquito + QMaule + PotDir+ PDO + GNSS
17	Qcahuil + QMataquito	39	QCahuil + QMataquito + QMaule + PotDir + GNSS
18	QCahuil + QMataquito + Maule	40	QCahuil + QMataquito + PotDir + GNSS
19	PDO + ONI	41	QCahuil + PotDir + GNSS
20	Pot + PDO	42	PotDir + GNSS
21	Hm0 + Pot + NMSA	43	PotDir + Ho / Lo
22	PDO + QCahuil	44	GNSS + Ho / Lo

Tabla 5: Resultados de combinaciones para Modelo de Regresión Múltiple.

Combinación	Combinaciones	R	RMSE	DE	X
1	Estero Cahuil (QCahuil)	0.00	26.90	7.50	-1.87
2	Río Mataquito (QMataquito)	-0.10	30.32	13.47	-9.72
3	Río Maule (QMaule)	0.02	30.26	16.21	-16.91
4	Río Maipo (Qmaipo)	-0.45	32.18	10.86	-12.38
5	Altura de Ola (Hm0)	0.13	25.65	4.52	-31.85
6	Potencia de Ola (Pot)	0.17	26.46	11.47	-29.21
7	Dirección de Ola (Dir)	0.19	25.76	0.37	-32.08
8	NM San Antonio (NMSA)	0.01	25.87	1.66	-31.95
9	NM Bucalemu (NMBU)	0.06	25.78	1.21	-32.04
10	NM Constitucion (NMCO)	0.02	25.82	0.90	-32.02
11	TSM San Antonio (TSM SA)	-0.18	26.71	3.60	-31.08
12	TSM Bucalemu (TSM BU)	-0.08	26.08	2.05	-31.76
13	TSM Constitución (TSM CO)	-0.13	26.09	1.61	-31.78
14	PDO	-0.04	29.26	12.83	-7.10
15	ONI	0.06	25.78	2.10	-0.03
16	Línea de Costa de Cahuil (LCC)	0.68	20.42	25.13	-7.90
17	Qcahuil + QMataquito	-0.16	31.07	13.68	-12.31
18	QCahuil + QMataquito + Maule	0.10	29.45	16.89	-19.71
19	PDO + ONI	0.00	29.72	14.79	-9.77
20	Pot + PDO	0.17	26.46	11.47	-29.22
21	Hm0 + Pot + NMSA	0.17	25.46	4.72	-31.98
22	PDO + QCahuil	-0.03	29.56	13.53	-8.17
23	QCahuil + LCC	0.66	21.07	25.58	-9.63
24	QCahuil + QMataquito + LCC	0.57	23.43	24.91	-18.34
25	QCahuil + QMataquito + QMaule + LCC	0.62	21.86	24.48	-23.20
26	PDO + QCahuil + LCC	0.61	22.65	25.42	-12.81
27	PDO + QCahuil + ONI + LCC	0.60	22.90	25.51	-14.48
28	QCahuil + QMataquito + QMaule + LCC+ PDO	0.62	21.90	24.24	-23.51
29	QCahuil + QMataquito + QMaule + LCC+ PDO + ONI	0.62	21.83	24.17	-23.74
30	QCahuil + QMataquito + QMaule + Pot + PDO + ONI	0.26	25.52	12.24	-29.77
31	QCahuil + QMataquito + QMaule + PotDir+ PDO + ONI	0.24	25.50	10.82	-30.37
32	QCahuil + QMataquito + QMaule + Hm0 + PDO + ONI	0.17	25.76	8.22	-31.00
33	GNSS	0.54	23.39	22.81	-8.52
34	QCahuil + QMataquito + QMaule + Pot + PDO + ONI + GNSS	0.57	21.41	17.67	-30.32
35	QCahuil + QMataquito + QMaule+ PDO + ONI	0.11	29.14	16.58	-21.30
36	Ho / Lo	-0.15	28.51	8.87	-28.02
37	QCahuil + QMataquito + QMaule + Qmaipo + PotDir+ PDO + ONI + GNSS + Ho/Lo	0.63	20.20	17.79	-31.10
38	QCahuil + QMataquito + QMaule + PotDir+ PDO + GNSS	0.57	21.39	16.88	-30.80
39	QCahuil + QMataquito + QMaule + PotDir + GNSS	0.54	21.88	16.55	-30.63
40	QCahuil + QMataquito + PotDir + GNSS	0.53	22.17	16.62	-30.37
41	QCahuil + PotDir + GNSS	0.53	22.17	16.60	-30.38
42	PotDir + GNSS	0.52	22.23	16.67	-30.30
43	PotDir + Ho / Lo	0.07	26.36	7.53	-30.65
44	GNSS + Ho / Lo	0.46	23.38	16.71	-29.32

Figura 55: Diagrama de Taylor: Caudales.

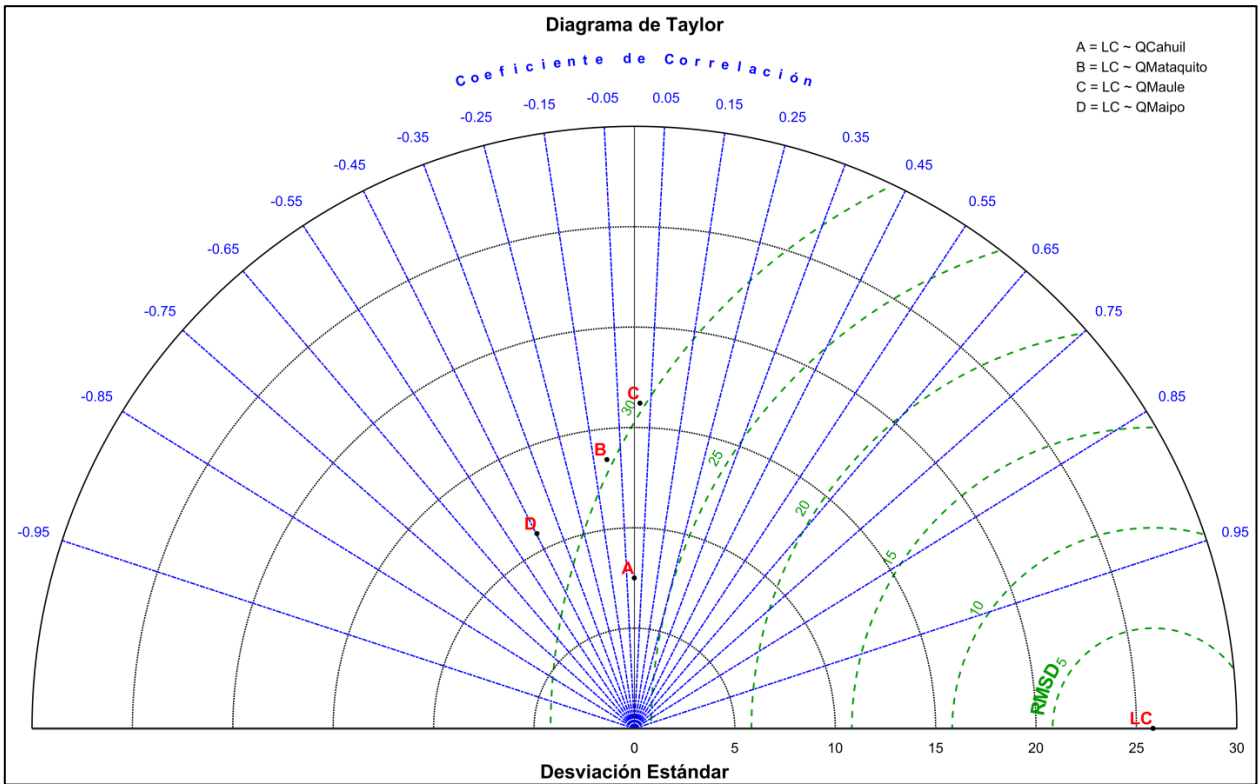


Figura 56: Predicción regresión lineal: Caudales.

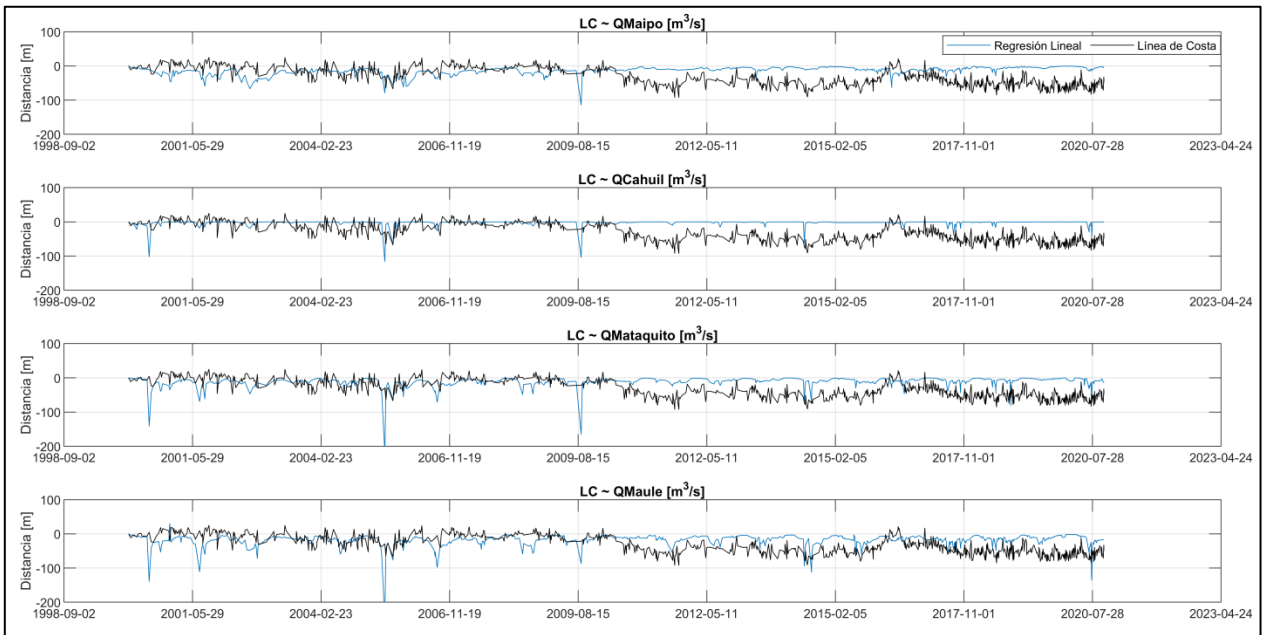


Figura 57: Diagrama de Taylor: Oleaje.

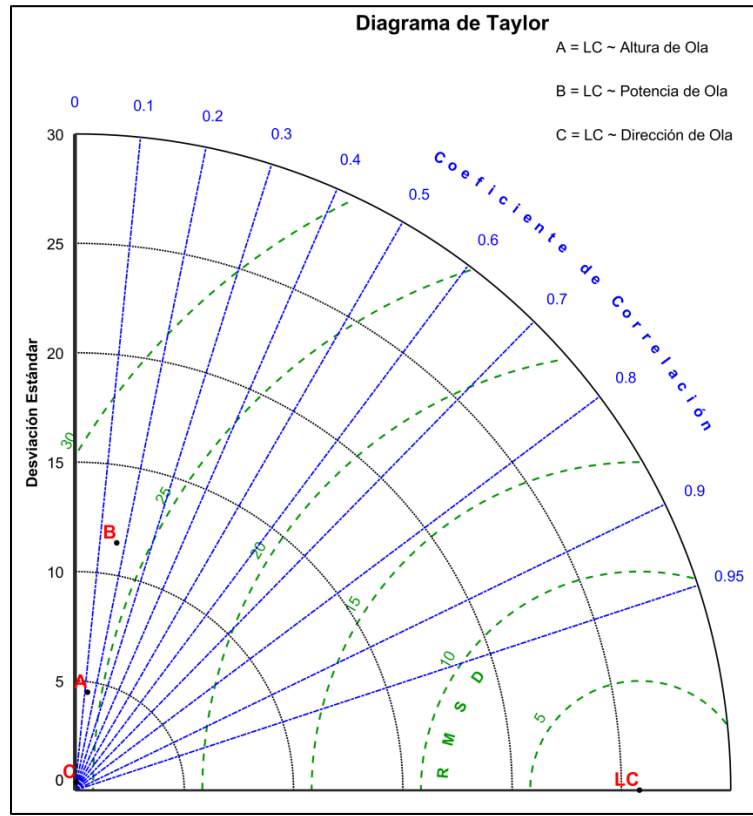


Figura 58: Predicción regresión lineal: Oleaje.

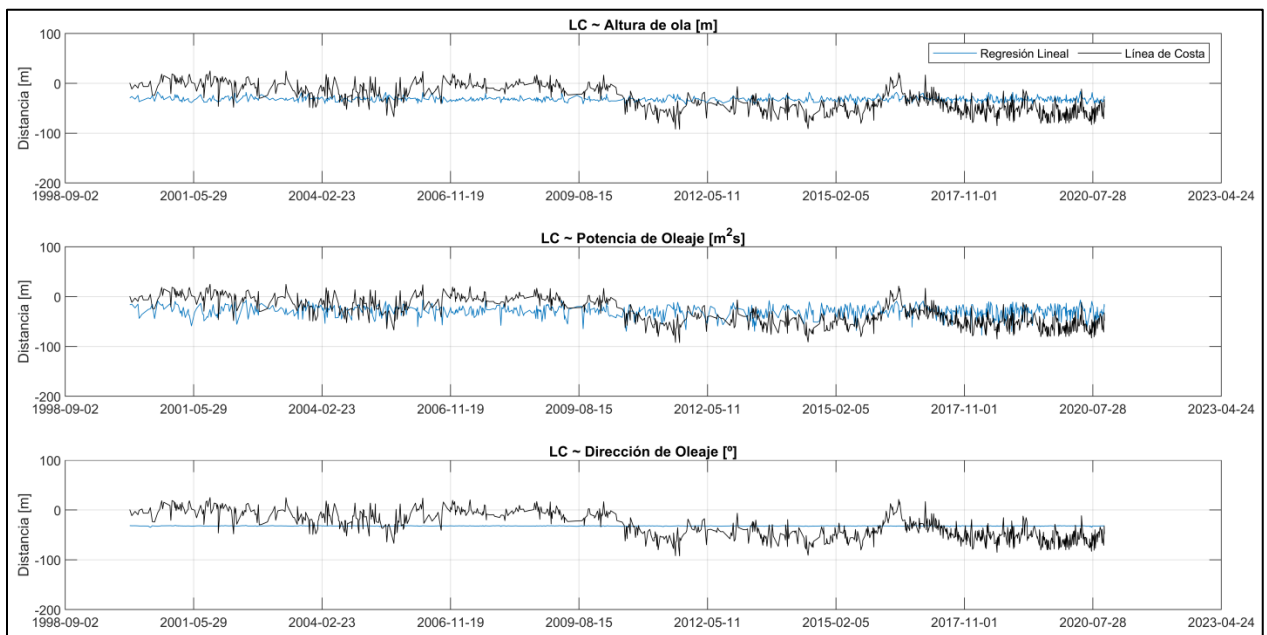


Figura 59: Diagrama de Taylor: NM.

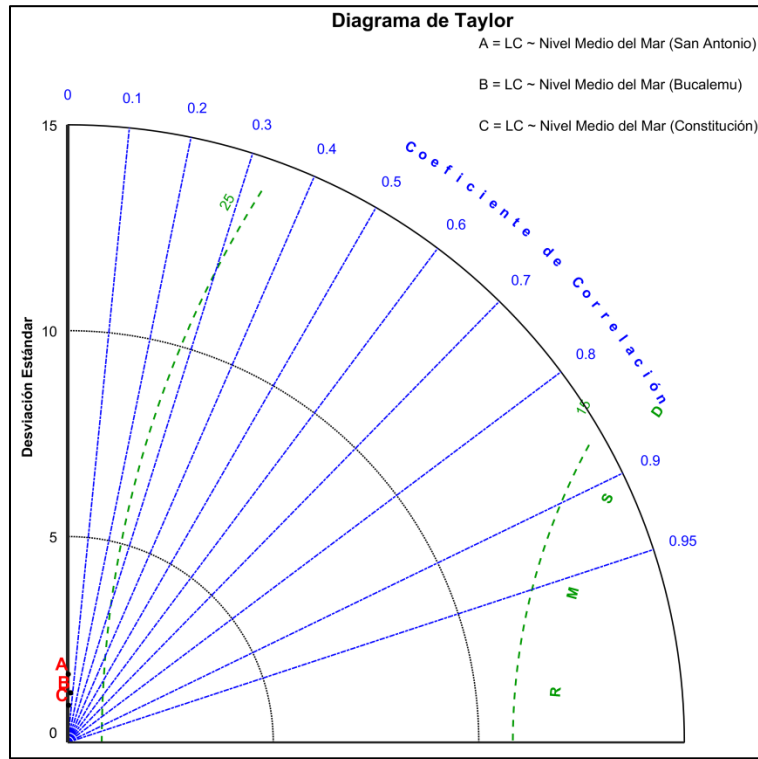


Figura 60: Predicción regresión lineal: NM.

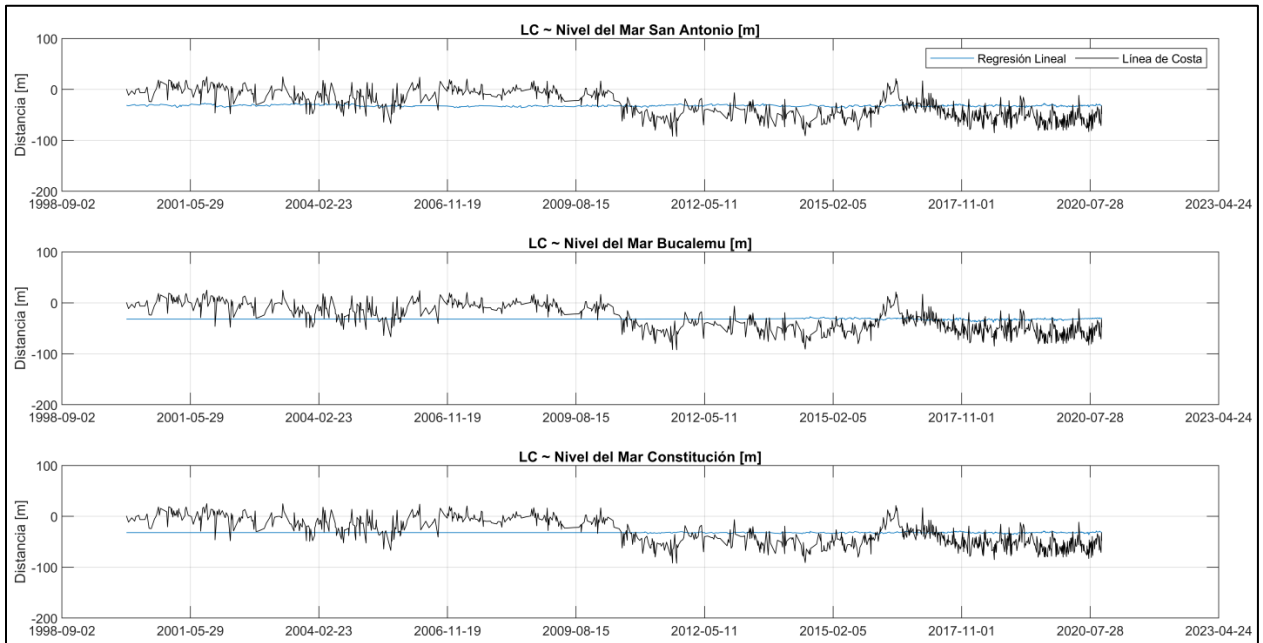


Figura 61: Diagrama de Taylor: TSM.

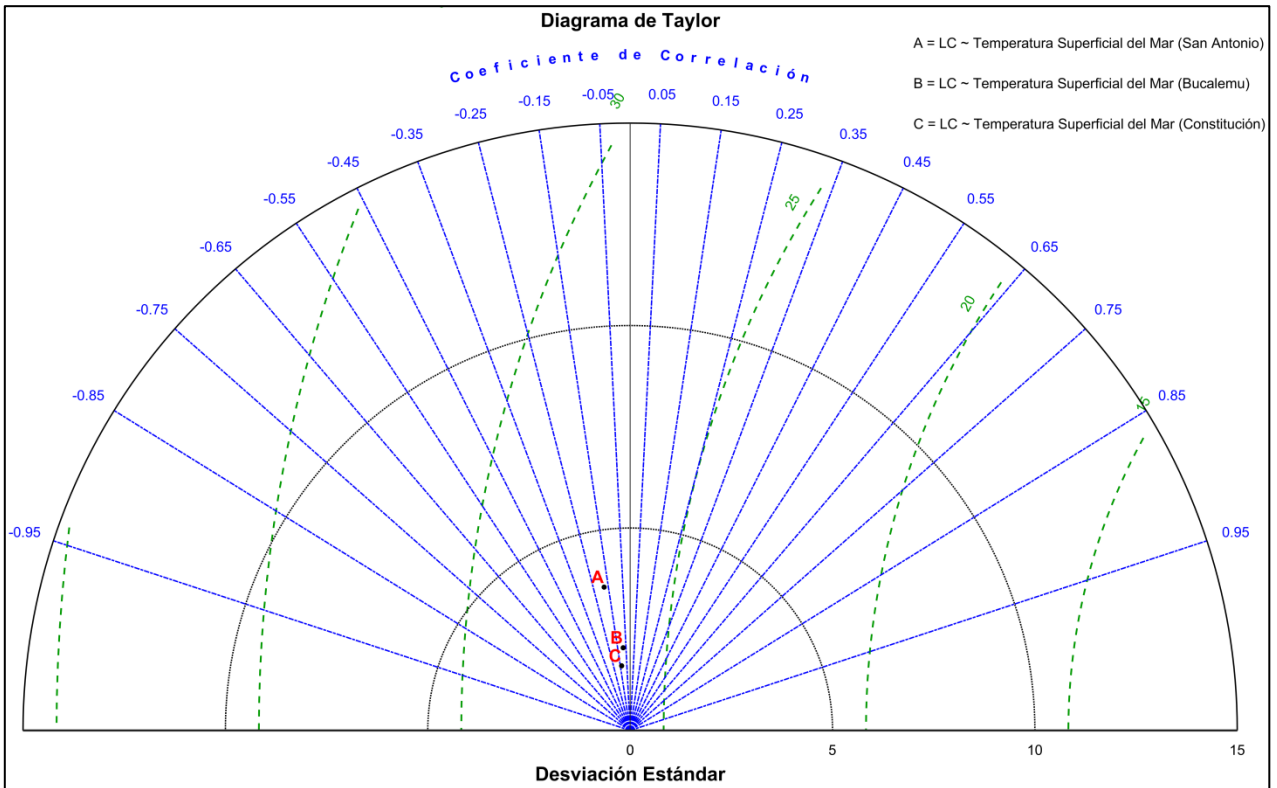


Figura 62: Predicción regresión lineal: TSM.

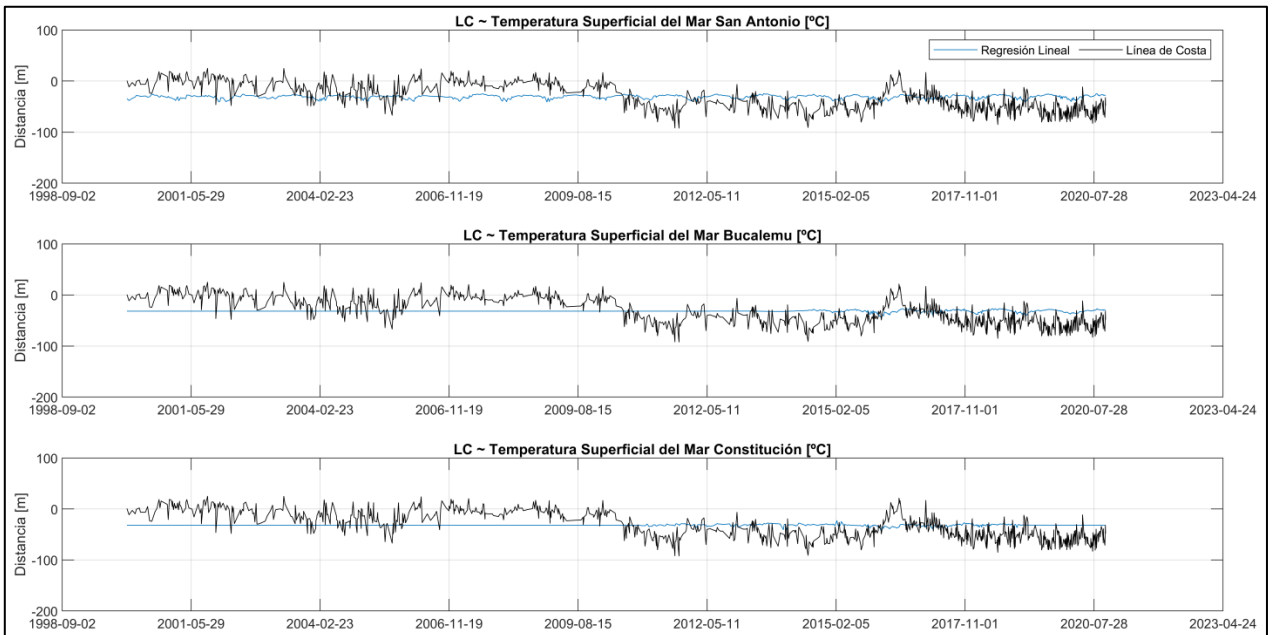


Figura 63: Diagrama de Taylor: PDO-ONI.

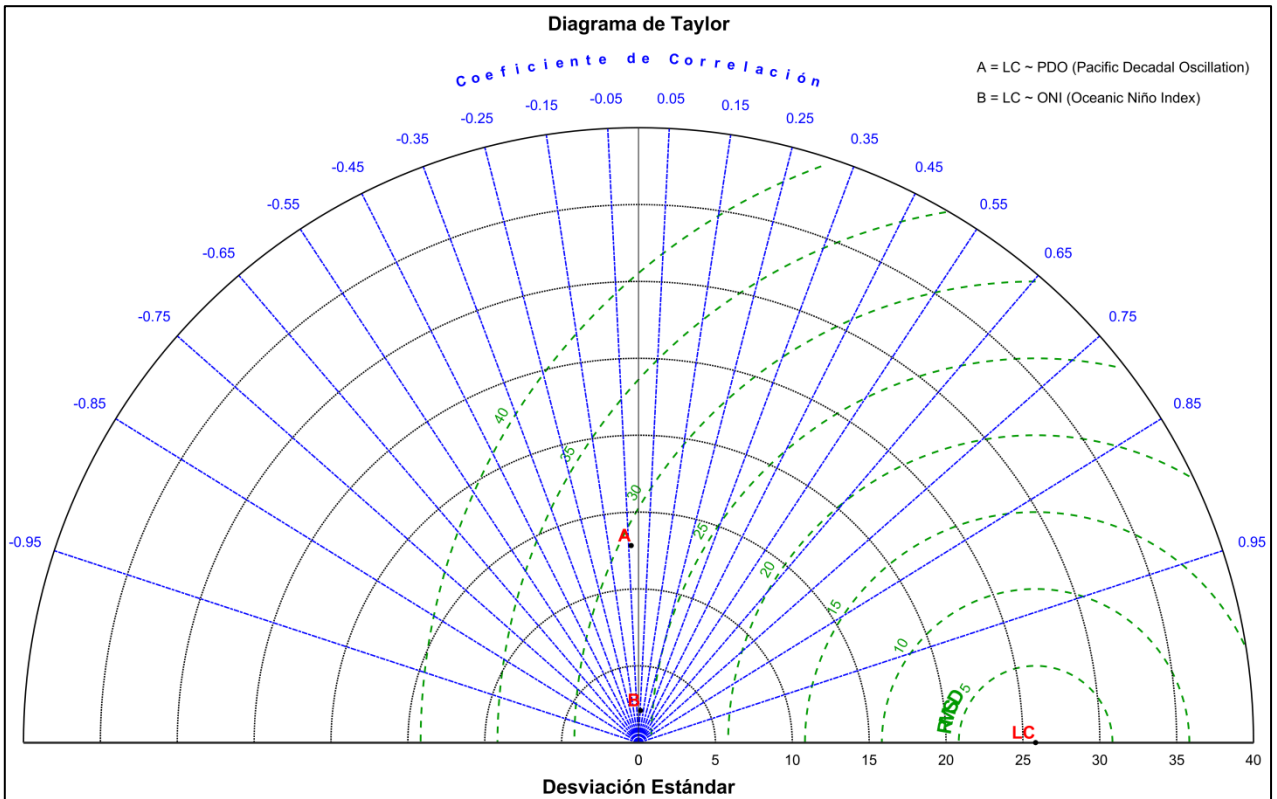


Figura 64: Predicción regresión lineal: PDO-ONI.

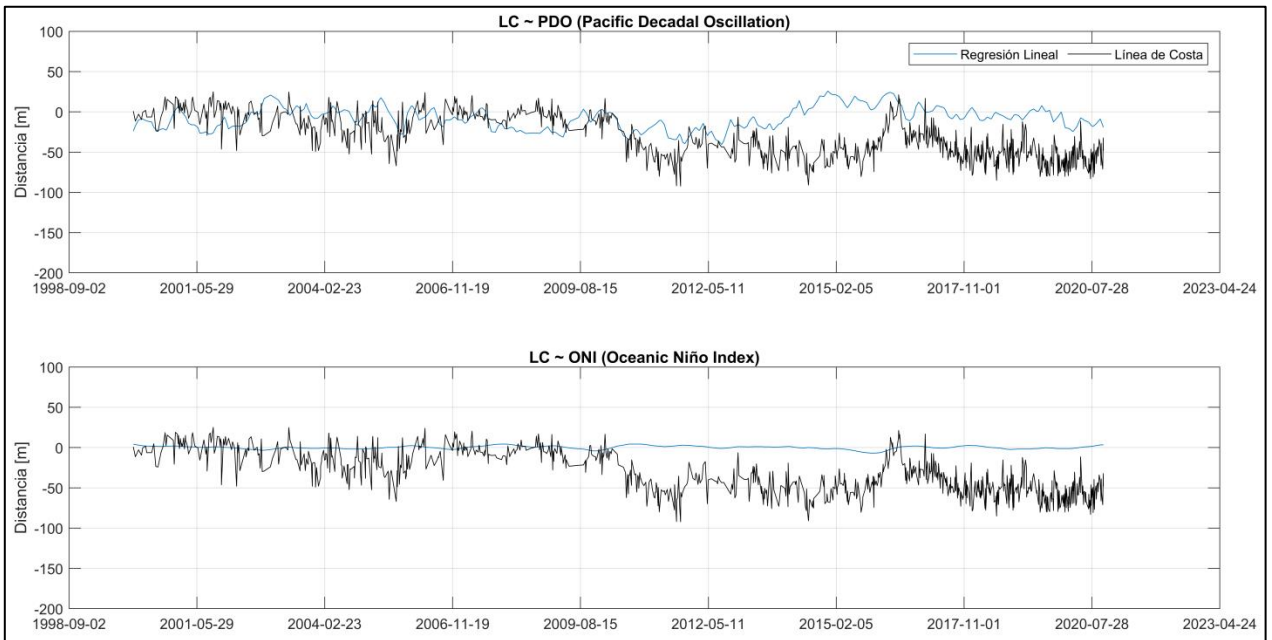


Figura 65: Diagrama de Taylor: Combinación N°1.

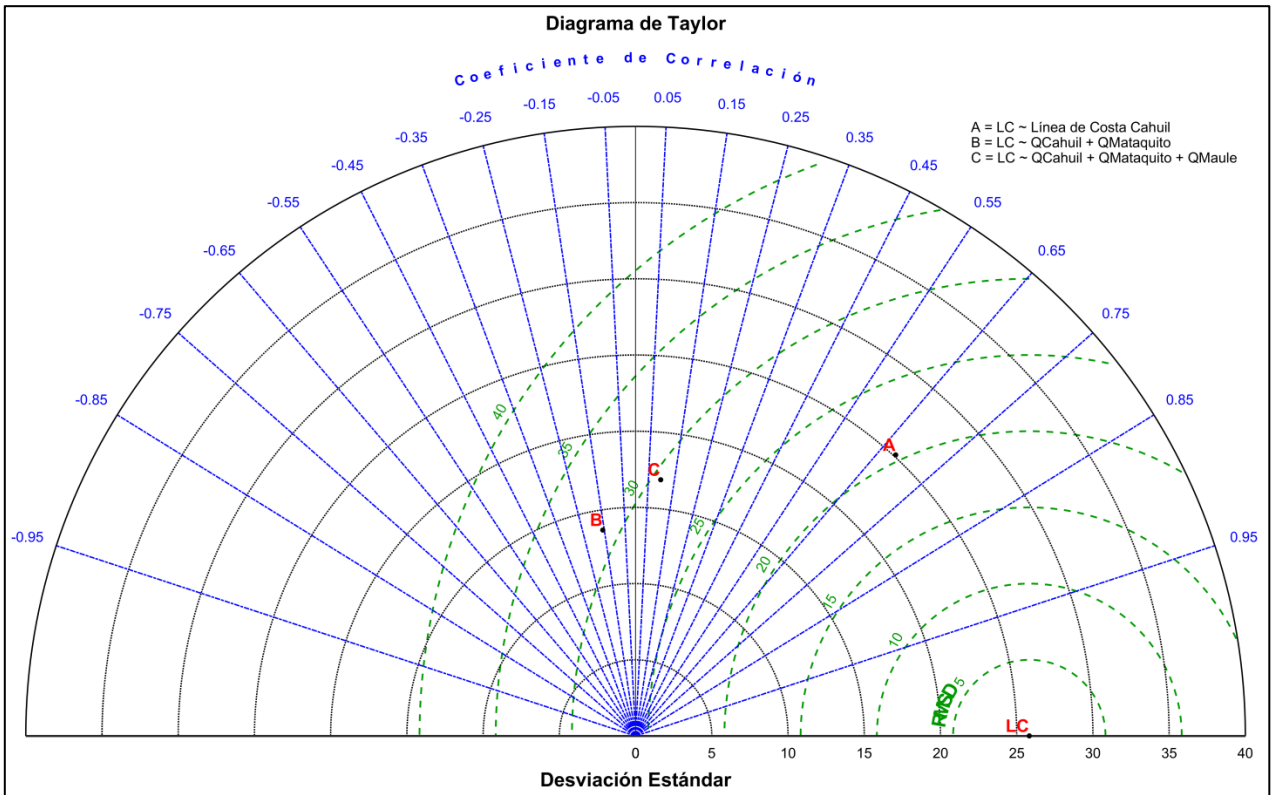


Figura 66: Predicción regresión lineal: Combinación N°1.

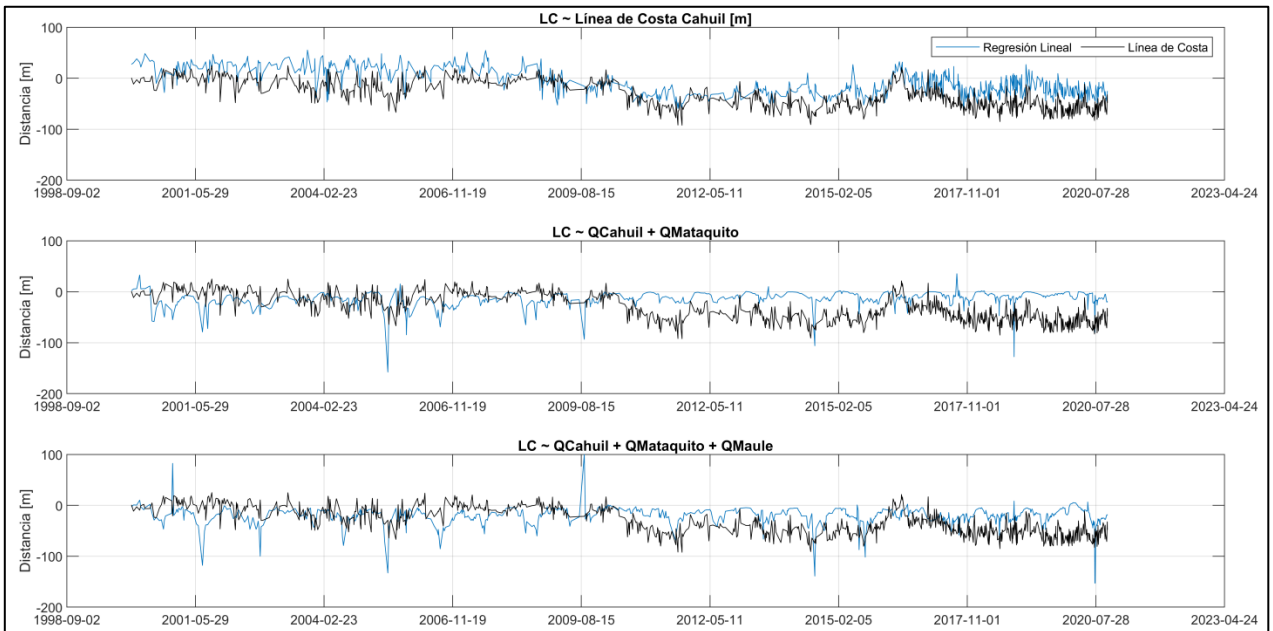


Figura 67: Diagrama de Taylor: Combinación N°2.

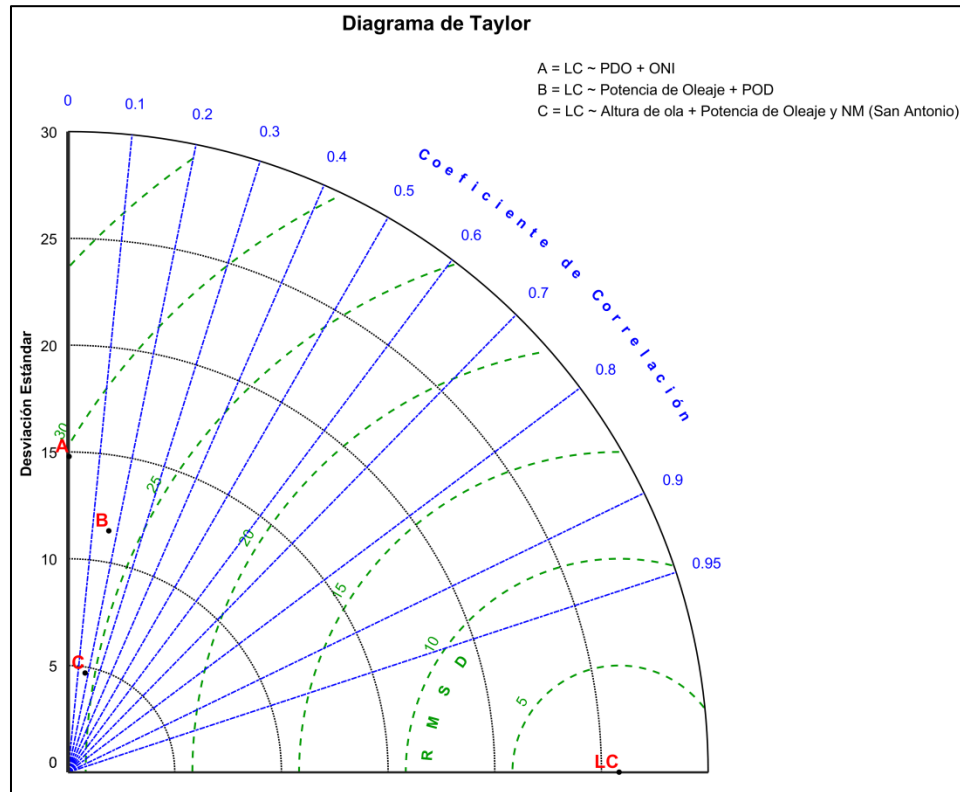


Figura 68: Predicción regresión lineal: Combinación N°2.

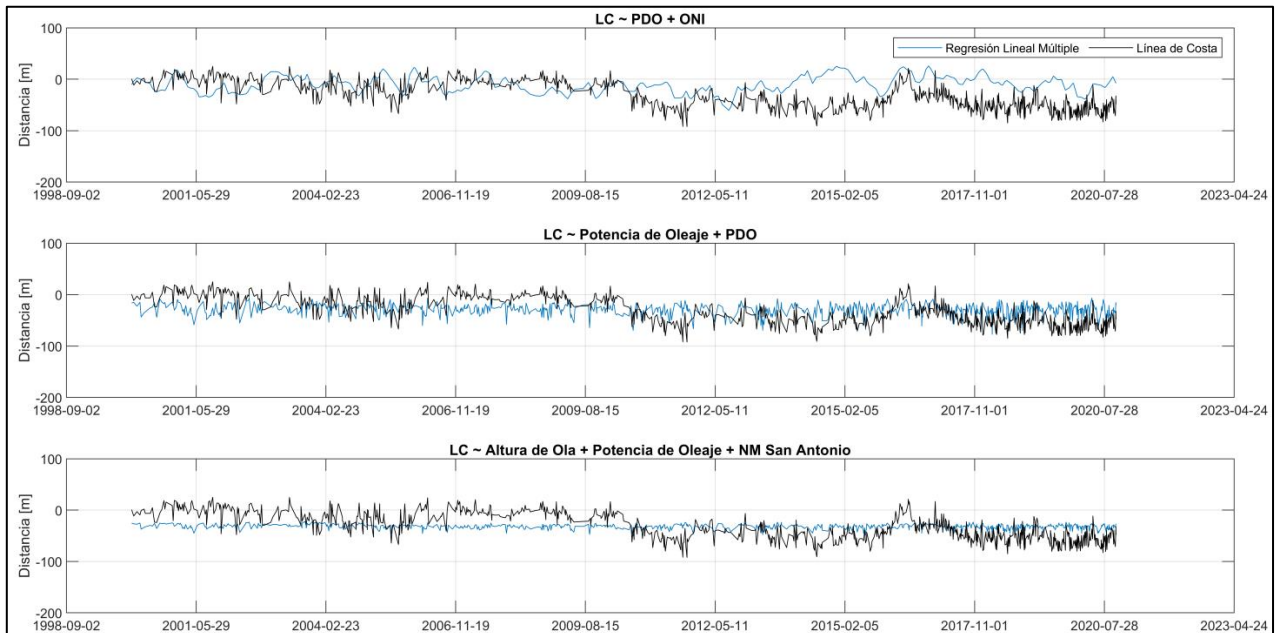


Figura 69: Diagrama de Taylor: Combinación N°3.

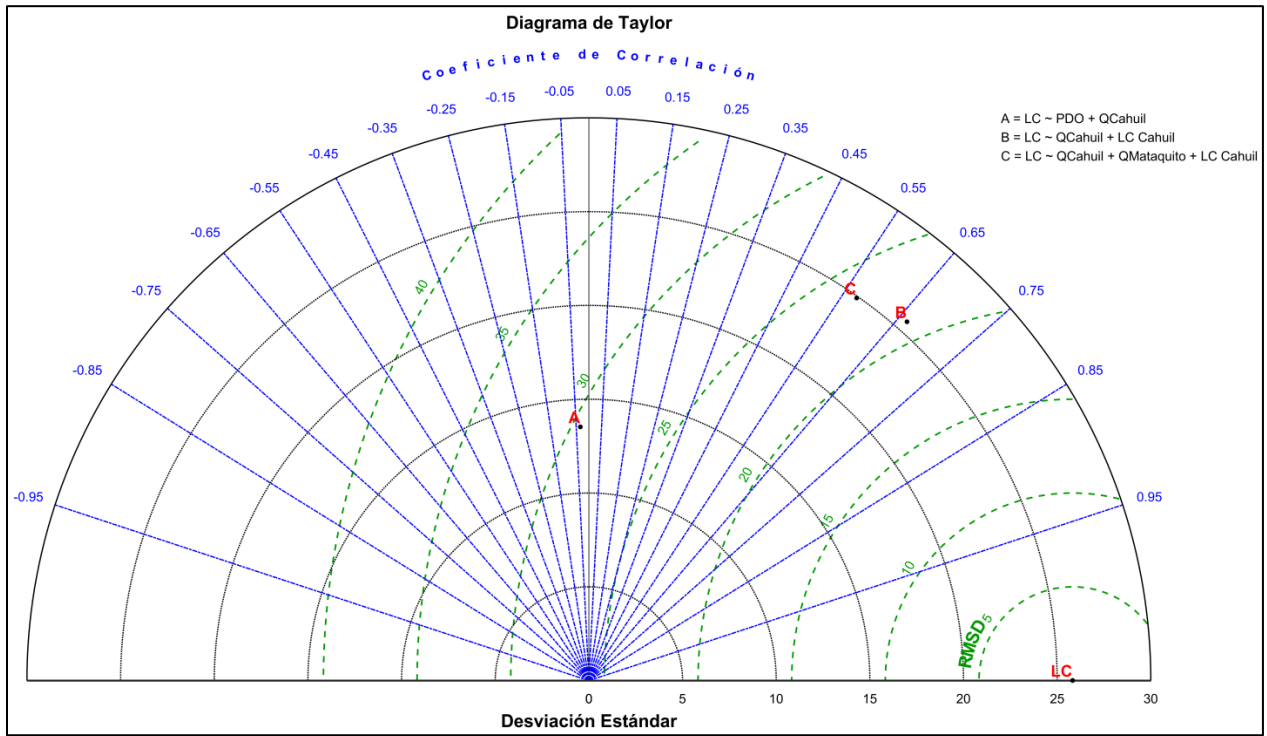


Figura 70: Predicción regresión lineal: Combinación N°3.

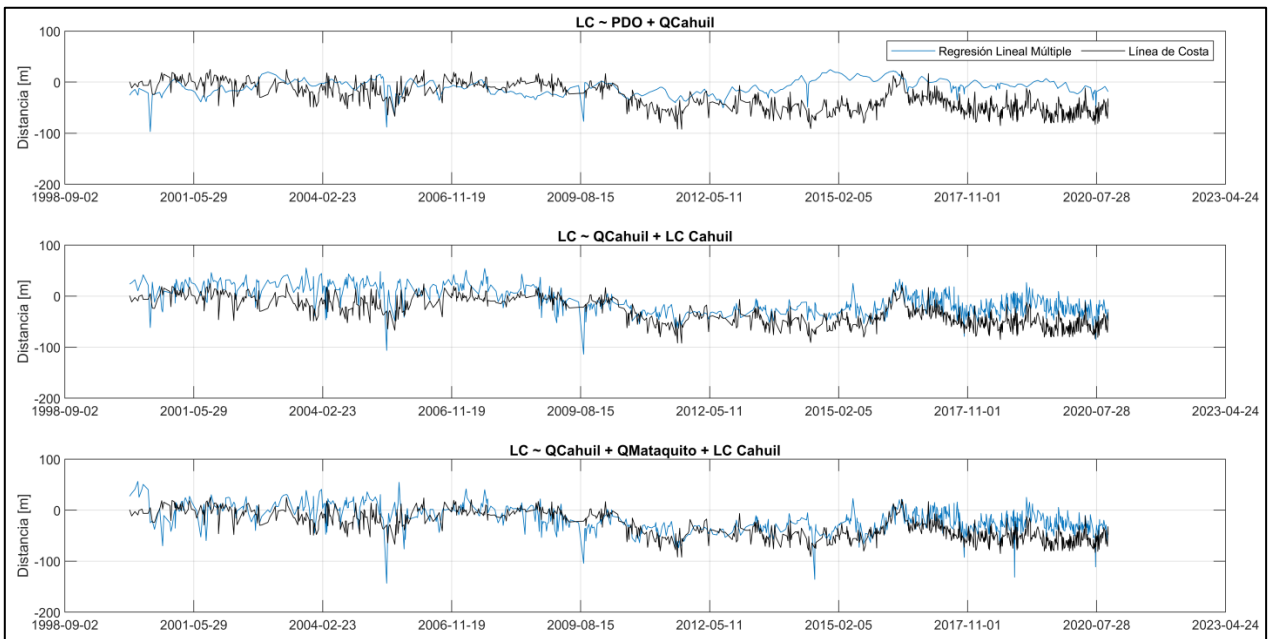


Figura 71: Diagrama de Taylor: Combinación N°4.

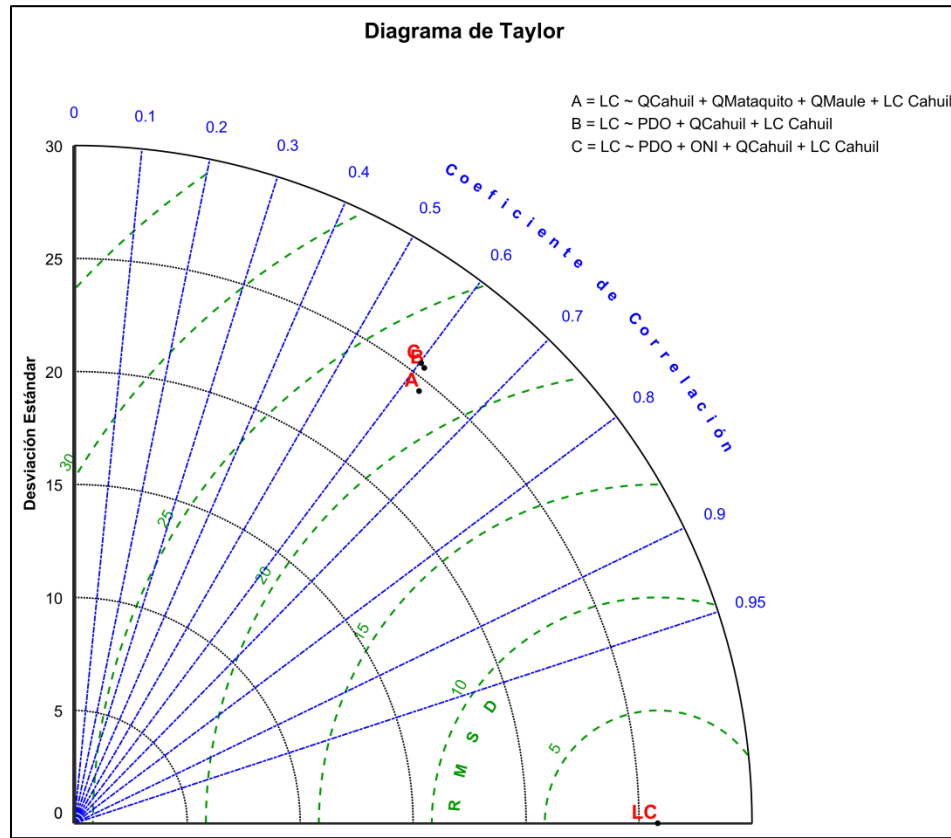


Figura 72: Predicción regresión lineal: Combinación N°4.

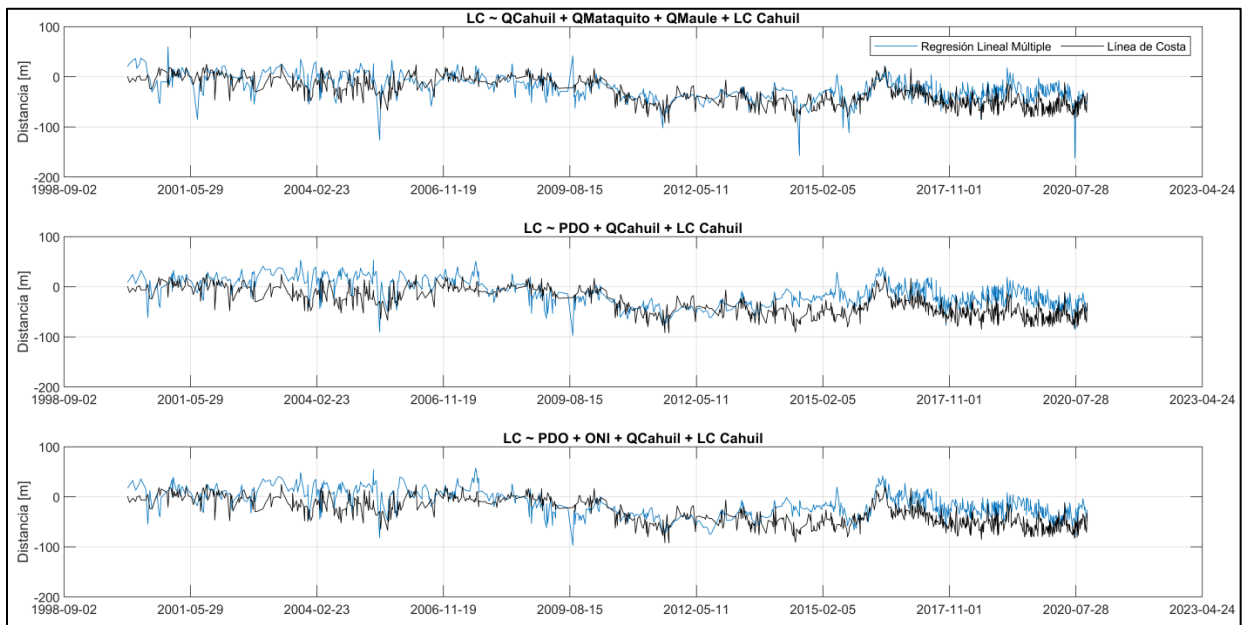


Figura 73: Diagrama de Taylor: Combinación N°5.

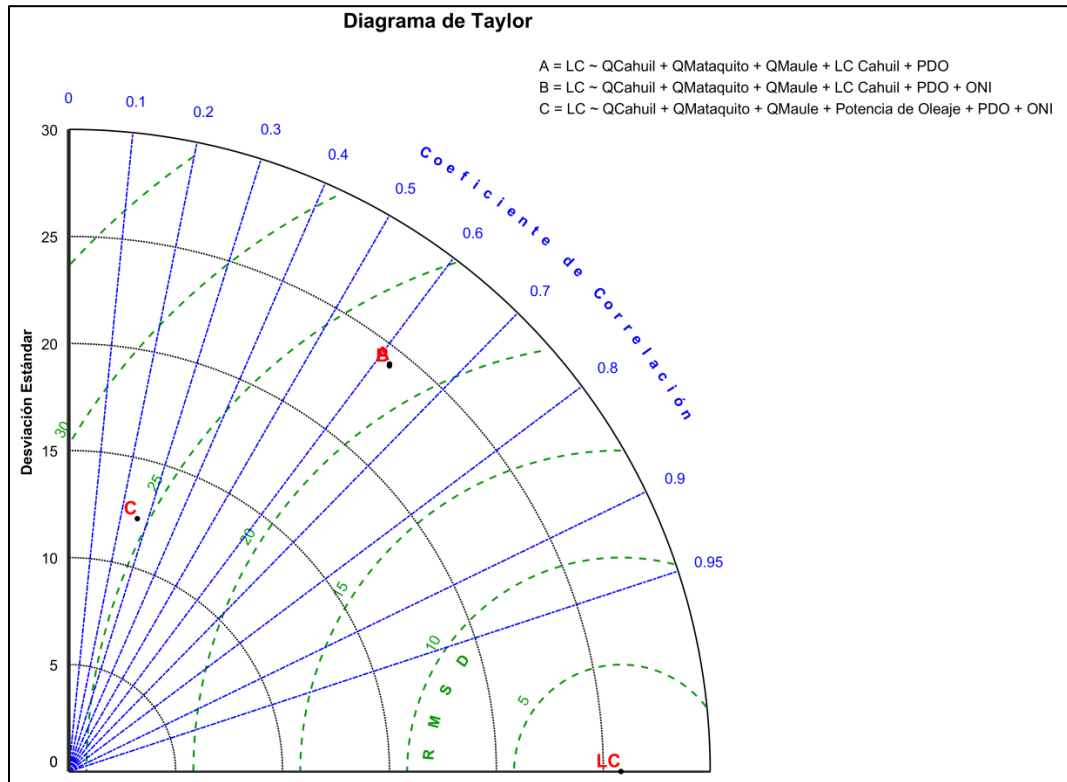


Figura 74: Predicción regresión lineal: Combinación N°5.

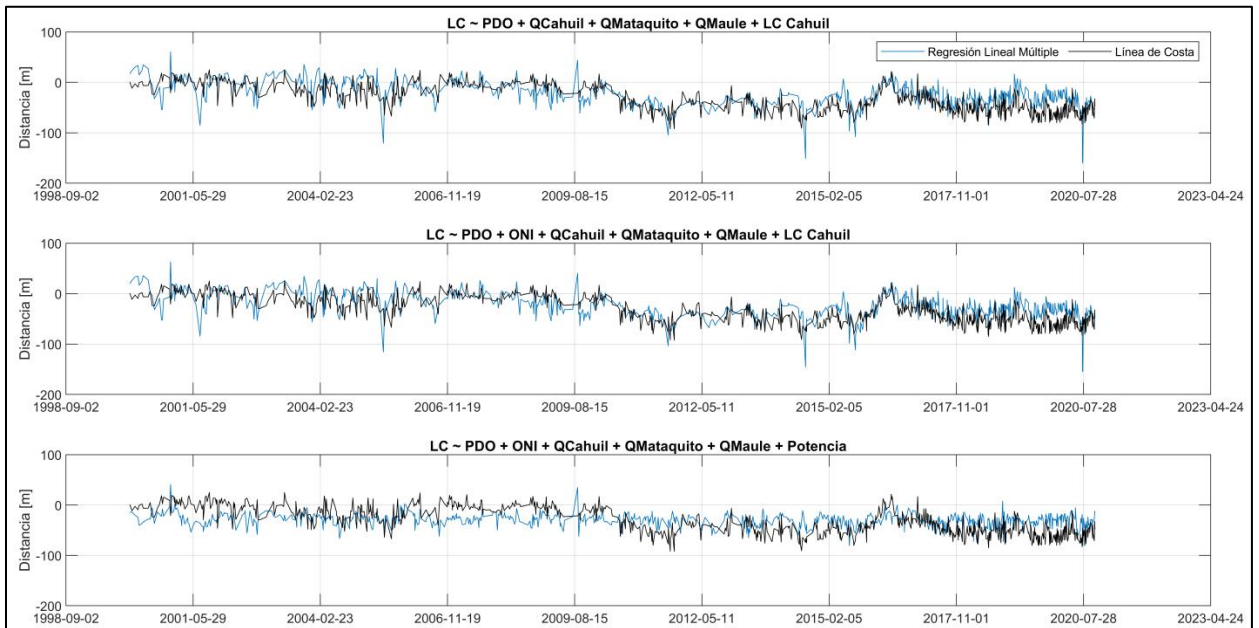


Figura 75: Diagrama de Taylor: Combinación N°6.

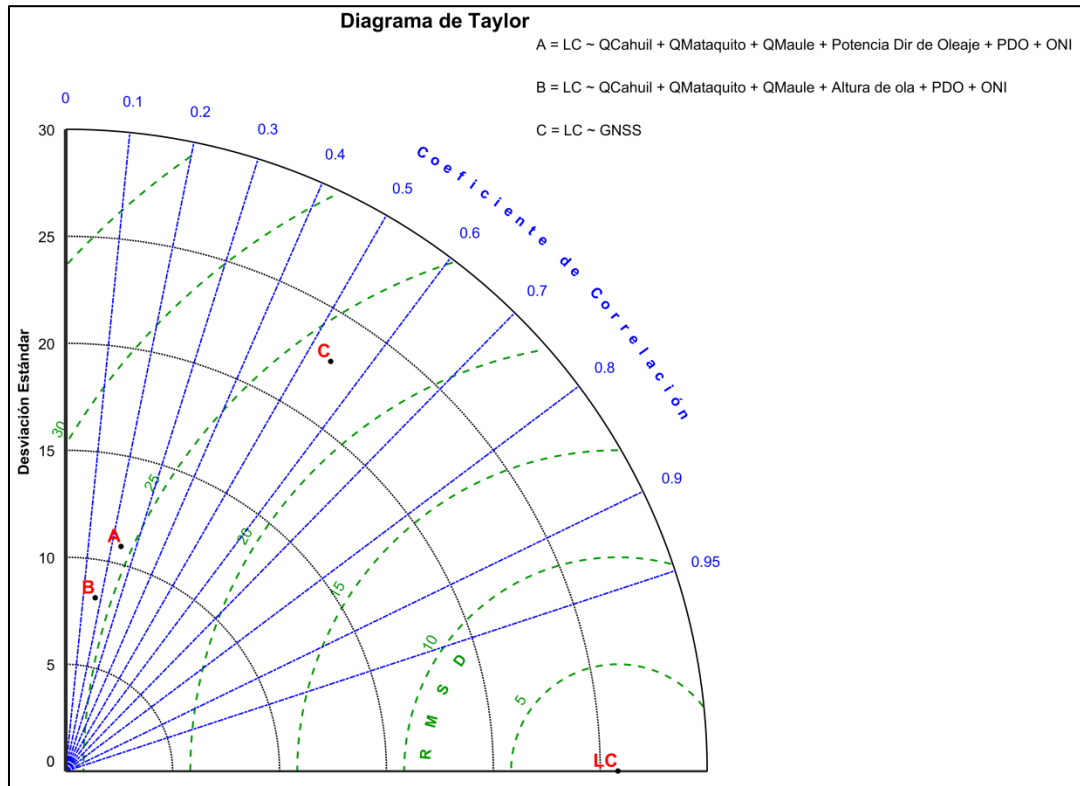


Figura 76: Predicción regresión lineal: Combinación N°6.

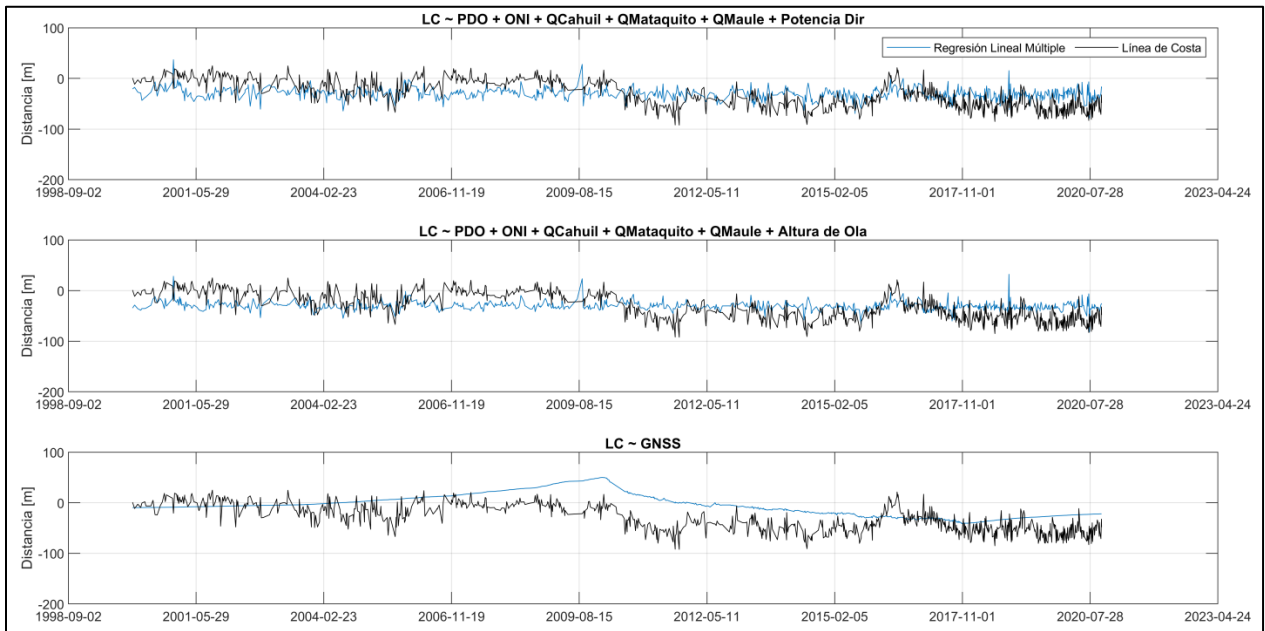


Figura 77: Diagrama de Taylor: Combinación N°7.

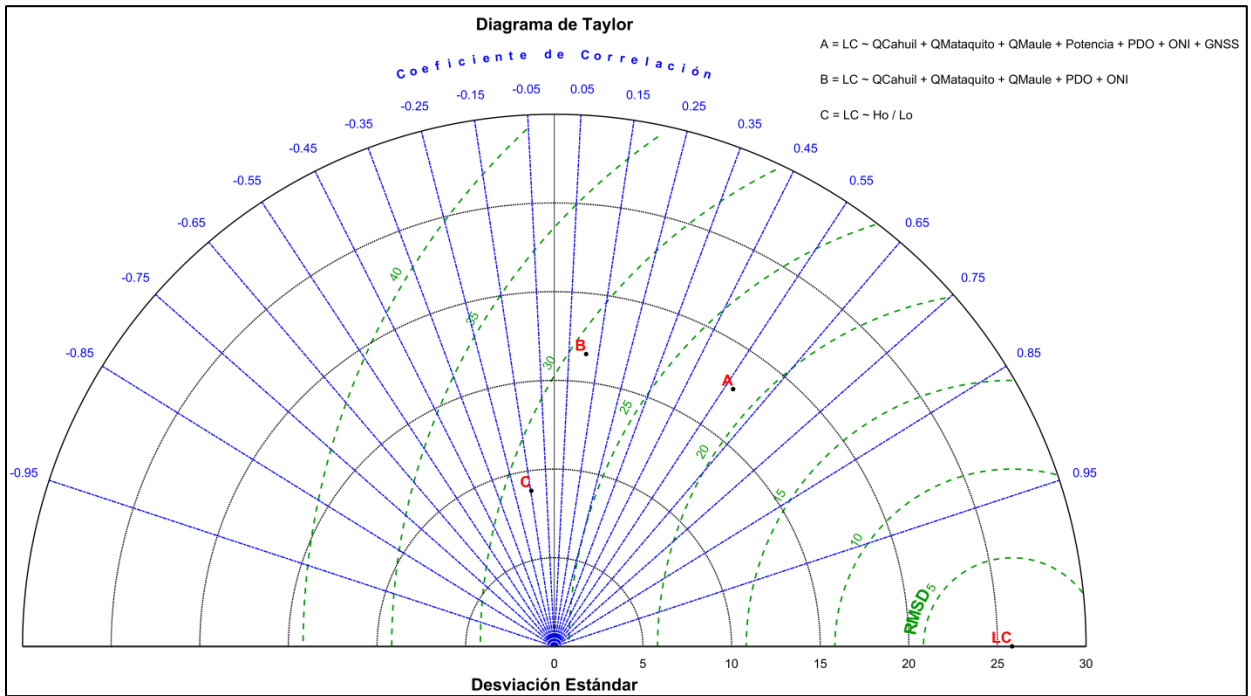


Figura 78: Predicción regresión lineal: Combinación N°7.

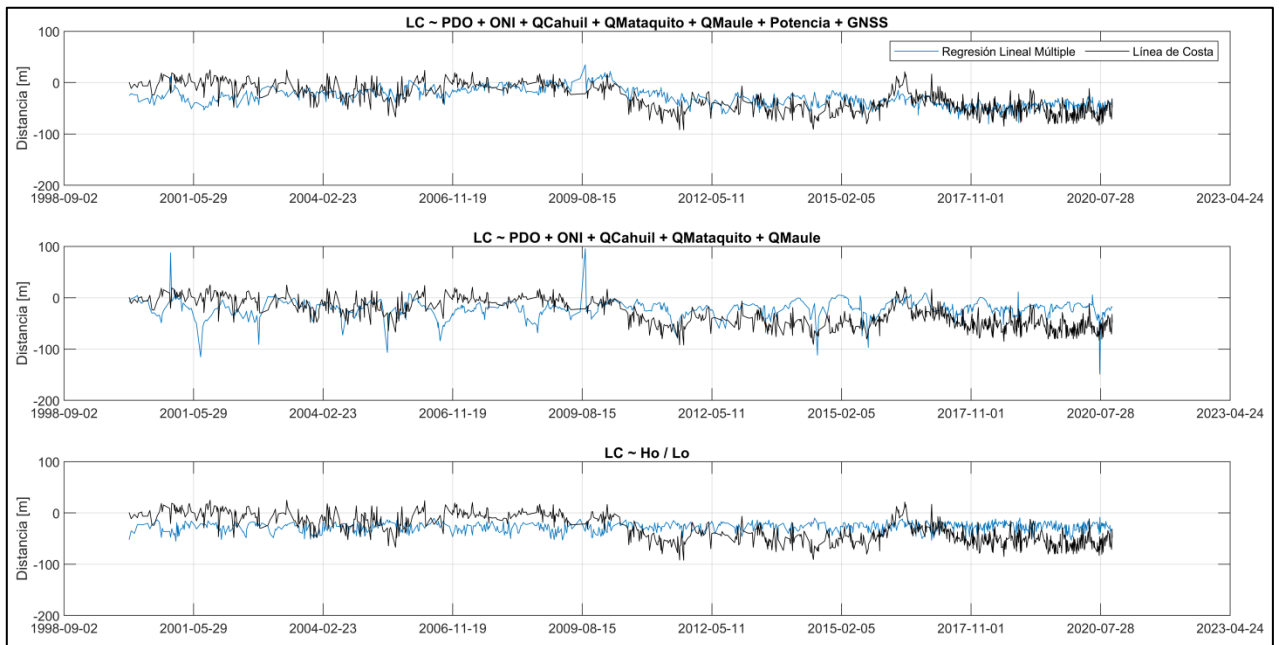


Figura 79: Diagrama de Taylor: Combinación N°8.

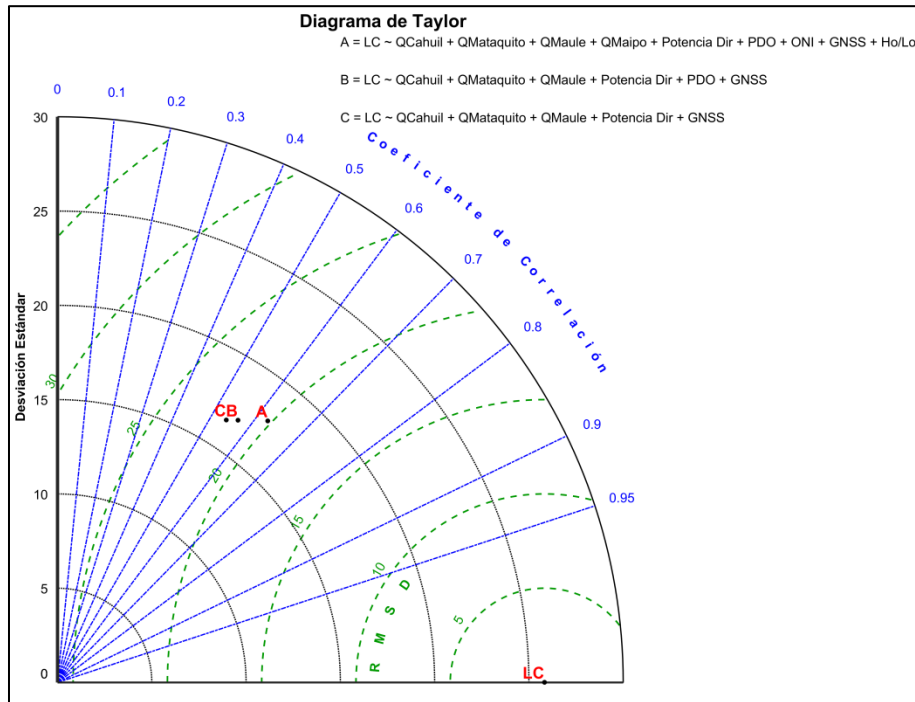


Figura 80: Predicción regresión lineal: Combinación N°8.

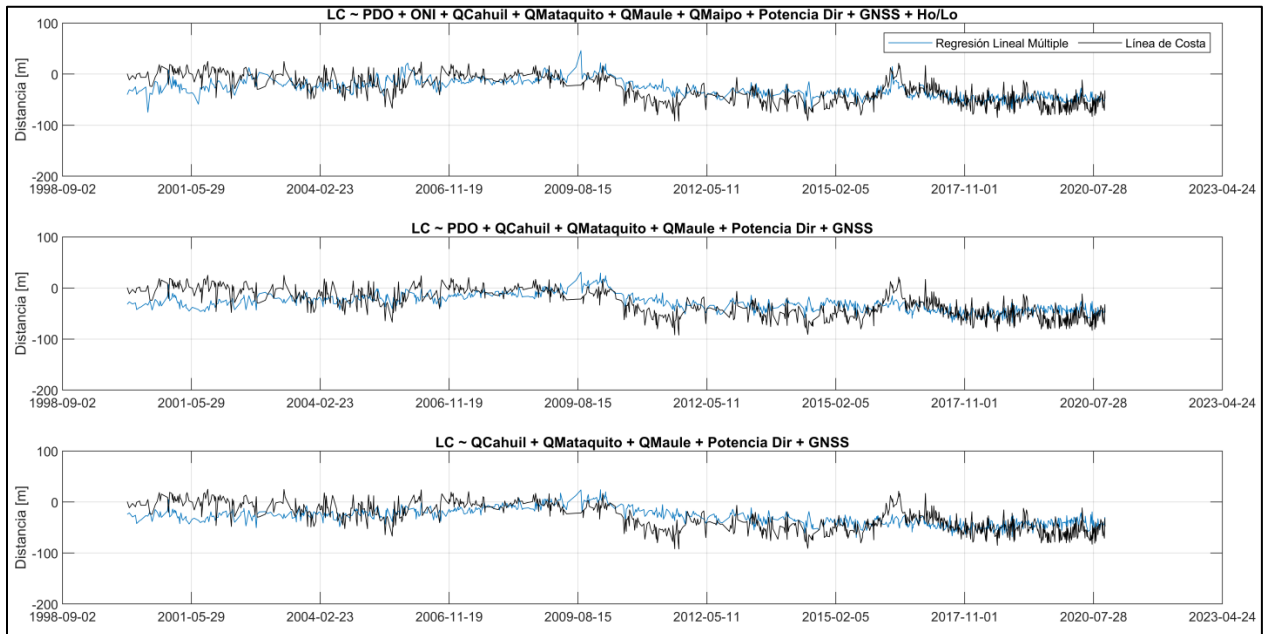


Figura 81: Diagrama de Taylor: Combinación N°9.

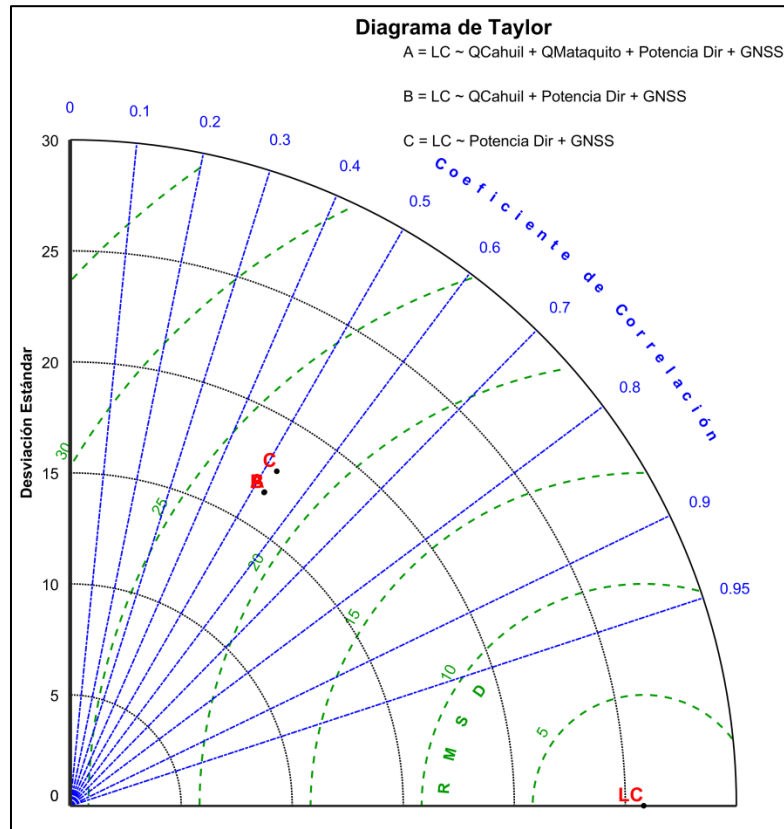


Figura 82: Predicción regresión lineal: Combinación N°9.

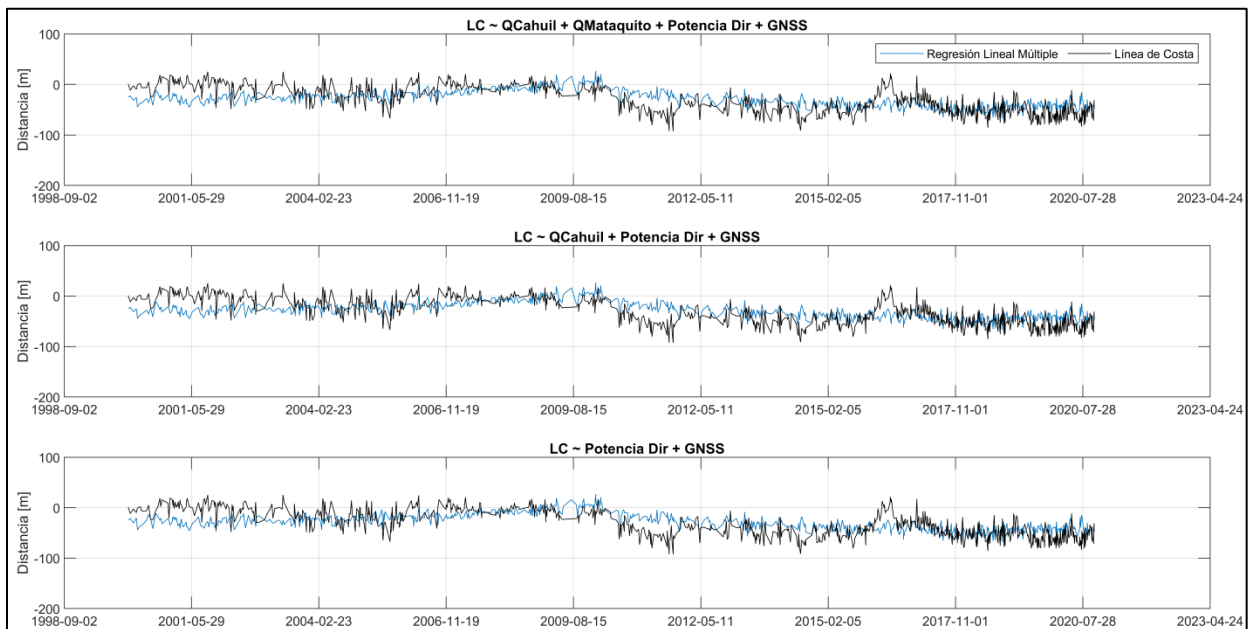


Figura 83: Diagrama de Taylor: Combinación N°10.

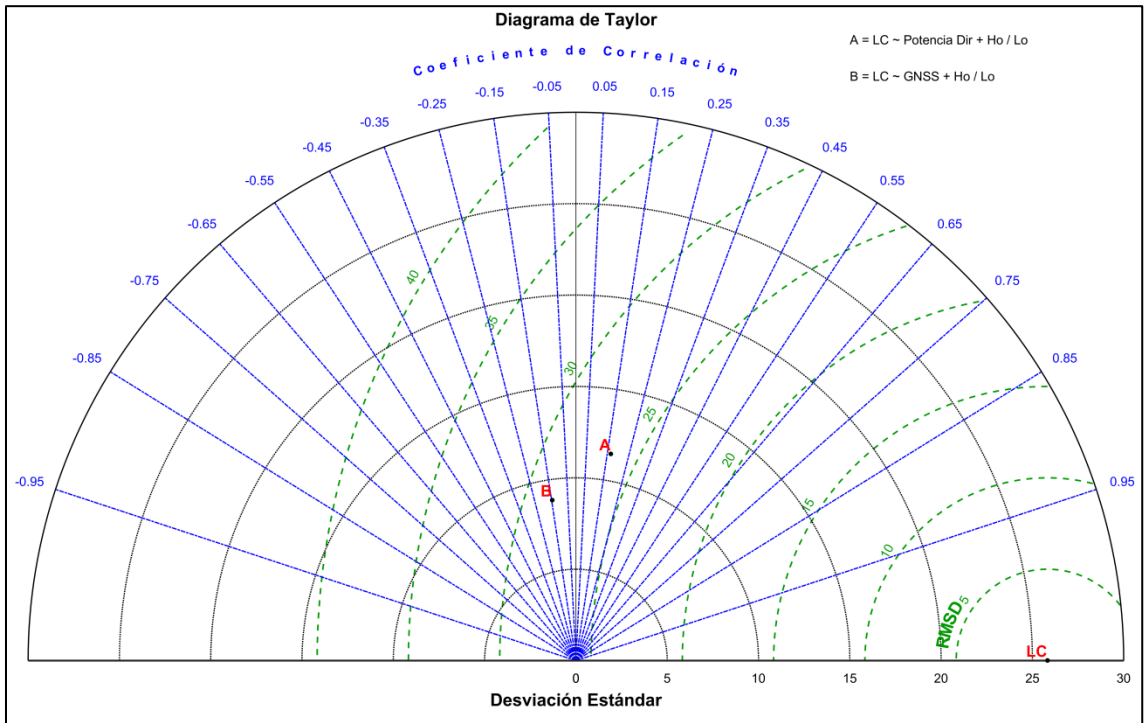


Figura 84: Predicción regresión lineal: Combinación N°10.

