

# Determinación del **RIESGO** de los **IMPACTOS** del **CAMBIO CLIMÁTICO** en las costas de Chile

Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgo en playas  
Ministerio del Medio Ambiente  
22 de octubre de 2019

### **Equipo consultor del estudio**

- Andrés Pica (PUC)
- Carolina Martínez (PUC)
- Catalina Marinkovic (PUC)
- César Esparza (UV)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- David Morales (PUC)
- Iván Torres (PUC)
- Javiera Mora (UV)
- José Miguel Fariña (PUC)
- Julio Salcedo (UPLA)
- Luis Flores (PUC)
- Macarena Pérez
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Nickolás Bassi (UPLA)
- Nicolás Bambach (PUC)
- Oscar Melo (PUC)
- Patricio Winckler (UV)
- Roberto Agredano (UCM)
- Sebastián Vicuña (PUC)
- Stefan Gelcich (PUC)

### **Equipo consultor volumen 4: Vulnerabilidad y riesgos en playas**

- Carolina Martínez (PUC)
- Roberto Agredano (UCM)
- Patricio Winckler (UV)
- Iván Torres (PUC)
- Luis Flores (PUC)
- Oscar Melo (PUC)

### **Contraparte técnica del Ministerio del Medio Ambiente**

- Maritza Jadrijevic
- Nico Kohlhas
- Gladys Santis
- Priscilla Ulloa

## **Cómo citar este informe**

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.

## Resumen del estudio

El estudio **Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile**, busca generar información de proyecciones de la amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo de los sistemas humanos y naturales de la zona costera ubicados en 104 comunas de Chile continental, además de Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández. El objetivo de este estudio es sentar las bases para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación. El estudio se desarrolló entre octubre de 2018 y octubre de 2019 y se presenta mediante un resumen ejecutivo, 8 volúmenes temáticos y un Sistema de Información Geográfica (SIG). El estudio, financiado y desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente, contó con la participación de 21 investigadores de 5 universidades (PUC, UV, UPLA, PUCV y UCM) y 3 centros de investigación (CCG-UC, CIGIDEN y COSTAR-UV).

El **estudio de amenaza** se basa en el análisis histórico del oleaje y del nivel medio del mar (NMM), además de una proyección para el período 2026-2045 de estas variables y de la cota de inundación. En primer lugar, se analiza el comportamiento histórico del oleaje obtenido a partir un modelo numérico (WWIII) cada 2° de latitud (1980-2015). El análisis de clima medio del oleaje concluye que ha habido un incremento leve en la altura y el período, además de un giro al sur del oleaje, probablemente asociados a la migración al sur del Anticiclón Permanente del Pacífico Sur. El análisis de clima extremo demuestra en todo Chile se ha registrado un aumento en la cantidad de marejadas de 0.1 a 0.3 eventos más por año, dependiendo de la latitud. El estudio de NMM, basado en el análisis de 11 mareógrafos con más de 30 años de data, muestra que no existe una tendencia clara de aumento en Chile, lo que puede atribuirse a las deformaciones de la corteza producto del ciclo sísmico. En particular, en el norte existe un descenso del NMM probablemente asociado al acoplamiento de las placas tectónicas luego del terremoto de 1877.

En segundo lugar, el estudio busca evaluar los cambios del oleaje (marejadas), NMM y cota de inundación entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045) correspondiente al escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC. El estudio de oleaje basa en el forzamiento del modelo WWIII mediante 6 modelos de viento en toda la cuenca del Pacífico. El modelo es calibrado y validado con registros de boyas direccionales y altimetría satelital entre 1980 y 2015. El estudio de clima medio concluye que la altura de ola y el período seguirán incrementándose levemente y el oleaje girará más al sur, también en forma moderada. Los eventos extremos, no obstante, serán más frecuentes e intensos, sobre todo en la zona central de Chile, lo que seguramente aumentará los daños en la infraestructura costera. El estudio de NMM, por su parte, se basa en 21 modelos disponibles en el CMIP5 los cuales se analizan cada 5 [km] en forma latitudinal. El estudio concluye que en todo Chile, incluidas Rapa Nui y Juan Fernández, se espera un ascenso de 0.15 a 0.18 [m], con un rango de incertidumbre del orden de  $\pm 0.1$  [m] para la proyección. A fines de siglo, no obstante, el incremento sería del orden de  $0.65 \pm 0.3$  [m]. La cota de inundación, calculada a partir del oleaje, el NMM, la marea astronómica y la marea meteorológica, presenta valores de 2.5 [m] NRS en el extremo norte a 3.5 [m] NRS en el Canal Chacao para el escenario histórico y de entre 2.8 a 3.8 [m] NRS para ambos extremos. El aumento de la cota de inundación abarca desde +0.23 a +0.29 [m] en los extremos sur y norte, respectivamente.

El **estudio de exposición** consiste en elaborar un modelo de elevación digital (DEM) en 106 comunas a partir de tres fuentes satelitales (ASTER GDEM-2, ALOS WORLD 3D y ALOS PALSAR). A partir del DEM se elabora un inventario de exposición de los sistemas humanos y naturales ubicados bajo los 10 metros sobre el nivel del mar (msnm). El inventario es generado a partir de información disponible en los servicios públicos, levantamientos en terreno y talleres efectuados en Antofagasta, Valparaíso y Concepción. Luego de un proceso de limpieza de 174.746 registros identificados inicialmente, se llega a un inventario con 18.376 entradas, separadas en 6 categorías (población, infraestructura, equipamiento, economía, sistemas naturales y otros), subdivididas a su vez en 76 tipos de entidades. La información más relevante del inventario es presentada a nivel nacional, regional y comunal. En síntesis, el inventario identifica un total de 972.623 personas habitando en los primeros 10 msnm y que en dicha área se ubican 546 caletas de pescadores, 1692 humedales, 256 campos dunares, 1172 playas, 156 lugares de interés para la biodiversidad, 1198 equipamientos (colegios, jardines infantiles, carabineros, entre otros), 171 terminales marítimos, 475 elementos de infraestructura costera y 477 asentamientos, entre otros elementos (Tabla 22, Volumen 1). A partir inventario y mediante el juicio experto, se definen 12 comunas críticas en las que se utilizan planos de borde costero del SHOA para refinar el cálculo de la vulnerabilidad. Las comunas críticas son Antofagasta, Coquimbo, Viña del Mar, Valparaíso, Pichilemu, Talcahuano, Coronel, Arauco, Puerto Saavedra, Valdivia, Rapa Nui y el Archipiélago Juan Fernández; ambas últimas que se detallan en el volumen de **vulnerabilidad y riesgo en islas oceánicas**.

El **estudio de vulnerabilidad** se orienta a los sistemas humanos y naturales identificados en el estudio de exposición. Dada la gran cantidad y complejidad de categorías (6) y entidades existentes (76), el análisis se reduce a evaluar si cada objeto del inventario de exposición será o no inundado durante la proyección (2026-2045) bajo el escenario RCP 8.5. Las líneas de inundación para el período histórico y la proyección se presentan en el SIG. El estudio concluye que 589 manzanas censales, 46357 personas y 18338 viviendas pasarían a ubicarse en zonas de inundación. Lo mismo ocurriría 17 puentes, 4245 puntos de la red vial, 8 centros de distribución de energía por hidrocarburos, 1 central termoeléctrica, 2 subestaciones y 53 elementos de infraestructura sanitaria. Con respecto al equipamiento comunal, 10 edificaciones de bomberos, 7 establecimientos de salud, 49 de educación y 5 de policía se ubicarían en zonas inundables. Por último, se identifican 358 elementos asociados al turismo en dichas zonas. Adicionalmente, y en volúmenes separados, se caracteriza la vulnerabilidad (y cuando es posible el riesgo) de playas, caletas, puertos y humedales, proponiendo también medidas de adaptación específicas para estos sistemas.

En el estudio de **vulnerabilidad en playas** se determinan los cambios en la posición de la línea litoral para 35 playas en las regiones de Antofagasta, Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Biobío. Para ello se usa el software DSAS, fotografías aéreas, imágenes satelitales y levantamientos topográficos. El análisis cubre desde 39 años (La Serena) a sólo 3 años (Lebu-Tirúa), pero en 33 playas exceden los 20 años. Los resultados integrados en el SIG indican que el 9% de estas playas presenta erosión alta (mayor a 1.5 m anuales), el 71% erosión, el 11% un estado estable y solo un 9% acreción. Los casos de mayor erosión corresponden a extensos litorales arenosos, asociados a campos dunares y humedales. El estudio histórico no establece las causas que explican la erosión generalizadas, que pueden ser de origen oceanográfico, geofísico, antrópico o hidrológico. En el estudio de **riesgo en playas** se estima, en forma general, que aquellas playas

ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios de entre 3 y 23 [m] por efecto de cambios en oleaje y nivel del mar en el escenario RCP 8.5 en el período 2026-2045. La tendencia es que playas largas experimenten erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte debido a un leve cambio en la dirección del oleaje. La estimación del daño económico calculado en forma específica para 6 playas en la Región de Valparaíso permite estimar una pérdida cercana a los 500 mil dólares anuales producto del riesgo de erosión causada por cambio climático.

En el estudio de **vulnerabilidad en puertos** se analiza el impacto histórico asociado a la pérdida de disponibilidad de sitios de atraque debido a oleaje (*downtime*). A partir de los certificados de cierre de puerto (2015 a 2017) y una base de datos de SERVIMET (2007 a 2014) se concluye que, entre 2008 y 2017, se registraron 9097 cierres de puerto en 19 capitanías expuestas al Océano Pacífico de las cuales se contó con información. Los puertos con mayor cantidad de cierres son Arica (850), Tocopilla (802) y Quintero (761). El estudio de **riesgo en puertos** se evalúa el *downtime* operacional en 9 puertos en Chile (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente). El oleaje en aguas profundas se transfiere a cada puerto utilizando un modelo numérico (SWAN). Luego, el *downtime*, expresado en horas de cierre por año, se calcula comparando el clima del oleaje local con límites operacionales definidos en la ROM 3.1-99 (PPEE, 2000) para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Se concluye que algunos puertos mejorarán y otros empeorarán su operatividad y que el clima extremo será más severo a mediados de siglo. La mejora operativa puede explicarse por el giro al sur del oleaje que mejoraría las condiciones de abrigo de puertos ubicados en el extremo sur de las bahías. En términos económicos, el análisis a nivel agregado para los 9 puertos se traduce en pérdidas de US\$ 4,12 millones anuales y ganancias por US\$ 6,34 millones anuales, dando como resultado unas ganancias netas de US\$ 2,22 millones anuales como efecto del cambio climático. El aumento del NMM, sumado al incremento en la frecuencia e intensidad de las marejadas, no obstante, significará un aumento significativo del sobrepaso y del daño estructural de obras portuarias. Se proponen medidas de adaptación para mejorar las condiciones operacionales y para la gestión de la infraestructura en un contexto de clima futuro más severo que el actual.

Dada su similitud operacional, el estudio de **vulnerabilidad en caletas** equivale al de puertos y busca mostrar que estas han experimentado numerosos cierres debido a marejadas en la última década. En el estudio de **riesgo en caletas** de pescadores se evalúa el *downtime* operacional de las 546 caletas agrupadas cada 2° de latitud para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), considerando los límites operacionales definidos en base a *focus groups* y encuestas para diferentes actividades (buzos, recolectores, embarcaciones de eslora inferior y superior a 12 m). El oleaje en aguas profundas se transfiere a la costa utilizando una metodología simplificada que rescata la física fundamental de la zona de aproximación a la costa, pero no las condiciones locales de cada caleta. El análisis concluye que un 23% de los registros pesqueros artesanales se encuentran en zonas con predicciones de aumento en *downtime* de pesca (19°S a 34°S). Hacia el sur, las condiciones operacionales asociadas al oleaje mejorarían en la proyección. Considerando los valores de desembarque y de precios en playa del año 2017, se estima una pérdida a nivel agregado que podría fluctuar entre los US\$ 1,3 y 7,6 millones anuales para las caletas ubicadas entre los 19°S y 34°S, dependiendo del escenario. Las pérdidas en desembarque representan alrededor de un 2-5% de capturas actuales.

El estudio de **vulnerabilidad de humedales** presenta la distribución comunal de 1692 humedales costeros. A nivel específico y dependiendo de la disponibilidad de información y levantamientos en terreno, se identifica una tendencia general a la reducción del área de los espejos de agua (18 de 21 casos analizados) que podría explicarse por la reducción de los caudales (100% de 30 ríos analizados). Debido al incremento histórico de la frecuencia e intensidad de las marejadas extremas, los episodios de sobrepaso que aportan agua salada a los humedales podrían generar cambios en el patrón de dominancia de las especies vegetales levantadas en los humedales costeros. No obstante, los cambios identificados en los humedales podrían deberse a otros factores no estudiados como la influencia de perturbaciones naturales provenientes de la cuenca (aluviones), al efecto del pastoreo ejercido por vacas y caballos, al pisoteo de turistas y al efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas.

# Contenidos

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1.1 OBJETIVOS	9
1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME	10
1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	10
1.4 EQUIPO DE TRABAJO	12
1.5 AGRADECIMIENTOS	13
1.6 GLOSARIO	14
<b>2 MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>16</b>
<b>3 VULNERABILIDAD DE EROSIÓN EN PLAYAS</b>	<b>20</b>
3.1 METODOLOGÍA	20
3.2 RESULTADOS A NIVEL GLOBAL	26
3.3 CAMBIOS DE LA LÍNEA LITORAL SEGÚN REGIÓN	34
3.3.1 Región de Antofagasta: playa Hornitos	34
3.3.2 Región de Coquimbo	36
3.3.3 Región de Valparaíso	39
3.3.4 Región de Valparaíso: Rapa Nui	72
3.3.5 Región de O'Higgins: playa Pichilemu	73
3.3.6 Región del Biobío	75
<b>4 RIESGO DE EROSIÓN EN PLAYAS</b>	<b>84</b>
4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PLAYAS	84
4.2 ESTIMACIÓN DE CAMBIOS ESPERADOS EN LA LÍNEA LITORAL	92
4.2.2 Pivoteo en planta de la línea litoral	93
4.2.3 Obtención de $H_s$ 12% a partir de $H_s$ 99%	94
4.2.4 Resultados	95
4.3 ESTIMACIÓN DEL DAÑO ECONÓMICO POR EROSIÓN DE PLAYAS	107
4.3.1 Metodología	107
4.3.2 Resultados	108
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>110</b>
5.1 RESULTADOS DE EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA LITORAL	110
5.2 CRITERIOS DE ADAPTACIÓN	112
5.2.1 Conservación de campos dunares, humedales y campos de algas	112
5.2.2 Generación de cuotas de extracción de arenas	114
5.2.3 Soluciones de ingeniería verde	114
5.2.4 Gestión integrada de zonas costeras	117
5.2.5 Política nacional de uso del borde costero	118
5.3 DAÑO ECONÓMICO ASOCIADO A LA EROSIÓN DE PLAYAS DE CHILE	119
<b>6 REFERENCIAS</b>	<b>120</b>
<b>7 ANEXOS</b>	<b>124</b>
7.1 METODOLOGÍA DE TRASFORMACIÓN DE OLEAJE	124
7.2 RETROCESO PROYECTADO A 2026-2045 EN PLAYAS ANALIZADAS EN DETALLE	127



# 1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los cambios observados en el sistema climático desde la década de 1950 no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2014). Este fenómeno ha forzado la adopción de medidas y acuerdos a nivel internacional para atenuar, en la medida de lo posible, las consecuencias de este fenómeno. En una primera instancia, los acuerdos se enfocaron en mitigación de gases efecto invernadero, pero los impactos del calentamiento global se han visto de manera más recurrente, teniendo que enfocarse esfuerzos en adaptación. Los impactos asociados a los efectos agudos y crónicos del cambio climático son cada vez más evidentes en el caso de Chile. Para avanzar en el desafío de la adaptación es necesario entender los riesgos en distintos componentes del sistema productivo, ambiental y social del país.

Atendiendo a la escasez de información sobre los efectos de este fenómeno en el litoral de nuestro país, se presenta el primer informe de la consultoría "Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile", cuyas bases administrativas y técnicas corresponden a la R.E. N° 0568, del 11 de julio de 2018, del Ministerio del Medio Ambiente. El estudio es desarrollado por una alianza entre el Centro de Cambio Global UC (CCG), el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), la Universidad de Valparaíso, la Universidad de Playa Ancha, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es "Generar información de proyecciones respecto de la amenaza del cambio climático en las costas de Chile y sus impactos, a escala regional, y determinar el riesgo asociado a este fenómeno, para el diseño de políticas e implementación de medidas de adaptación".

A partir de este objetivo general, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- a) Generar proyecciones de la amenaza del cambio climático en el borde costero de Chile continental e insular, considerando el escenario de emisiones RCP 8.5 del IPCC.
- b) Elaborar información sobre la exposición de sistemas humanos y naturales del borde costero de Chile continental e insular según los resultados del objetivo específico a).
- c) Realizar una evaluación de la vulnerabilidad frente a la amenaza del cambio climático, para el borde costero de Chile continental e insular
- d) Determinar el riesgo humano y físico frente a esta amenaza según los resultados de los objetivos específicos a) y b).

## 1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME

Dado el gran volumen de información generada en esta consultoría, se presentan los resultados en los siguientes volúmenes:

- Resumen Ejecutivo
- Volumen 1: Amenazas (oleaje, nivel del mar y cota de inundación)
- Volumen 2: Exposición de zonas costeras
- Volumen 3: Vulnerabilidad de sistemas humanos y naturales
- Volumen 4: Vulnerabilidad y riesgo en playas
- Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos
- Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales costeros
- Volumen 7: Vulnerabilidad y riesgo en caletas pesqueras
- Volumen 8: Vulnerabilidad en Rapa Nui y Archipiélago Juan Fernández

El presente Volumen 4 cubre la vulnerabilidad y riesgo en playas.

## 1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

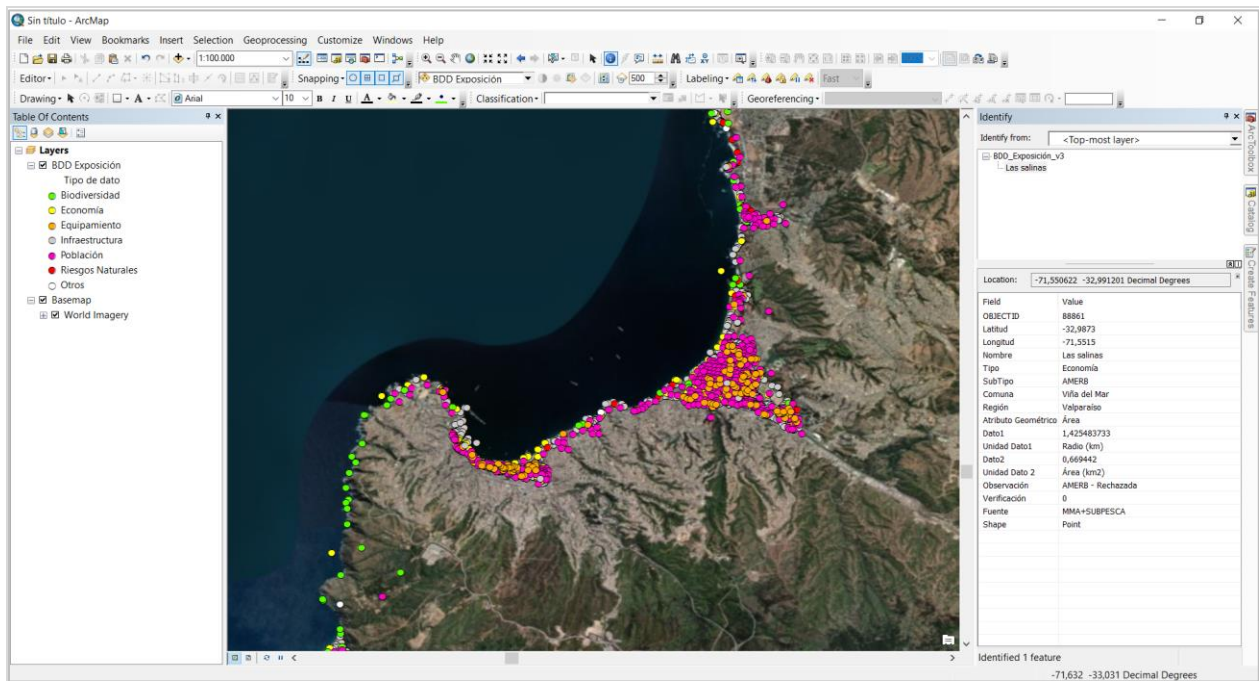
La información generada en el estudio fue proporcionada al Ministerio de Medio Ambiente en forma de un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante la elaboración de una Geodatabase<sup>1</sup> (GDB). Esta base de datos, compatible con el software ArcGis 10 o superior, se utilizó para elaborar sets planimétricos de exposición, vulnerabilidad y erosión costera, los cuales fueron entregados en formato PNG y como archivo editable propio del software (MXD).

La GDB contiene archivos vectoriales (puntos, líneas o polígonos) y ráster (matriz de datos compuesta por píxeles). Los primeros poseen una tabla de atributos con información detallada de cada elemento que conforma la base de datos. En los archivos ráster cada pixel tiene un valor asociado al dato observado. La base de datos SIG del proyecto tiene un aspecto como el ilustrado en la Figura 1.

---

<sup>1</sup> Información geoespacial contenida en una carpeta de archivos que comparten un origen común.

Figura 1: Ejemplo de visualización de la base de datos de Exposición en el SIG.



El SIG se estructuró de la siguiente manera:

- **Área expuesta:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área expuesta correspondiente a la franja de borde costero que se encuentra entre los 0 y 10 [m] sobre el nivel del mar (Volumen 2).
- **Área vulnerable:** contiene planos (PNG) y archivos editables (MXD) del área vulnerable correspondiente a la franja de borde costero afecta a la cota de inundación actual y futura (Volúmenes 1 y 2).
- **GDB CCCostas (.gdb):** contiene la base de datos de exposición y vulnerabilidad (Volúmenes 1 y 2). En su interior posee la siguiente información:
  - Área expuesta definida mediante un polígono del área expuesta nacional además de polígonos y curva de exposición para las comunas críticas<sup>2</sup>.
  - Área vulnerable definida mediante un polígono y curvas de vulnerabilidad identificadas a partir de las proyecciones de las cotas de inundación actual y futura, entre Arica y Canal Chacao.
  - Inventario de exposición separado en 7 categorías (biodiversidad, economía, equipamiento, infraestructura, población, riesgos naturales, otros) para 106

<sup>2</sup> El estudio de exposición (Volumen 2) identifica las siguientes comunas críticas: Antofagasta, Arauco, Coquimbo, Coronel, La Serena, Pichilemu, Saavedra, Talcahuano, Valdivia, Valparaíso y Viña del Mar.

comunas.

- Línea de costa del INE, modificada en algunos sectores y utilizada para calcular las longitudes costeras del territorio nacional.
  - Archivo vectorial de puntos con las características principales de las playas analizadas.
  - Modelos de elevación digital elaborados a partir de información topográfica detallada entregada por el SHOA para las comunas críticas.
  - Ortomosaicos de humedales generados en base a imágenes de drone de algunos de los humedales visitados en este estudio<sup>3</sup>.
- **Líneas de playa:** contiene los planos (PNG), archivos editables (MXD) y GDB de las playas analizadas en el estudio de erosión costera (Volumen 4).

## 1.4 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo está conformado por 21 académicos y profesionales de apoyo de la Pontificia Universidad Católica de Chile, de la Universidad de Valparaíso, de la Universidad de Playa Ancha, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad Católica del Maule (Figura 2). El trabajo se desarrolla bajo la coordinación del Centro UC de Cambio Global (CCG-UC<sup>4</sup>), centro de investigación interdisciplinario cuya misión es promover la colaboración académica (nacional e internacional) para investigar los fenómenos relacionados al cambio global, abordando integralmente las dimensiones biofísicas y humanas. Miembros del equipo de trabajo son también parte del Centro Integrado de Gestión de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN<sup>5</sup>), centro de investigación de excelencia que tiene como misión desarrollar, integrar y transferir conocimiento científico, y formar capital humano avanzado que contribuya a reducir las consecuencias sociales de los eventos naturales extremos. Se cuenta también con el apoyo del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero de la Universidad de Valparaíso (COSTAR-UV<sup>6</sup>).

---

<sup>3</sup> Los humedales son: Carampangue, Cartagena, Cebada, Chaihuín, Conchalí, Cuccao, El Culebrón, Tongoy, Huasco, Huentelauquén, La Boca (los Choros), Limarí, Mantagua, Merquinche, Pachingo, Pucotrihue, Punta Teatinos, Quilimarí, Salinas Chica, Salinas Grande, Salinas de Copiapó (Norte y Sur), San Alfonso, Vegas de Coliumo y Vegas del Itata.

<sup>4</sup> <https://cambioglobal.uc.cl/>

<sup>5</sup> <http://cigiden.cl/en/>

<sup>6</sup> <https://costar.uv.cl/>

Figura 2: Organigrama del equipo de trabajo e instituciones desarrolladoras.



## 1.5 AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todas las instituciones que proporcionaron información en forma desinteresada o mediante la Ley de Transparencia y, en particular a aquellas personas en dichas instituciones que levantaron la información utilizada en este estudio. En particular, a las diferentes unidades del Ministerio del Medio Ambiente, a la Dirección de Obras Portuarias y a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, al Ministerio de Bienes Nacionales y al Ministerio de Vivienda y Urbanismo, a la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas del Ministerio de Defensa, a SUBPESCA, SERNAPESCA, ONEMI, DIRECTEMAR, SHOA, IGM, Servicio Sismológico de la Universidad de Chile, SISS, INE, SERNATUR, Subsecretaría de Transporte (MTT). Finalmente, queremos agradecer a Gladys Santis, Maritza Jadrijevic, Nico Kohlhas y Priscila Ulloa, quienes ofician de contraparte técnica del proyecto.

## 1.6 GLOSARIO

En esta sección se presentan términos esenciales para comprender el texto. El glosario incluido en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014b) ofrece una definición mucho más detallada de términos que pueden complementar a los incluidos en esta lista. Adicionalmente, en los 8 volúmenes se incluyen otros términos (e.g. marejadas, marea meteorológica, nivel del mar) que son definidos en el marco teórico correspondiente a cada tópico.

- **Adaptación:** Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos (IPCC, 2014).
- **Amenaza:** Es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.
- **AR:** Assessment Report (Informe de Evaluación). Son documentos elaborados por centenares de expertos del IPCC, que dan cuenta del estado del arte de la ciencia del cambio climático. Se han elaborado cinco AR desde el primero en 1990. El último fue publicado entre los años 2013 y 2014.
- **Cambio climático:** El IPCC (2014b) define al cambio climático como la variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo (decenios o períodos más largos). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La CMNUCC define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad atribuible a causas naturales.
- **CMNUCC:** La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ofrece una estructura para canalizar los esfuerzos intergubernamentales dirigidos a resolver el desafío del cambio climático.
- **Exposición:** La presencia de personas, medios de subsistencia, especies, ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura, activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2014).
- **IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Está compuesto por centenares de científicos y expertos que contribuyen de manera voluntaria, escribiendo informes para dar cuenta

del estado del arte de la ciencia del cambio climático y generando la mejor información técnica posible, para apoyar la toma de decisiones de los países.

- **Impactos:** Efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos,
- **Mitigación:** es una intervención humana que busca disminuir las fuentes (y/o las emisiones de las mismas) o mejorar los sumideros de Gases Efecto Invernadero (GEI).
- **Riesgo:** Consecuencias eventuales en situaciones en que algo de valor está en peligro y el desenlace es incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de ocurrencia de fenómenos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales fenómenos o tendencias.
- **RCPs:** Las Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways) son escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y la cubierta terrestre (IPCC, 2014b). Las RCPs, que hacen referencia a la parte de la trayectoria de concentración hasta el año 2100, son:
  - RCP2.6: Trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 [W/m<sup>2</sup>] antes de 2100 y posteriormente disminuye.
  - RCP4.5 y RCP6.0: Trayectorias intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 [W/m<sup>2</sup>] y 6.0 [W/m<sup>2</sup>] después de 2100.
  - RCP8.5: Trayectoria alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores mayores a 8.5 [W/m<sup>2</sup>] en 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo.
- **SRES:** Special Report on Emissions Scenarios (Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones), usados para el AR4. Estos escenarios hacen supuestos ("historias") respecto al crecimiento de la población global futura, el desarrollo tecnológico, la globalización y los valores sociales. El escenario A1 ('una familia global') asume un futuro de globalización y rápido crecimiento económico y tecnológico, con uso intensivo de combustibles fósiles (A1FI), no intensivo en combustibles fósiles (A1T) y versiones equilibradas (A1B). El escenario A2 ('un mundo dividido') asume un mayor énfasis en las identidades nacionales. Los escenarios B1 y B2 asumen prácticas más sostenibles ('utopía'), con un enfoque más global y regional, respectivamente.
- **Vulnerabilidad:** Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014b).

## 2 MARCO DE REFERENCIA

En este informe se analiza el riesgo de erosión de las playas debido a los cambios en los eventos extremos de oleaje (marejadas) del borde costero continental e insular de Chile. Para estos efectos, el estudio se divide en un análisis histórico de la posición de la línea de costa para 36 playas y una proyección de la respuesta de playas. Las playas se ubican en las regiones de Antofagasta (1), Coquimbo (3), Valparaíso (23), O'Higgins (1) y Biobío (8).

Además de ser fundamentales para el turismo, las playas juegan un rol clave en la defensa de las costas. Por estar constituidas por arena, estas tienen la capacidad de adaptar su forma a las condiciones medias del verano, caracterizadas por un oleaje de baja energía, y a los temporales del invierno. En palabras simples, las playas son el mecanismo más eficiente de protección costera ante los cambios en los patrones de oleaje y nivel del mar.

El cambio climático puede suponer una variación en la cota de inundación en una playa y un retroceso o avance de la línea de costa. A nivel mundial, Bird (2011) indica que cerca del 70% de las playas retrocedieron por efecto de la erosión entre 1976 y 1984, lo que se debe a factores climáticos como los cambios en los patrones de oleaje y nivel medio del mar, y a factores antropogénicos como la reducción en el aporte sedimentario de las cuencas por efecto de la explotación de arenas y la urbanización, o los efectos de obras de infraestructura costera. Como orden de magnitud y mediante la regla de Bruun (1988), se puede estimar un retroceso de 1 metro en la línea de costa por cada centímetro de ascenso del nivel medio del mar para playas típicas de pendiente en torno a 0,01. Esta regla, no obstante, puede ser excesivamente simplificada para casos particulares. Otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía. Dicho retroceso es altamente dependiente del tipo de playa, así como de la propagación que el oleaje sufra desde profundidades indefinidas hasta la playa.

En los últimos años, la erosión costera se ha agravado en el mundo debido a la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos tales como tifones, huracanes, ciclones tropicales y tormentas los cuales se han asociado a la variabilidad climática y al cambio ambiental global (Zhang y Sheng, 2015; Yáñez-Arancibia, 2013). Esto ha generado una gran preocupación mundial expresada en estudios sobre eventos extremos, vulnerabilidad costera, adaptación al cambio climático y medidas aplicables a la resiliencia de la costa (Mulder et al., 2011; Masselink et al., 2016). La magnitud de estos fenómenos puede causar cambios violentos en la costa, afectar vidas y destruir infraestructura costera valiosa, de ahí que sean considerados eventos extremos. Su impacto se incrementa también debido a procesos antrópicos, en especial debido a la urbanización generalizada de la zona costera (Barragán y De Andrés, 2015). En la costa catalana por ejemplo, el daño provocado a la infraestructura ha aumentado en un 40% en los últimos 50 años, debido tanto a la erosión costera como al crecimiento urbano explosivo (Jiménez et al., 2012). Tanto en la costa Atlántica como Pacífica, la erosión ha sido mucho mayor en aquellos lugares afectados por oleajes anormales o marejadas, que han generado un aumento transitorio del nivel del mar y respuestas complejas en la costa (Masselink et al., 2016). Estos fenómenos se relacionan con forzantes atmosféricos (e.g. marea meteorológica o meteotsunamis) para distintas escalas espaciales en interacción con el océano, afectando el nivel medio del mar en



el corto plazo (Del Río et al., 2012). La topografía submarina y las características geomorfológicas de la costa, inducen también efectos diferenciados y condicionan el potencial de daño (Jiménez et al., 2012).

Como en muchas materias relacionadas con el litoral, no obstante, el panorama en Chile no es claro, salvo excepciones. En Valparaíso, por ejemplo, se sabe de la desaparición de las playas urbanas de Miramar y Recreo por efecto de la construcción de las Avenidas Marina y España, respectivamente. En playa Torpederas es notable el cambio de paisaje de hace 15 años debido a la urbanización en las quebradas que la alimentan. Algunos estudios establecieron ya una tendencia erosiva a partir de 2008 en algunas playas de ensenada en Chile central (Martínez, 2008; Martínez y Salinas, 2009; Martínez et al., 2011). Sin embargo, los cambios en las playas fueron evidentes a partir de las marejadas de agosto de 2015, las cuales afectaron la morfología y la infraestructura de gran parte de la costa del país.

Además de las marejadas, otro factor que puede cambiar drásticamente la morfología de las playas es el alzamiento o subsidencia provocados por los terremotos de subducción. Este factor recientemente comienza a investigarse en Chile y debe considerarse a futuro en su interrelación con el cambio climático, ya que sus efectos combinados podrían generar severas repercusiones en la dinámica de las playas y sus ecosistemas. Un ejemplo de esta interacción corresponde a la playa de Lebu, en la Región del Biobío, la cual hasta antes de 2010 había sido intervenida con la construcción de una costanera en la anteduna, lo cual detonó una severa erosión de la playa durante 2 años (Figura 3). Con el alzamiento costero de 1,8 [m] provocado por el terremoto del 27 de Febrero de 2010, la playa se incrementó en 150 [m], con lo cual la playa fue recuperada y ensanchada (Martínez et al., 2015). Sin embargo, la acreción ocasionada por el terremoto se ha revertido debido a la mayor frecuencia de marejadas, ingresando la playa a estado erosivo, lo cual da cuenta de la fragilidad de estos sistemas a sus factores de cambio tanto naturales como antrópicos, así como de la necesidad de comprender su dinámica para proyectar los usos y conservar la función de mitigación a las amenazas naturales.

Las playas urbanas de Valparaíso y Viña del Mar también se han visto afectadas severamente a partir de las marejadas de 2015 (Agredano et al., 2015; Campos-Caba, 2016; Campos-Caba et al., 2016, Winckler et al., 2017a,b). El trabajo de Martínez et al. (2018) recoge estos efectos y analiza si la erosión costera constituye una nueva amenaza, estableciendo una correspondencia incipiente con fases cálidas ENOS. En la Figura 4, se muestran algunas de estas playas urbanas afectadas durante unos de los principales eventos de marejadas en junio de 2017. Los resultados de ese estudio enfatizan la necesidad de profundizar en las causas que están provocando la erosión costera en la costa chilena.

Figura 3: a) Costanera construida sobre antedunas en playa de Lebu, Región del Biobío, y destruida por un frente de mal tiempo (no extremo), con un costo millonario. La fotografía fue tomada el 5 junio 2008. b) Playa de Lebu ensanchada debido al alzamiento costero de 1,8 [m] provocado por el terremoto del 27 de febrero de 2010. La fotografía fue tomada en julio 2012.



Si bien la pérdida de estas playas no es directamente atribuible al cambio climático, es claro que las medidas de adaptación deben considerar, como complemento a la comprensión física del medio, la planificación costera de infraestructura. Los escasos estudios sobre morfodinámica de playas aumentaron considerablemente luego del terremoto y tsunami del 2010, incorporando técnicas de modelación, monitoreo mediante sistemas de video y registros de campo. Por otra parte, las escasas campañas de monitoreo de playas se han hecho más sistemáticas luego del temporal del 8 de agosto de 2015, que causó pérdidas cuantiosas de arenas en las playas de Quintero y Valparaíso (Martínez et al, 2018; Winckler et al., 2017).

Con todo, el conocimiento de los efectos del cambio climático sobre la morfología costera es aún incipiente y uno de los desafíos a abordar de manera sistemática. En este estudio intentamos aportar a la comprensión más acabada del fenómeno.

Figura 4: Playas urbanas de Valparaíso y Viña del Mar afectadas por las marejadas del 26 de junio de 2017. a) Playa Reñaca, donde las olas socavaron cimientos de locales comerciales. b) Playa Las Salinas, siendo tercera vez que las marejadas causan graves daños en balneario. c) Playa Portales, donde se generó un escarpe de 2,5 [m] en la playa y locales comerciales fueron dañados por el impacto de las olas.



### 3 VULNERABILIDAD DE EROSIÓN EN PLAYAS

En esta sección se analiza la evolución histórica de la línea de litoral para 35 playas.

#### 3.1 METODOLOGÍA

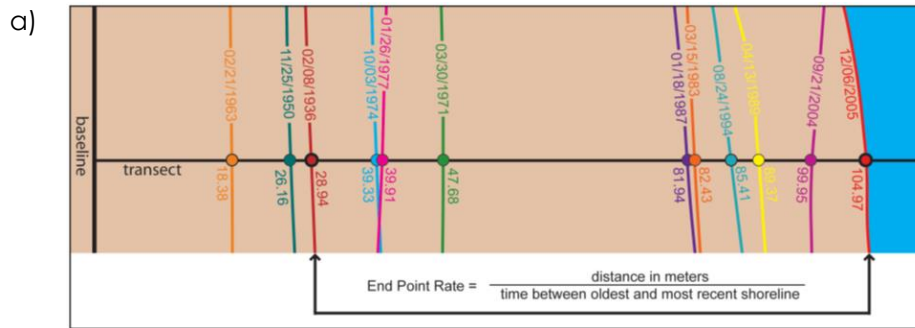
Se determinaron los cambios en la posición de la línea litoral por medio del software “Digital Shoreline Analysis System” (DSAS) versión 4.3 del U.S. Geologic Survey (USGS), el cual es compatible con ArcGis 10 (Thieler et al., 2009). Este software se aplica a las líneas litorales obtenidas a partir de levantamientos topográficos en terreno, fotografías aéreas e imágenes satelitales. La herramienta genera transectos perpendiculares a las líneas litorales, con espaciamientos predefinidos por el usuario, y luego calcula las tasas de variación, que se reportan en una tabla de atributos. La tasa de acreción, retroceso o estabilidad en metros/año (m/a) se determina mediante los métodos:

- **EPR** End Point Rate
- **LRR** Linear Regression Rate

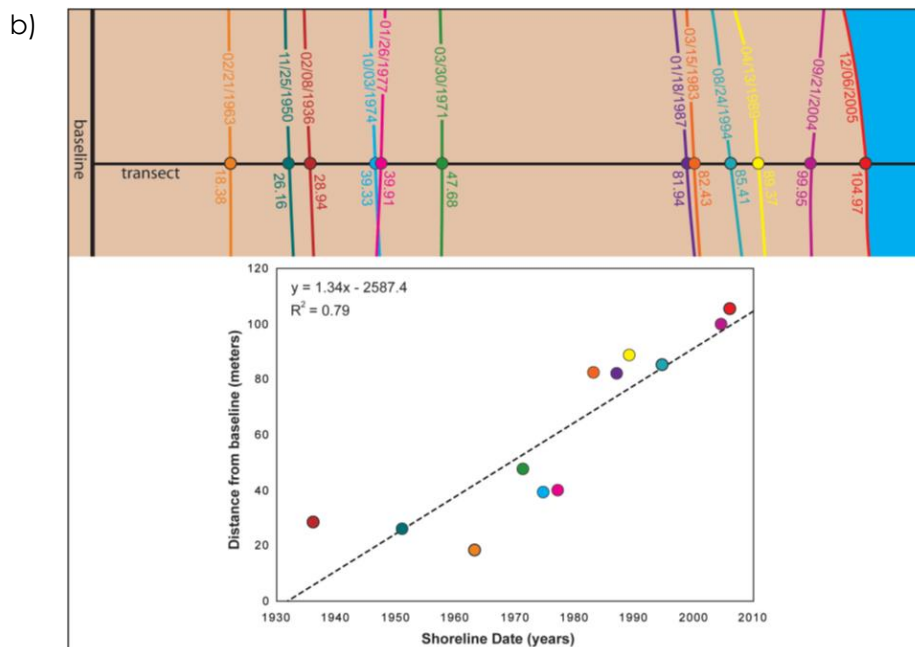
Ambos procedimientos se ilustran en la Figura 5. El **EPR** calcula la tasa de cambio de regresión lineal comparando las líneas litorales inicial y final para cada transecto, divididas por el número de años de la serie histórica. El método no permite utilizar las fotografías satelitales disponibles entre la primera y la última, pero es muy simple de emplear. El **LRR** calcula la tasa de cambio de regresión lineal ajustando una línea de regresión de mínimos cuadrados a todos los puntos de la línea litoral para cada transecto. El ajuste de mínimos cuadrados minimiza la suma de los residuos al cuadrado, evitando la compensación de valores por defecto y por exceso. La tasa de regresión lineal es la pendiente de la línea. El método de regresión lineal permite utilizar todas las fotografías satelitales disponibles, se basa en un concepto estadístico convencional y es fácil de emplear (Dolan et al., 1991). Existe otro método más sofisticado, denominado Weighted Linear Regression (**WLR**), que permite asignar pesos a cada medición dependiendo de cuán confiable es. En este caso sólo se cuenta con las fotografías aéreas y satelitales, algunas de las cuales no cuentan con datos exactos de fecha, hora de vuelo o del sistema de captura fotográfica que permita estimar la confiabilidad de la medición. Por ende, este método no se utiliza.

Para la delimitación de la línea litoral se aplicó un criterio geomorfológico que considera la determinación de la línea de máxima pleamar visible en la fotografía aérea. Este límite generalmente coincide con el inicio de la duna bordera donde la playa trasera es estabilizada. Este criterio permite trabajar con los efectos morfológicos que ocurren en la playa y que se relacionan con la mayor energía que esta tiene respecto de sus procesos litorales, el cual incluye el oleaje de tormentas.

Figura 5: Estimación del cambio en la línea de costa mediante los métodos a) EPR: End Point Rate y b) LRR: Linear Regression Rate. Adaptado de Thieler et al. (2009).



In the example above, the end point rate of 1.09 meters per year is the distance between the 2005 and 1936 shorelines (76.03 meters) divided by the span of time elapsed between the two shoreline positions (69.82 years). All other shoreline data are ignored in this computation.



In the example above, the linear regression rate was determined by plotting the shoreline positions with respect to time and calculating the linear regression equation of  $y = 1.34x - 2587.4$ . The slope of the equation describing the line is the rate (1.34 m/yr).

Para efectos ilustrativos, se analiza la playa de Lebu mediante el uso de los estadísticos EPR y LRR (Figura 6). Los años considerados corresponden a 1962, 1984, 1993, 2009, 2013 y 2017. Debido a la cantidad de líneas litorales disponibles, fue posible realizar el cálculo de LRR. Valores positivos del LIC determinan acreción y negativos erosión. Los resultados de tasa media al utilizar los estadísticos EPR y LRR presentan una diferencia de -30 cm en la tasa global y una distribución espacial similar. Ambos estadísticos establecen una condición de erosión.

Figura 6: Evolución de la línea de costa en Lebu para el período 1962-2017 considerando el método EPR (End Point Rate). Evolución de la línea de costa en Lebu para el período 1962-2017 considerando el método LRR (Linear regression Rate).

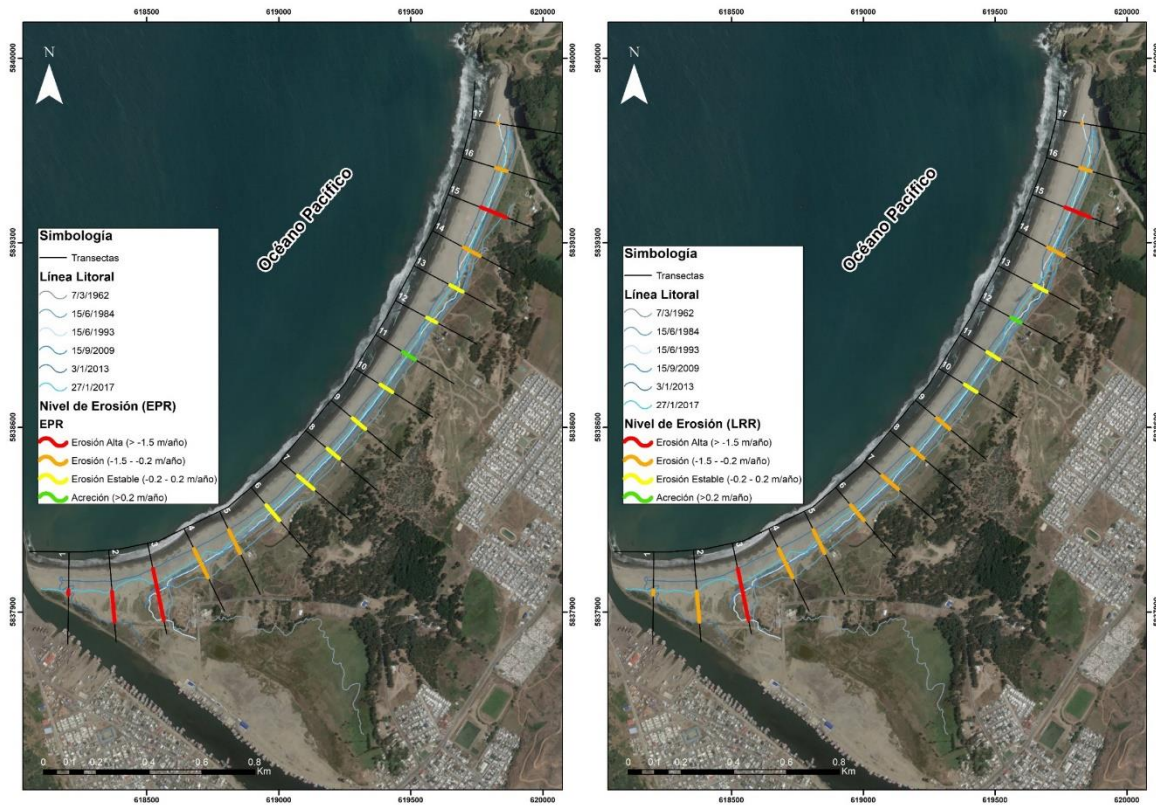


Figura 7: Playas a analizar en este estudio.

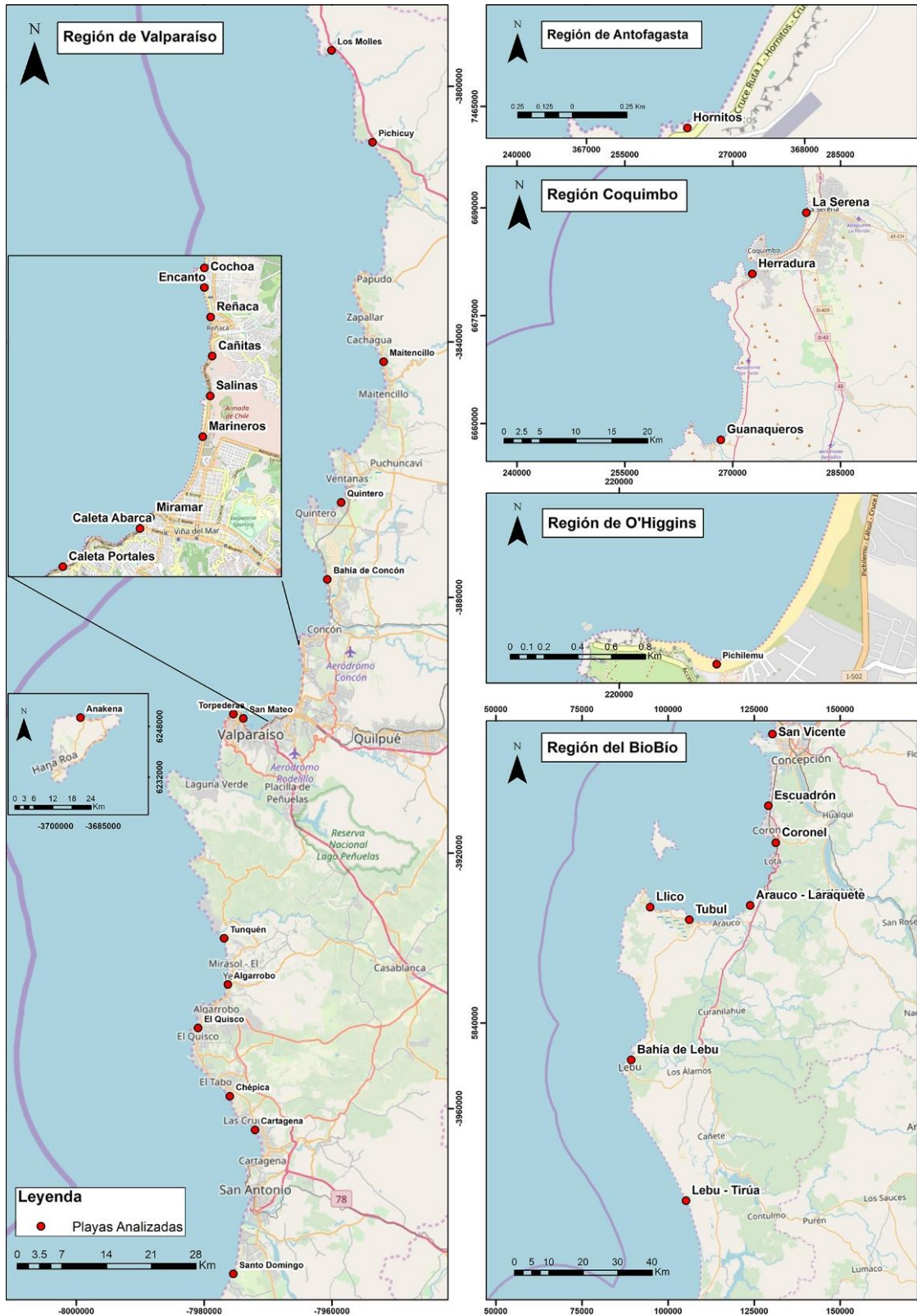


Tabla 1: Playas a analizar en este estudio.

	Playa	Latitud	Longitud	Región
1	Hornitos	22°55'01.25"	70°17'26.61"	Antofagasta
2	La Serena	29°57'37.30"	71°19'26.08"	Coquimbo
3	La Herradura	29°58'59.84"	71°21'20.07"	
4	Guanaqueros	30°11'23.62"	71°24'14.35"	
5	Los Molles	32°14'12.52"	71°30'29.15"	
6	Pichicuy	32°20'36.81"	71°27'06.81"	Valparaíso
7	Maitencillo	32°35'08.73"	71°26'50.95"	
8	Quintero	32°46'38.07"	71°29'48.64"	
9	Bahía de Concón	32°51'39.92"	71°30'47.25"	
10	Cochoa	32°57'20.72"	71°32'51.20"	
11	El Encanto	32°57'38.75"	71°32'51.79"	
12	Reñaca	32°58'02.53"	71°32'46.28"	
13	Las Cañitas	32°58'42.48"	71°32'44.88"	
14	Las Salinas	32°59'21.82"	71°32'48.55"	
15	Los Marineros	33°00'02.84"	71°32'58.56"	
16	Miramar	33°01'15.04"	71°33'58.05"	
17	Caleta Abarca	33°01'24.61"	71°34'09.38"	
18	Caleta Portales	33°01'56.21"	71°35'31.65"	
19	Las Torpederas	33°01'19.78"	71°38'39.19"	
20	Tunquén	33°17'07.82"	71°39'29.92"	
21	Algarrobo	33°21'18.98"	71°39'25.48"	
22	El Quisco	33°23'28.37"	71°41'38.27"	
23	Cartagena y El Tabo	33°31'15.38"	71°36'26.76"	
24	Las Cruces	33°28'21.87"	71°38'59.42"	
25	Santo Domingo a El Yali	33°41'26.18"	71°38'58.28"	
26	Anakena	27° 4'26.19"	109°19'22.79"	
27	Pichilemu (Pta. de Lobos)	34°25'33.55"	72° 2'15.09"W	O'Higgins
28	Escuadrón	36°57'03.92"	73°09'54.99"	Biobío
29	Bahía de San Vicente	36°45'22.34"	73°08'22.01"	
30	Bahía de Coronel	37°01'39.35"	73°09'02.03"	
31	Arauco - Laraquete	37°14'11.06"	73°18'34.36"	
32	Tubul	37°13'39.70"	73°26'18.41"	
33	Llico	37°11'42.16"	73°33'40.63"	
34	Bahía de Lebu	37°35'25.76"	73°38'51.86"	
35	Lebu - Tirúa	37°52'33.51"	73°32'26.50"	

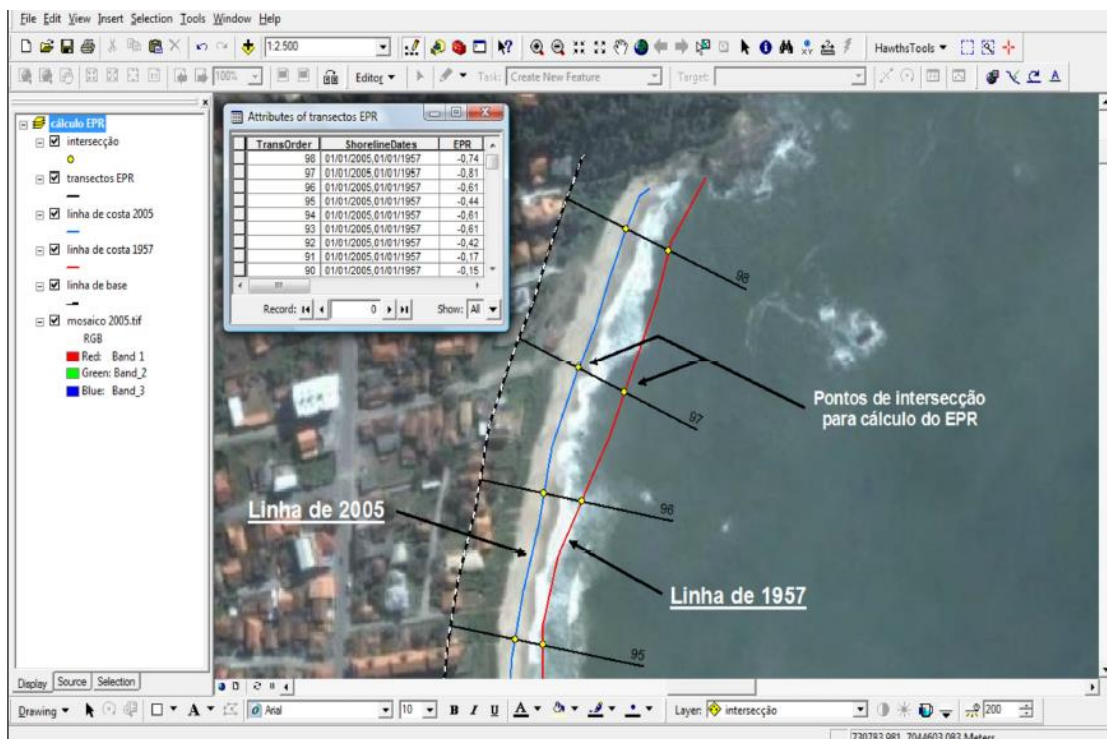


Según el manual (Thieler et al., 2009), para los cálculos con LRR se consideraron las incertidumbres de cada línea litoral que está asociada:

- a su fuente de obtención (levantamiento topográfico o fotografía aérea)
- a los errores inducidos por la escala de las fotografías aéreas o imágenes satelitales
- al proceso de georreferenciación, ortorectificación y digitalización de la línea litoral

Para ello fue necesario estimar estos errores. Para aquellas líneas provenientes de fotografías aéreas e imágenes satelitales y que requirieron de georreferenciación, se consideró el criterio de Representatividad del píxel y de Error Medio Cuadrático (RMS), de acuerdo con los criterios de Araujo et al., (2009). De esta forma, se aseguran resultados con errores inferiores a 1 m.

**Figura 8: Estimación del cambio en la línea litoral mediante End Point Rate (EPR). Los puntos amarillos representan las intersecciones entre las líneas litorales de 1957 (roja) y 2005 (azul). La distancia total (m) entre las líneas, dividida por el intervalo de tiempo (años) corresponde a la tasa de variación (m/año). Tomado de Araujo et al., (2009).**



En el caso de errores superiores a 1 m, fue necesario generar puntos de control en terreno mediante uso de GPS doble frecuencia. Las variables utilizadas para este ejercicio fueron:

- **Escala:** en función de la fuente de línea litoral (fotografía aérea, imagen satelital o levantamiento topográfico en terreno). En el caso de las fotografías aéreas, solo las escalas de hasta 1:60.000 son adecuadas para este tipo de estudios. De este modo, las

líneas litorales obtenidas de levantamientos topográficos son mucho más precisos que aquellas obtenidas de fotografías aéreas de vuelos altos. De igual forma, a mayor escala del fotograma, los errores son más bajos.

- **Uso de puntos de control mediante GPS geodésico:** se utilizan estos puntos cuando los RMS son superiores a 1 m y cuando solo se cuentan con líneas litorales extraídas de imágenes Google Earth, las cuales tienen errores de ~4 m. Estos errores se reducen a valores sub-métricos cuando se incorporan puntos de control obtenidos mediante GPS doble frecuencia con vinculación geodésica a vértices conocidos.
- **RMS del proceso de rectificación:** El error medio cuadrático (RMS) corresponde a la suma de las diferencias entre las posiciones de la fotografía y la base cartográfica elevada al cuadrado, calculado por el SIG. Este error luego debe multiplicarse por una constante tabulada (1.7308), con el fin de obtener un nivel de confianza del 95% en relación con la posición real de los puntos en la base cartográfica. Este error corregido se denomina EQMc. Esto significa que el 95% de la imagen rectificadora tiene una exactitud igual o mayor que el EQMc, además de reflejar las incertidumbres asociadas al proceso fotogramétrico (Araujo et al., 2009).

A todas estas variables se les otorgó un peso en función de su procedencia. Luego fueron ponderadas para calcular la incertidumbre para cada una de las líneas. Una vez obtenido el nivel de incertidumbre, es posible obtener otros estadísticos como WLR, WSE y LSE.

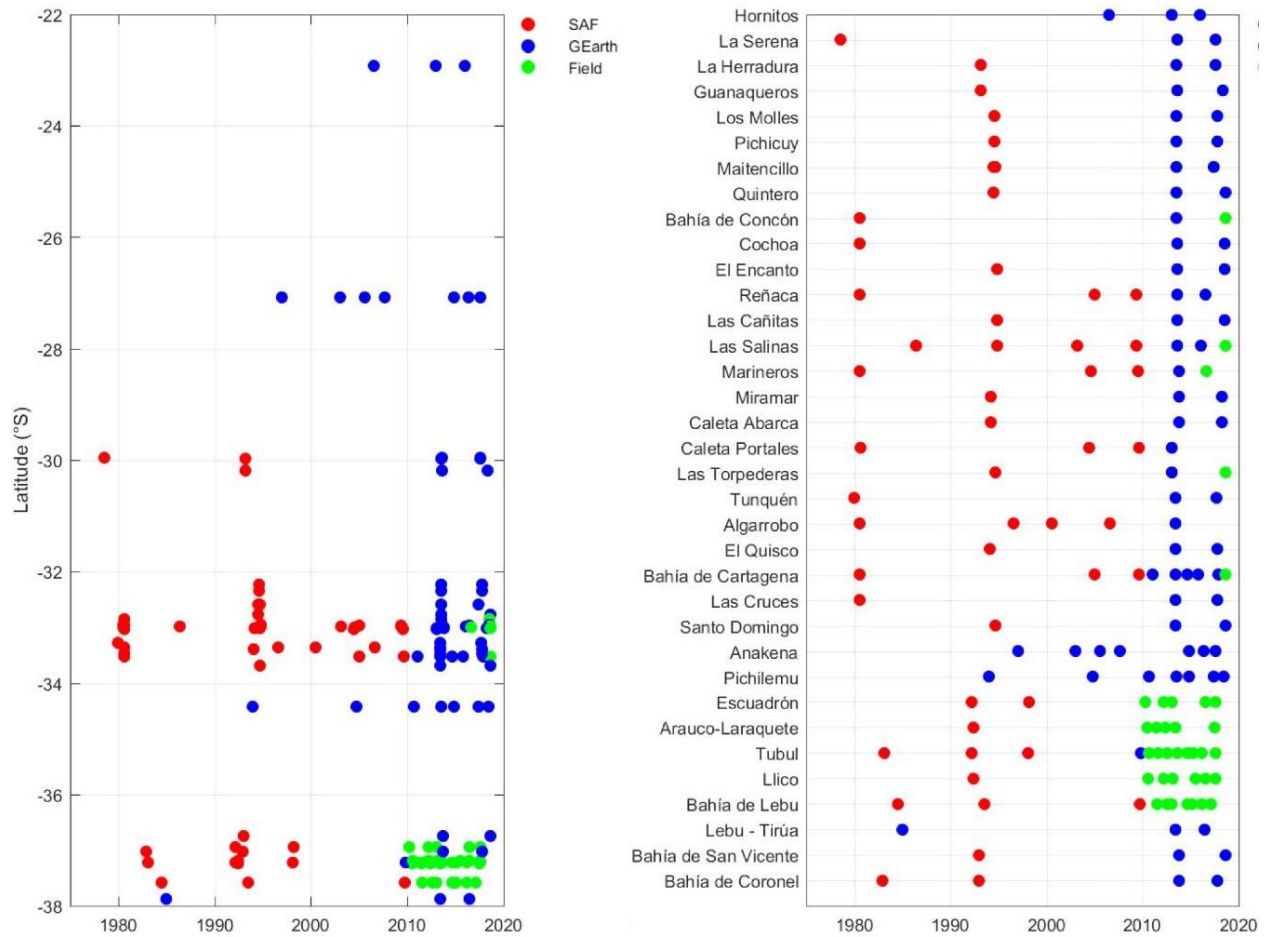
## 3.2 RESULTADOS A NIVEL GLOBAL

De acuerdo al manual DSAS (p.57; Thieler et al., 2009) a partir del cálculo del LRR se obtiene el LIC (standard Error of the slope with confidence interval) con la tendencia para los años analizados. Estos valores pueden ser reclasificados para obtener una escala de erosión, con la cual se elabora la carta de erosión costera en m/año. La tasa de erosión (m/año) se clasifica de acuerdo a las 4 categorías de Rangel et al. (2016).

- > -1.5 m/año : Erosión alta
- -0.2 y -1.5 m/año : Erosión
- -0.2 y +0.2 m/año : Estado estable
- > +0.2 m/año : Acreción

En este estudio se utiliza el método Linear Regression Rate (LRR) para calcular la tasa de erosión de la línea litoral. Dado que el cálculo de la erosión se realizó sobre la base de fotografías aéreas históricas disponibles, los períodos de análisis difieren (Tabla 2), siendo el período más largo 1978-2017 (La Serena) y los más recientes 2013-2016 (Lebu-Tirúa) y 2003-2016 (Hornitos), las cuales se analizaron solo mediante imágenes Google Earth Pro. Aun así, se destaca que para 31 playas se contó con fotografías aéreas históricas (Figura 9), las cuales se complementaron con levantamientos topográficos de detalle e imágenes satelitales Google Earth Pro, lo que permitió construir una importante base de datos para analizar el comportamiento histórico de la línea litoral.

Figura 9: Distribución espacio-temporal de levantamientos topográficos en terreno, fotografías aéreas e imágenes satelitales utilizadas en el análisis de evolución de línea litoral.



De acuerdo a los resultados de la Tabla 2, Tabla 3 y Figura 10, un total de 28 de las 35 playas analizadas presentan erosión y erosión alta, lo cual corresponde al 80% del total. Las playas con erosión alta corresponden a Hornitos (Región de Antofagasta), Algarrobo y Santo Domingo (Región de Valparaíso). Se destaca que las playas con las mayores tasas de erosión corresponden a playas de ensenada donde se desarrollan extensos litorales arenosos, asociados a antiguos campos dunares y humedales costeros (Hornitos, Algarrobo, Santo Domingo, Pichilemu, Arauco-Laraquete, Bahía de Lebu y Lebu-Tirúa).

**Tabla 2: Tasa media de erosión (m/año) según periodo para playas de Chile.**

Nº	Playa	Periodo (años)	Nº años	Tasa de cambio (m/año)*	Categoría
1	Hornitos	2003 - 2016	13	-2.60	Erosión alta
2	La Serena	1978 - 2017	39	-0.30	Erosión
3	La Herradura	1993 - 2017	24	-0.45	Erosión
4	Guanaqueros	1993 - 2018	25	-0.30	Erosión
5	Los Molles	1994 - 2017	23	-0.24	Erosión
6	Pichicuy	1994 - 2017	23	-0.67	Erosión
7	Maitencillo	1980 - 2017	37	-0.57	Erosión
8	Quintero	1994 - 2018	24	-0.40	Erosión
9	Bahía de Concón	1980 - 2018	38	-0.75	Erosión
10	Cochoa	1980 - 2018	38	0.04	Estado estable
11	El Encanto	1994 - 2018	24	0.21	Acreción
12	Reñaca	1980 - 2016	36	-0.31	Erosión
13	Las Cañitas	1994 - 2018	24	0.07	Estado estable
14	Las Salinas	1986 - 2018	32	-0.34	Erosión
15	Los Marineros	1980 - 2016	36	-0.05	Estado estable
16	Miramar	1994 - 2018	24	-0.37	Erosión
17	Caleta Abarca	1994 - 2018	24	-0.46	Erosión
18	Caleta Portales	1980 - 2016	36	-0.09	Estado estable
19	Las Torpederas	1994 - 2018	24	-0.83	Erosión
20	Tunquén	1980 - 2017	37	-0.56	Erosión
21	Algarrobo	1980 - 2017	37	-2.54	Erosión alta
22	El Quisco	1994 - 2017	23	-0.36	Erosión
23	Bahía de Cartagena	1980 - 2018	38	-0.61	Erosión
24	Las Cruces	1980 - 2017	37	-0.65	Erosión
25	Santo Domingo	1992 - 2018	26	-1.73	Erosión alta
26	Anakena (Rapa Nui)	1996 - 2017	21	-0.51	Erosión
27	Pichilemu	1994 - 2018	24	-1.30	Erosión
28	Escuadrón	1992 - 2017	25	-0.32	Erosión
29	Bahía de San Vicente	1992 - 2018	26	-0.22	Erosión
30	Bahía de Coronel	1982 - 2017	35	-0.49	Erosión
31	Arauco - Laraquete	1992 - 2017	25	-1.11	Erosión
32	Tubul	1983 - 2017	34	0.51	Acreción
33	Llico	1992 - 2017	25	0.85	Acreción
34	Bahía de Lebu	1984 - 2017	33	-1.22	Erosión
35	Lebu - Tirúa	2013 - 2016	3	-1.39	Erosión

\* Tasa media calculada mediante el método Linear Regression Rate (LRR)-DSAS (USGS).

**Tabla 3: Categorías de erosión/acreción para playas de Chile**

<b>Categoría</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje %</b>
Erosión alta	3	8.57
Erosión	25	71.43
Estado estable	4	11.43
Acreción	3	8.57
Total	35	100.00

Con estado estable se categorizaron 4 playas (11,43% del total) y con acreción solo 3 playas (8,57% del total). Las playas con estado estable son Cochoa, Las Cañitas, Los Marineros y Caleta Portales, todas playas urbanas localizadas en Viña del Mar y Valparaíso. A excepción de Los Marineros, todas corresponden a playas de bolsillo o playas encajadas, cuyo abastecimiento sedimentario depende de aportes locales.

Las playas en estado de acreción son El Encanto (Viña del Mar), Tubul y Llico (Región del Biobío). Estas dos últimas playas experimentaron alzamientos costeros de gran magnitud (1,4 m) durante el terremoto del 27 de febrero de 2010, lo cual se reflejó en un aumento del ancho de la playa que puede explicar la acreción como fenómeno local.

La distribución espacial de los cambios asociados a la línea litoral se presenta en la Figura 11 (Región de Coquimbo) Figura 12 (Región de Valparaíso) Figura 13 (Región de Biobío). Las zonas con erosión alta se localizan únicamente en playas de la Región de Valparaíso y del Biobío, presentando extensas áreas erosivas especialmente en las playas de ensenada mencionadas previamente. Las playas de Hornitos, Anakena (Rapa Nui) y Pichilemu no se incluyen en dichas figuras pero se analizan en la siguiente sección.

Figura 10: Estado de erosión, estabilidad o acreción para las playas analizadas

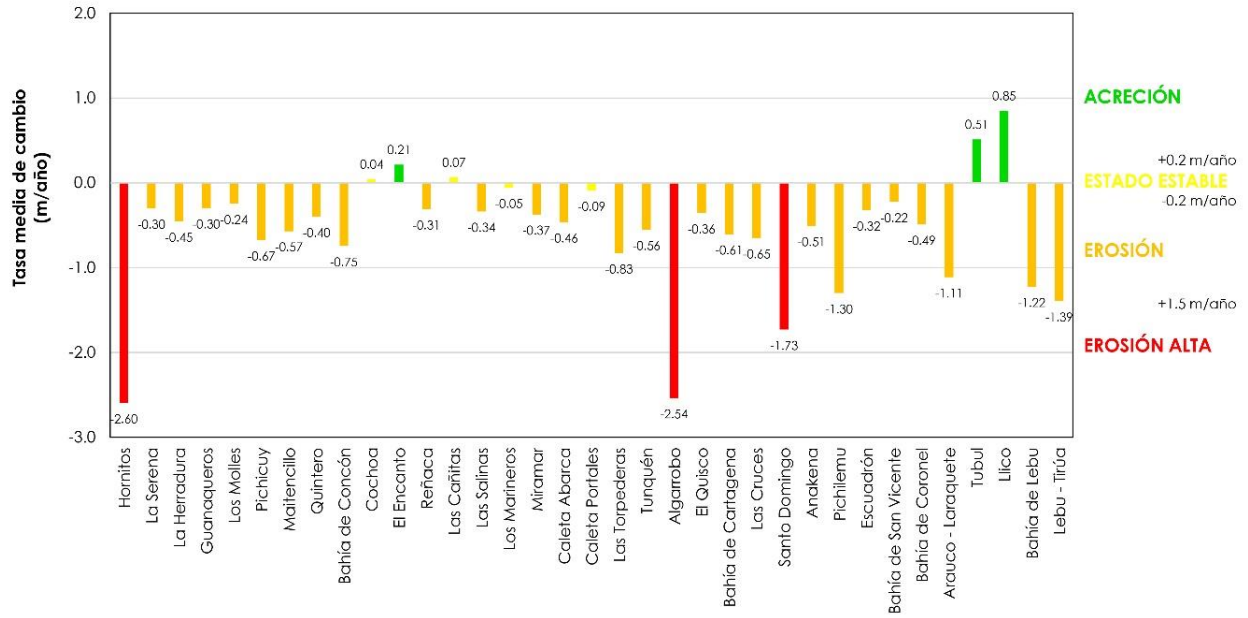


Figura 11: Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Coquimbo.



Figura 12: Cambios en la línea litoral para playas de la Región de Valparaíso y O'Higgins.

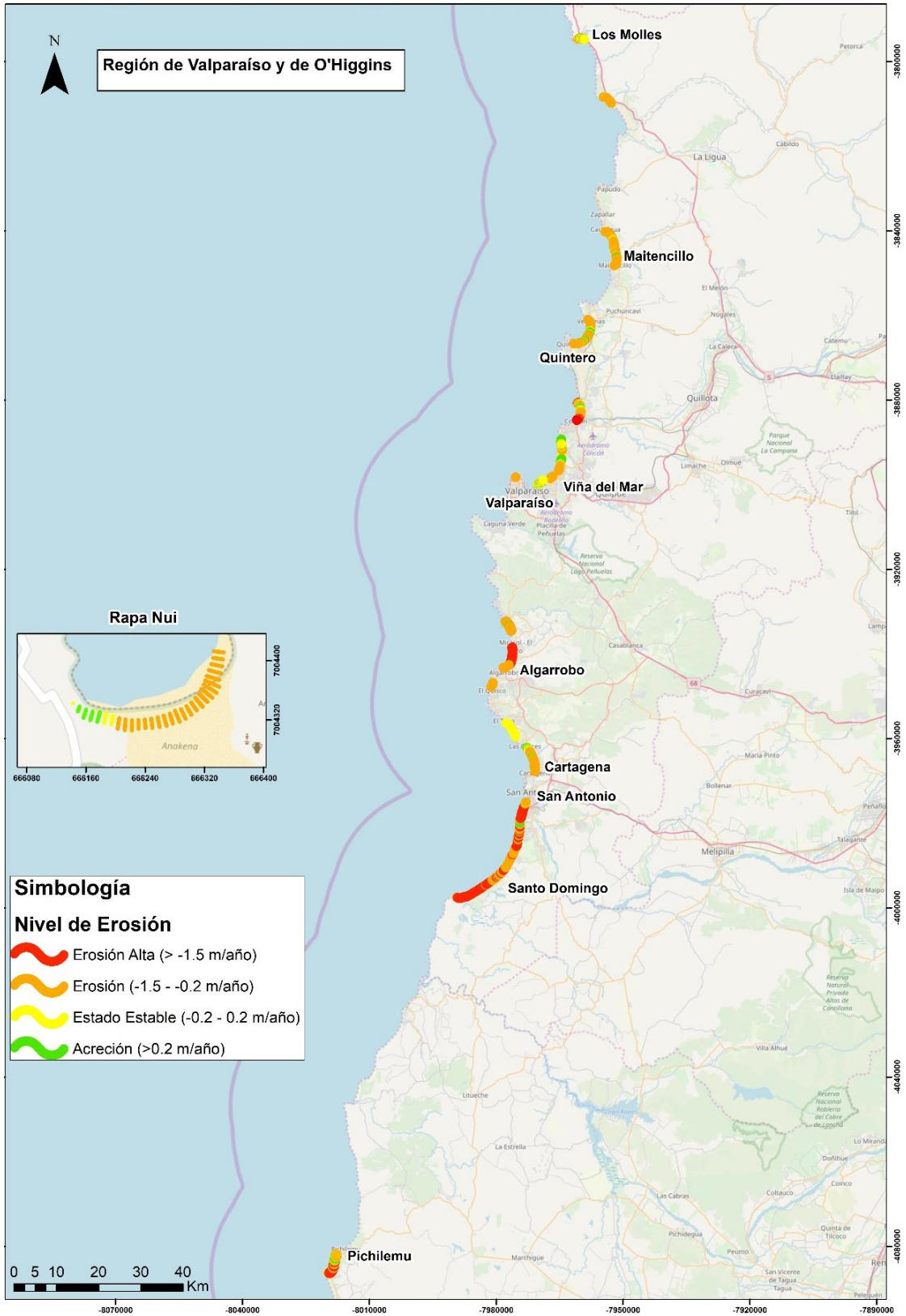
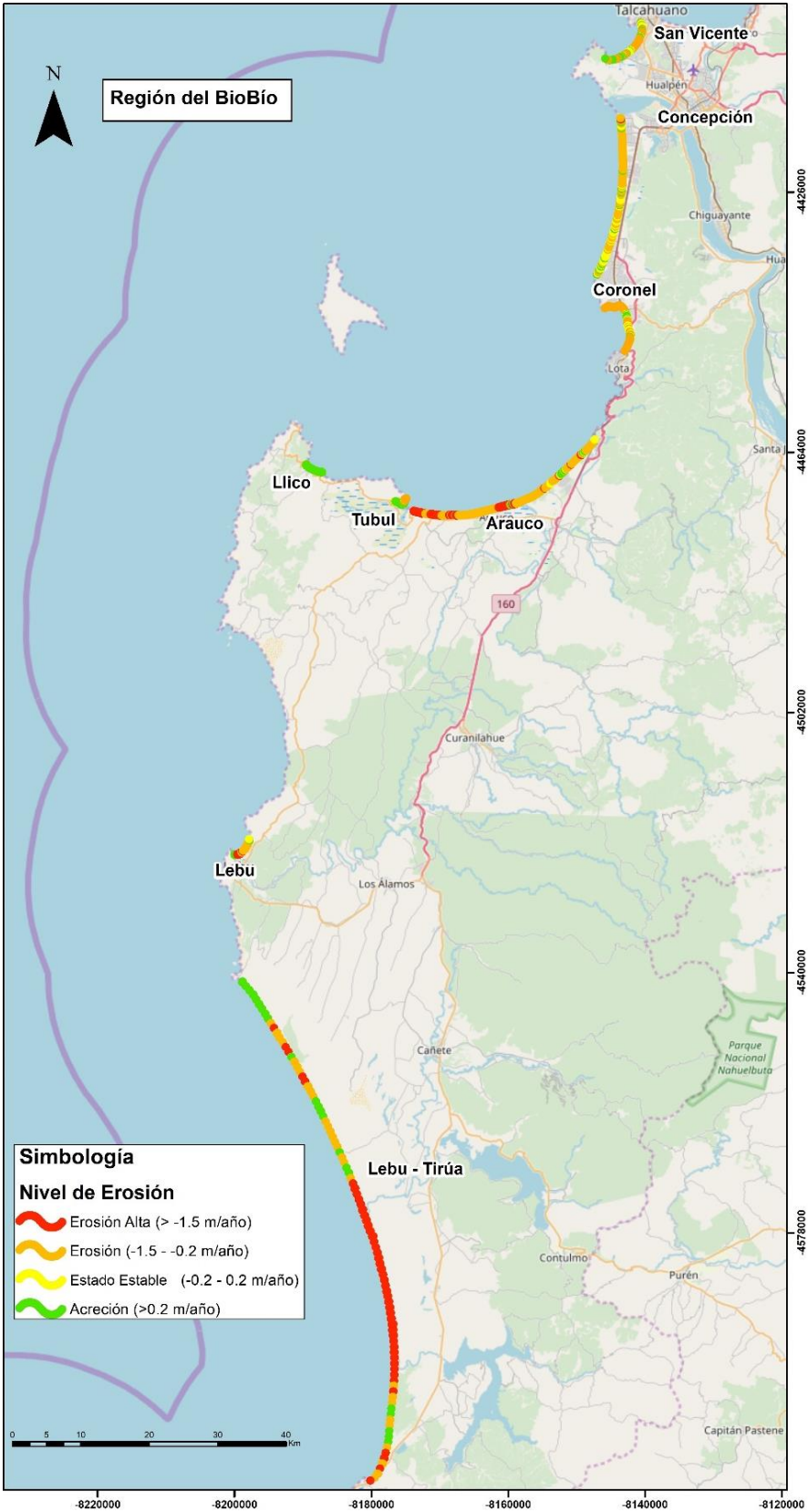




Figura 13: Cambios en la línea litoral para playas de la Región del Biobío.



### 3.3 CAMBIOS DE LA LÍNEA LITORAL SEGÚN REGIÓN

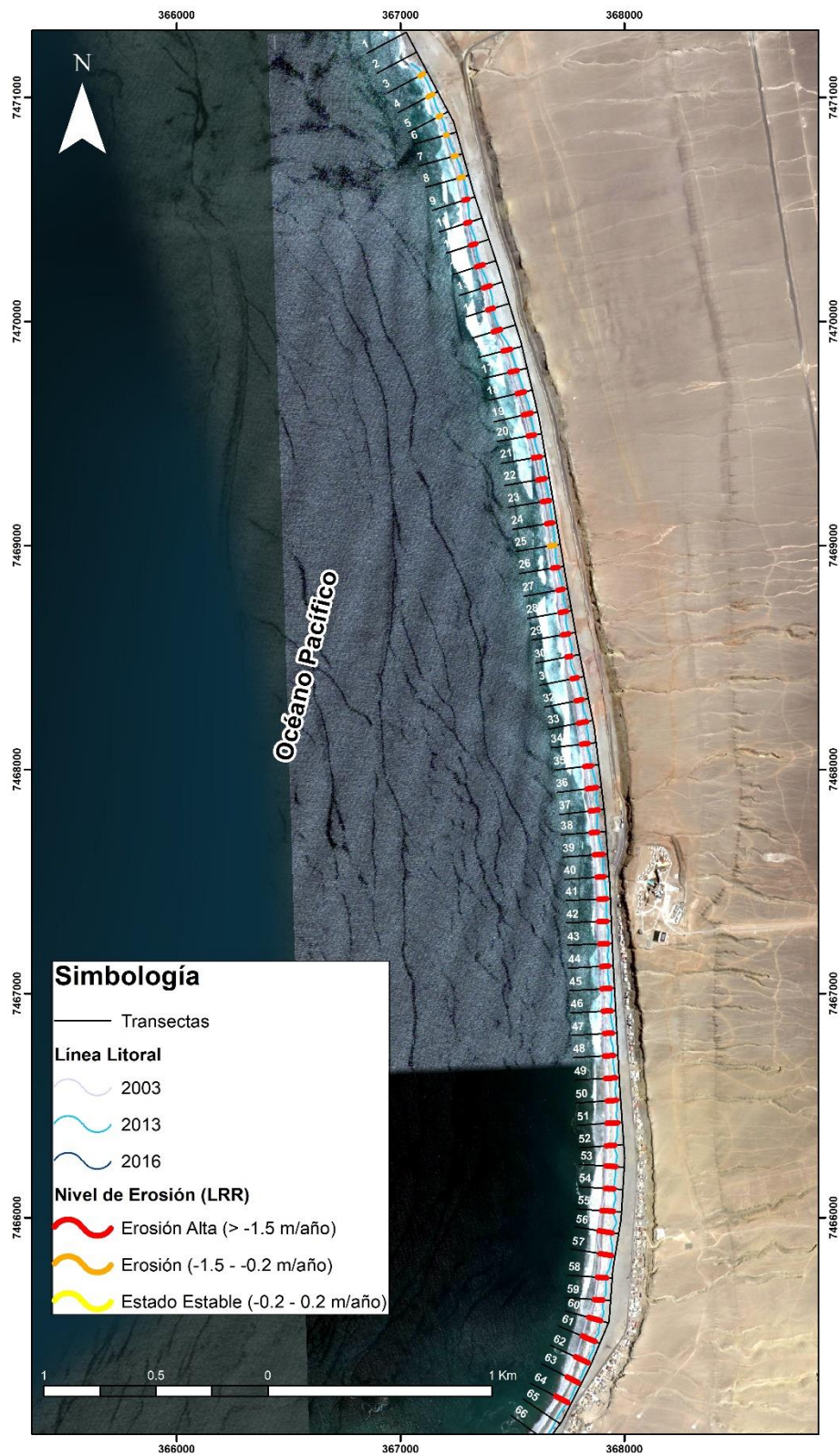
A continuación se muestran los cambios en la línea litoral para las cuatro regiones analizadas. Se presentan asimismo, imágenes históricas y presentes de las playas donde se obtuvieron registros fotográficos de larga data. Cabe notar que las imágenes de evolución de línea de costa están disponibles en el SIG (sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), que permiten hacer zoom.

#### 3.3.1 Región de Antofagasta: playa Hornitos

Esta playa es aproximadamente rectilínea y tiene una longitud de 6,4 km. Se conforma de arenas claras y su tipo de zona de rompiente es intermedia, por lo cual sus rasgos morfológicos pueden ser acentuados por la erosión costera, generándose por ejemplo bermas más altas y pendientes más empinadas. No presenta drenaje local por lo cual sus aportes sedimentarios provienen de zonas alejadas. Se trata de una playa rural, por lo cual la erosión costera se relaciona con factores naturales, más que con factores antrópicos.

En el periodo analizado (2003-2016), playa Hornitos registra una tasa de cambio de -2,60 m/año, clasificándose como "erosión alta" (Figura 14). Esta tasa es la más alta que se ha calculado en este serie de playas. Sin embargo, el cálculo abarca sólo 13 años (bastante menos que en las otras playas) y con ello existe la posibilidad de que los eventos extremos recientes (marejadas) hayan gatillando una erosión costera más grave pero no necesariamente ligada al cambio climático, que ocurre en escalas temporales más largas. La distribución espacial de los niveles de erosión alta ( $> -1,5$  m/año), ocupan la mayor parte de la playa y disminuyen levemente en el extremo norte, donde pasa a "erosión", es decir, un rango menor que fluctúa entre -0,2 y -1,5 m/año.

Figura 14: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Hornitos (2003-2016). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



### **3.3.2 Región de Coquimbo**

#### **Playa La Serena**

Los cambios espacio-temporales de la línea litoral para la playa La Serena fueron calculados para el periodo 1978-2017 (39 años). Se determinó una tasa de cambio de  $-0,30$  m/año, clasificándose como "erosión". De acuerdo a la Figura 15, el rango de erosión ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año) predomina a lo largo de la playa, donde se intercala con sectores con "erosión estable" ( $-0,2$  y  $+0,2$  m/año). Presenta una forma en planta de playa encajada, tiene  $18,8$  km de largo y tipo de zona de rompiente intermedia. Por tratarse de una playa urbana, es más sensible a incrementar los niveles de erosión encontrados.

#### **Playa La Herradura**

En playa La Herradura, se determinó una tasa de cambio de  $-0,45$  m/año para el periodo 1993-2017 (24 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 16, el rango de erosión predomina a lo largo de la playa, variando a "erosión estable" al sur de la bahía debido al efecto de protección generado por el muelle. Esta playa es encajada, tiene  $1,5$  km de largo, presenta una zona de rompiente reflectiva y no cuenta con drenaje local. Por tratarse de una playa urbana, es más sensible a incrementar los niveles de erosión encontrados.

#### **Playa Guanaqueros**

Considerando el período 1993-2018 (25 años), se determinó para playa Guanaqueros una tasa de cambio de  $-0,30$  m/año, clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 17, la erosión es el rango que predomina a lo largo de la playa. Esta playa es rectilínea, expuesta al norte, de  $5,9$  km de largo y tipo de zona de rompiente reflectiva. Es una playa urbana-periurbana sin drenaje local, por lo cual más sensible a la erosión.

Figura 15: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa La Serena (1978-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

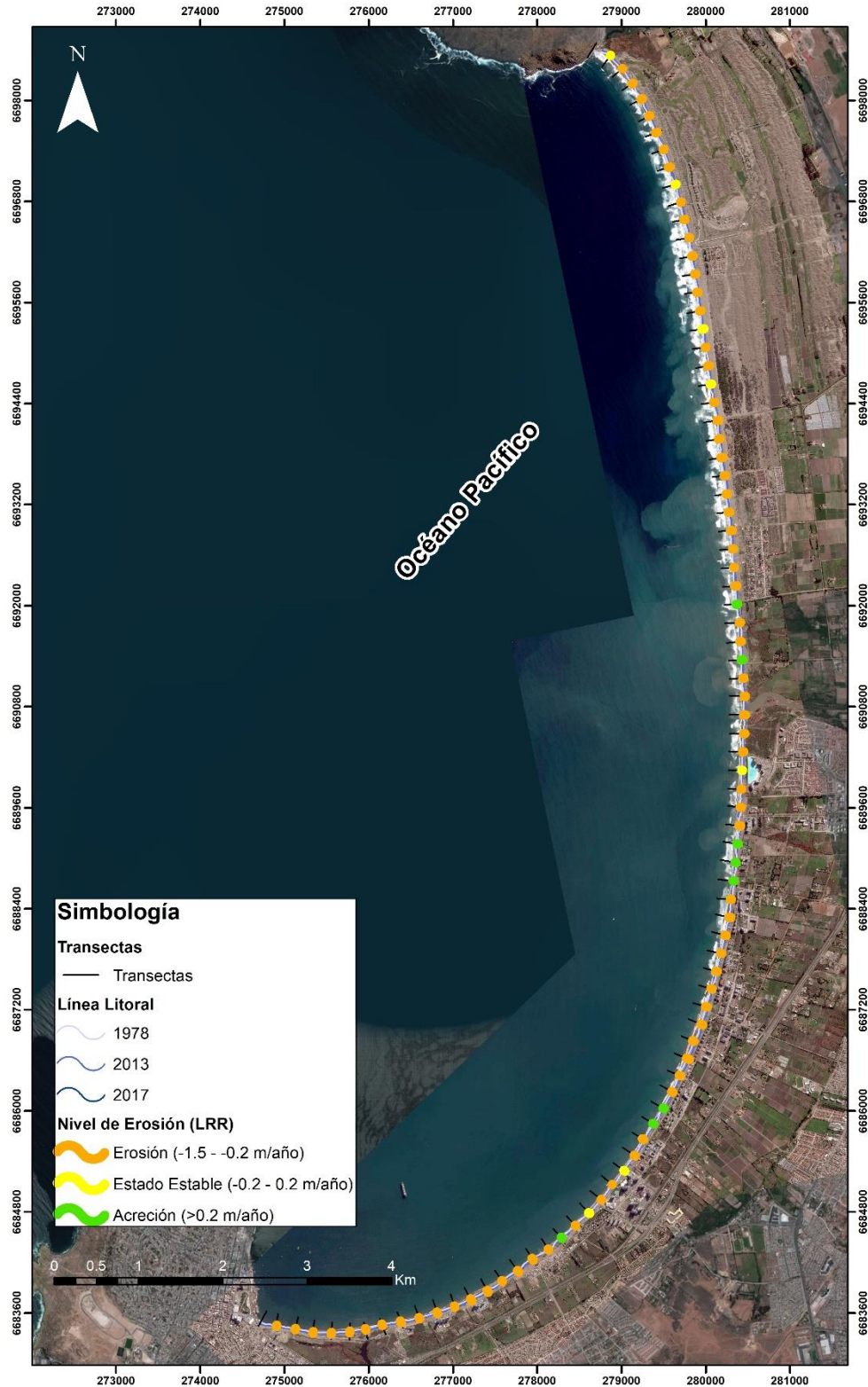
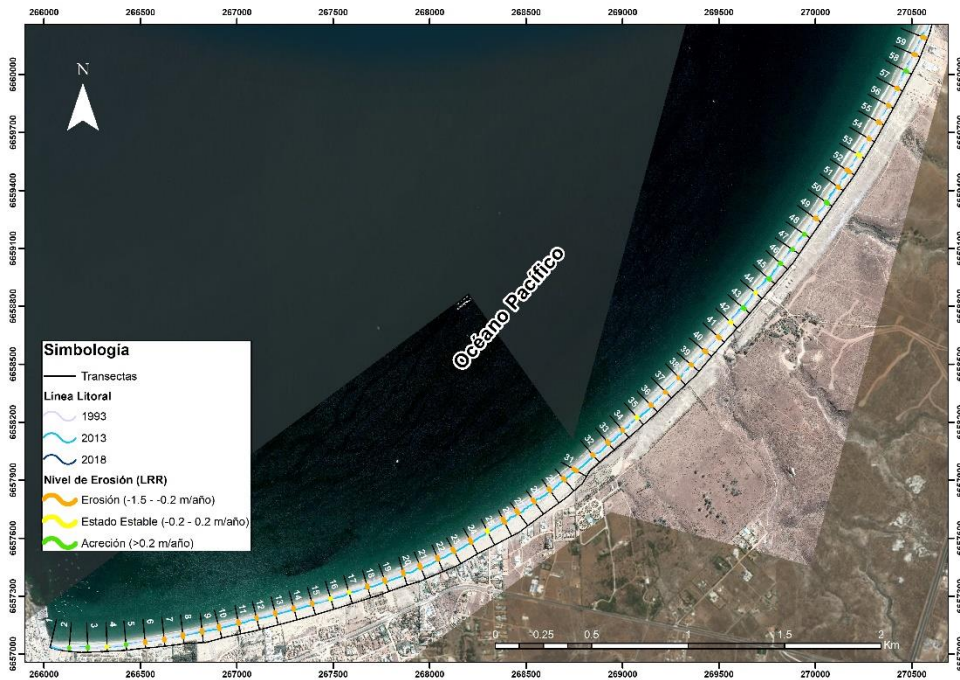


Figura 16: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa La Herradura (1993-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



Figura 17: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Guanaqueros (1993-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



### **3.3.3 Región de Valparaíso**

#### **Playa Los Molles**

En playa Los Molles se determinó una tasa de cambio de -0,24 m/año para el periodo 1994-2017 (23 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 27, los niveles de erosión disminuyen de W a E, donde se pasa a "estado estable" (-0.2 y +0.2 m/año). Los Molles es una playa encajada de forma elíptica, de 1,4 km de largo, con una zona de rompiente intermedia-disipativa, con drenaje local (estero) y desarrollo de antedunas vegetadas. Por tratarse de una playa periurbana, está expuesta al incremento de sus niveles de erosión. Aun así, la presencia de antedunas ayuda a la estabilización de la playa.

#### **Playa Pichicuy**

En playa Pichicuy se determinó una tasa de cambio de -0,67 m/año para el periodo 1994-2017 (23 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 28, el rango de erosión es el que predomina a lo largo de toda la playa. Pichicuy es una playa encajada de forma elíptica, de 2,1 km de largo, con una zona de rompiente intermedia-disipativa, con drenaje local (estero) y desarrollo de antedunas vegetadas. Como la anterior, también es una playa periurbana y por su eso, sensible al incremento de sus niveles de erosión.

#### **Playa Maitencillo**

En playa Maitencillo se determinó una tasa de cambio de -0,57 m/año para el periodo 1980-2017 (37 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 29, la erosión es el rango predominante a lo largo de la playa, los cuales presentan escasas alternancias de niveles más bajos de erosión y acreción.

#### **Bahía de Quintero**

En el litoral arenoso de la bahía de Quintero se determinó una tasa de cambio de -0,40 m/año para el periodo 1994-2018 (24 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 30, la erosión predomina a lo largo de la bahía, rango que se intercala con estado estable y escasos sectores de acreción en la zona media de la bahía. El litoral arenoso se inserta en una playa encajada de 7,3 km de largo, con un tipo de zona de rompiente reflectivo a intermedio, con drenaje local la zona media de la bahía. Es una playa urbana pero influenciada por el uso industrial de la bahía, por lo tanto altamente sensible a la erosión costera debido a las actividades antrópicas de alto impacto.

## **Bahía de Concón**

En el litoral arenoso de la bahía de Concón se determinó una tasa de cambio de -0,75 m/año para el periodo 1980-2018 (38 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 31, la erosión alta se concentra principalmente en playa La Boca, mientras que hacia el norte, en playa Mantagua, el rango de erosión es el predominante (-0,2 y -1,5 m/año). Este litoral arenoso se extiende entre playa La Boca y playa Mantagua, tiene 2,8 km de largo y presenta un tipo de zona de rompiente reflectiva e intermedia. Dado el uso industrial y urbano en la bahía, es sensible a la erosión costera por causas naturales y antrópicas.

De acuerdo a la investigación realizada por Martínez et al., (2011), se determinó para esta playa una tasa media de cambio de -0,55 m/año para el periodo 1945-2008, estableciéndose un estado erosivo, lo cual es coincidente con este estudio.

## **Playa Cochoa (Viña del Mar)**

En playa Cochoa se determinó una tasa de cambio de 0,04 m/año para el periodo 1980-2018 (38 años), clasificándose como "estado estable" (-0.2 y +0.2 m/año). De acuerdo a la Figura 32, el estado estable predomina en los extremos de esta playa de bolsillo, mientras que en el centro de ella, influenciada por las rocas afloradas, hay predominio de acreción. Esta playa tiene 160 m de largo y está inserta en la ciudad de Viña del Mar.

## **Playa El Encanto (Viña del Mar)**

En playa El Encanto se determinó una tasa de cambio de 0,21 m/año para el periodo 1994-2018 (últimos 24 años), clasificándose como "acreción" (> +0.2 m/año). De acuerdo a la Figura 33, la acreción es único rango que se presenta en esta playa, la cual tiene 232 m de largo y con un confinamiento lateral rígido, limitado por un muro, por tratarse de una playa urbana.

## **Playa Reñaca**

En playa Reñaca se determinó una tasa de cambio de -0,31 m/año para el periodo 1980-2016 (36 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 34, la erosión predomina a lo largo de la playa pero también se presentan sectores con estado estable, principalmente en la zona media de la playa. Esta playa tiene 1,3 km de largo, es rectilínea y tiene un estero local que aporta sedimentos. Es una playa intermedia-reflectiva con desarrollo de cusps de playa, su principal rasgo morfológico. Presenta un uso intensivo en verano y por lo tanto una fuerte sensibilidad a la erosión por causas naturales y antrópicas.

De acuerdo a la investigación realizada por Martínez et al. (2018), la tasa de cambio para la playa Reñaca durante el período 1964-2016 era de +0,24 m/año por lo cual se determinó una tendencia a la acreción. Ello se explica porque el período considerado fue mayor (52 años) por lo cual asumiendo un mayor grado de naturalidad de la playa, los aportes sedimentarios



provenientes de las distintas fuentes, en especial el estero Reñaca, mantenían la playa en estado estable y con tendencia a la acreción en la zona sur de esta, de mayor influencia de este estero. En dicha investigación se determinó que, si bien playa Reñaca presenta una tasa media en el rango de acreción, la distribución espacial de las áreas de acreción se concentran solo en la zona del estero de Reñaca, mientras que en el resto predomina el estado estable, lo cual influyó en la tasa positiva encontrada. En el presente estudio, que consideró un periodo más corto de tiempo (36 años) durante el cual existe un menor grado de naturalidad de la playa debido al incremento de la urbanización a partir de los años '70 en la región. Ello podría redundar en que los aportes del estero Reñaca ya no son suficientemente efectivos como para mantener en equilibrio el balance sedimentario de la playa, detonando la erosión en aquellos lugares donde la investigación anterior encontró estado estable.

### **Playa Las Cañitas (Viña del Mar)**

En playa Las Cañitas se determinó una tasa de cambio de 0,07 m/año para el periodo 1994-2018 (24 años), clasificándose como "estado estable" (-0.2 y +0.2 m/año). De acuerdo a la Figura 35, el estado estable se presenta en la zona sur de la playa, mientras que en la zona media y norte predomina la acreción. Esta playa de bolsillo tiene 190 m de largo, es urbana y presenta confinamiento lateral rígido.

### **Playa Las Salinas (Viña del Mar)**

En playa Las Salinas se determinó una tasa de cambio de -0,31 m/año para el periodo 1980-2016 (36 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 36, la erosión predomina a lo largo de toda la playa, aunque se reconoce estado estable y leve acreción en el extremo norte de ella. Esta es una playa encajada, de estado reflectivo, inserta en zona urbana, por lo cual sometida a fuerte uso en época estival, siendo sensible a erosión costera por causas antrópicas.

La investigación realizada por Martínez et al. (2018) estableció para esta playa una tasa media de cambio de -0,15 m/año, para los últimos 52 años (1964-2016), es decir un estado estable. Sin embargo, algunos sectores de la playa ya evidenciaban erosión, por lo cual la condición de la playa considerando un periodo menor de tiempo (36 años) deja en evidencia el estado erosivo como proceso generalizado en la playa.

De acuerdo a registros históricos, la playa Las Salinas en 1930 presentaba un ancho mayor que el actual (Figura 18). Desde 2015 a la fecha, la playa ha sido continuamente afectada en su morfología así como en la infraestructura turística que posee, la cual ha sido dañada en los eventos más intensos de marejadas. En la Figura 18 (inferior), se observa la berma de playa construida por las marejadas del 16 de junio de 2018, dejando un ancho de playa promedio de unos 4 m.

Figura 18: Cambios históricos de playa Las Salinas, Viña del Mar, entre 1930 y 2018 (Arriba: Museo de Historia Natural; Abajo: 16 junio 2018, Carolina Martínez)



### Playa Los Marineros (Viña del Mar)

En playa Los Marineros se determinó una tasa de cambio de  $-0,05$  m/año para el periodo 1980-2016 (36 años), clasificándose como "estado estable" ( $-0.2$  y  $+0.2$  m/año). De acuerdo a la Figura 37, la erosión es el rango predominante en la zona sur y media de la playa, cambiando a estado estable y acreción hacia la zona norte. Esta playa tiene 2,6 km de largo, es rectilínea y presenta una zona de rompiente reflectiva con desarrollo de cusp de playa. Es una de las playas urbanas más importantes de Viña del Mar por su longitud/área y función en la actividad turística de la zona, siendo una de las que más se ha afectado por las marejadas desde 2015 a la fecha, por lo tanto muy sensible a la erosión costera.

El estado estable encontrado coincide con la investigación realizada por Martínez et al. (2018) donde se estableció una tasa de cambio de  $-0,031$  m/año (1964-2016). Sin embargo, la zona sur y media de la playa presenta estado estable que se alterna con erosión, condición similar a la encontrada en este estudio. Ello permite conjeturar que estos sectores de la playa son altamente sensibles a cambios generados por factores naturales o antrópicos, como ha sido el caso de otras playas que presentando un estado estable en su tasa media, han pasado a erosión (Reñaca, Las Salinas). Los cambios históricos en esta playa son importantes, como se observa en la Figura 19, donde la playa desaparece con las obras de relleno y construcción de costanera en la Av. Perú.

**Figura 19: Cambios históricos de playa Los Marineros, sector Av. Perú, entre 1937 y 2016 (Fuente: Fundación Rompientes).**



## Playa Miramar (Viña del Mar)

En playa Miramar se determinó una tasa de cambio de  $-0,37$  m/año para el periodo 1994-2018 (24 años), clasificándose como “erosión” ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 38, la erosión es el rango predominante en esta playa de 147 m de largo. La playa se encuentra inserta en área urbana y presenta confinamiento lateral rígido. De acuerdo a los registros históricos, en 1930 la playa Miramar era una reconocida playa del sector, actualmente la playa se ha reducido considerablemente y en ella destacan los afloramientos rocosos (Figura 20).

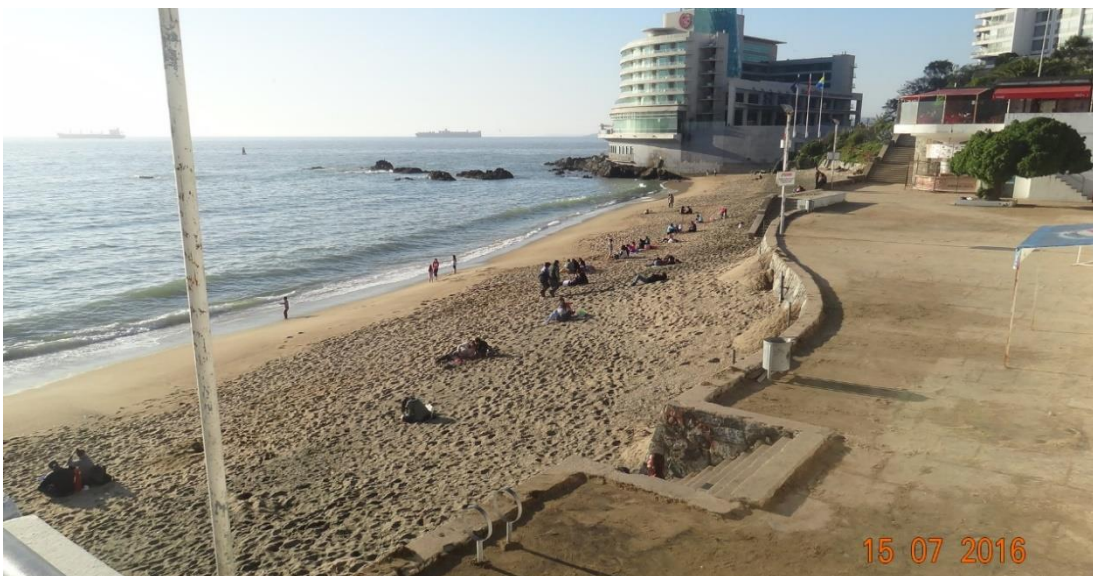
**Figura 20: Cambios históricos de playa Miramar (Viña del Mar) ente 1930 y 2017 (Arriba: Museo de Historia Natural Abajo: [www.vinadelmar.travel/galeria-fotos/playa-miramar.html](http://www.vinadelmar.travel/galeria-fotos/playa-miramar.html))**



## Playa Caleta Abarca (Viña del Mar)

En playa Caleta Abarca se determinó una tasa de cambio de  $-0,46$  m/año para el periodo 1994-2018 (24 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 39, la erosión es el rango predominante en esta playa de 420 m de largo. La playa se encuentra inserta en área urbana y es de alta demanda durante el turismo de verano en Viña del Mar. La Figura 21 presenta una vista panorámica de 1944, destacando el ancho y la pendiente suave. A partir de 2015 esta playa ha sido afectada por marejadas recurrentes, donde suele desarrollarse una berma característica. En la figura inferior se muestra la playa afectada por las marejadas de julio de 2016, donde una parte importante de la arena se depositó en el piso superior de la costanera.

**Figura 21: Cambios históricos de playa Caleta Abarca (Viña del Mar) entre 1944 y 2016 (Arriba: Museo de Historia Natural Abajo: julio 2018, Carolina Martínez)**



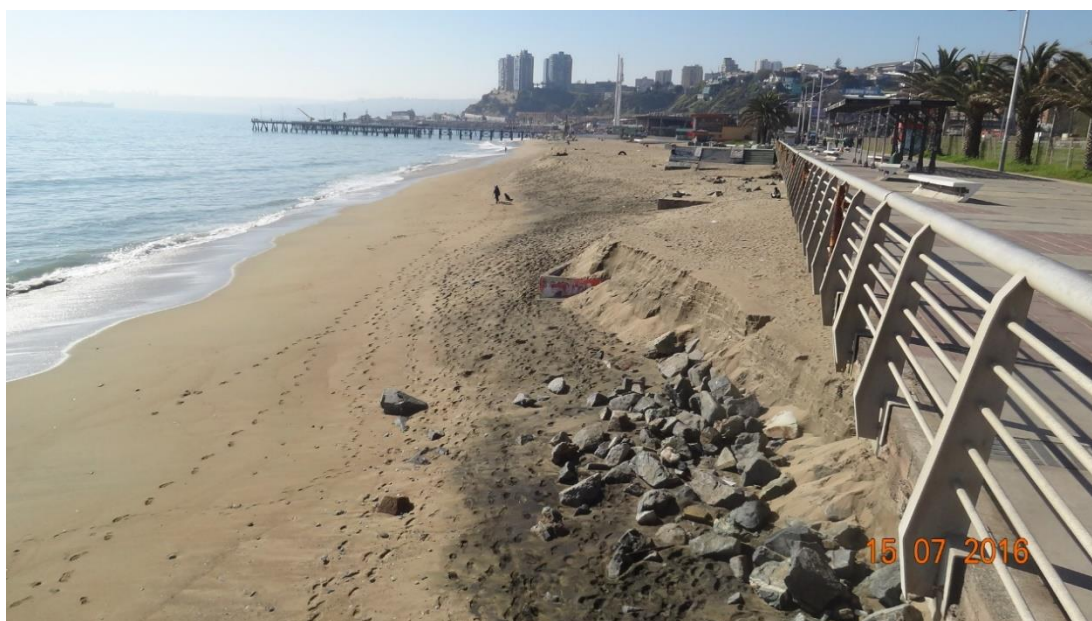
## **Playa Caleta Portales (Valparaíso)**

En playa Caleta Portales se determinó una tasa de cambio de  $-0,05$  m/año para el periodo 1980-2016 (36 años), clasificándose como "estado estable" ( $-0.2$  y  $+0.2$  m/año). De acuerdo a la Figura 40, el estado estable predomina a lo largo de la playa, principalmente en los extremos y centro de esta, alterándose con rangos de acreción y también erosión. Esta playa encajada, tiene 633 m de largo, de estado reflectivo y sin drenaje local. Es la playa urbana más importante de Valparaíso, de alta demanda por uso turístico pero también por otras actividades económicas (pesca).

La investigación realizada por Martínez et al., (2018) determinó en esta playa un estado erosivo, con una tasa media de  $-1,048$  m/año para los últimos 12 años (2004-2016). Este estado se explica debido a que se consideró un período corto de tiempo durante el cual ocurrieron marejadas intensas, como la del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017). Al ampliar el análisis de 12 a 36 años, el estado erosivo pasa a estable en esta playa. Cabe notar asimismo, que la cuenca de la Quebrada Cabritería, que corresponde a un aporte significativo de sedimentos a esta playa, ha experimentado un aumento sustantivo de su cubierta urbana cuyos impactos no han sido analizados a la fecha.

La Figura 22 presenta una vista panorámica de la playa en 1930 con la actividad de la caleta de pescadores (arriba), mientras que en la figura de abajo se observan los efectos de las marejadas de junio de 2016, donde se desarrollaron bermas de hasta 1,5 m y una considerable reducción del ancho de la playa.

Figura 22: Cambios históricos de playa Caleta Portales, entre 1930 y 2016 (Arriba: Museo Histórico Nacional. Abajo: Carolina Martínez)



## Playa Las Torpederas

En playa Las Torpederas se determinó una tasa de cambio de  $-0,83$  m/año para el periodo 1994-2018 (24 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 41, el nivel de erosión es el único que se presenta a lo largo de toda la playa. Es una playa de bolsillo, de 75 m de largo, reflectiva y sin drenaje local activo, debido a la urbanización y el desarrollo inmobiliario el cual ha obstruido el aporte de la quebrada local que abastecía antiguamente a la playa. En la Figura 23 se observa la fisonomía de la playa en los años '30 y una foto reciente donde se ven los daños en la infraestructura al costado del camino costero.

**Figura 23: Cambios históricos de playa Las Torpederas entre 1930 y 2015 (Arriba: Museo Histórico Nacional, Altschwager, Einar. Abajo: [www.tripadvisor.es](http://www.tripadvisor.es))**





## **Playa Tunquén**

En playa Tunquén se determinó una tasa de cambio de  $-0,56$  m/año para el periodo 1980-2017 (37 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 42, la erosión predomina a lo largo de la playa, intercalado solo con un pequeño sector de acreción cercano al estero que desemboca en el centro de la playa. Esta playa rural tiene 2,1 km de largo, de estado intermedio reflectivo, con amplio desarrollo de cusps de playa, los cuales pueden llegar a 300 m de longitud de onda. Por su acceso no es de uso masivo en verano, pero está presionada por la demanda inmobiliaria de segundas residencias.

Martínez y Salinas (2009) analizaron los tipos de cambio de la línea litoral en Tunquén, determinando erosión, con una tasa media de  $-0,45$  m/año para el periodo 1964-2004 (40 años). De acuerdo con los resultados encontrados en este estudio, la erosión se ha incrementado levemente. La presión por el desarrollo inmobiliario en esta zona y su impacto en los aportes sedimentológicos a la playa, no obstante, es una materia que aún no ha sido abordada por estos investigadores.

## **Playa Algarrobo**

En playa Algarrobo se determinó una tasa de cambio de  $-2,54$  m/año para el periodo 1980-2017 (37 años), clasificándose como "erosión alta" ( $> -1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 43, la erosión alta predomina a lo largo de toda la playa, con un sector de erosión en la zona sur (caleta de pescadores). Esta playa rectilínea tiene 3,5 km de largo, reflectiva con desarrollo de cusps de playa presenta drenaje local. Se inserta en área urbana y es relevante por la actividad turística en época estival. Recientemente ha sido afectada por marejadas intensas.

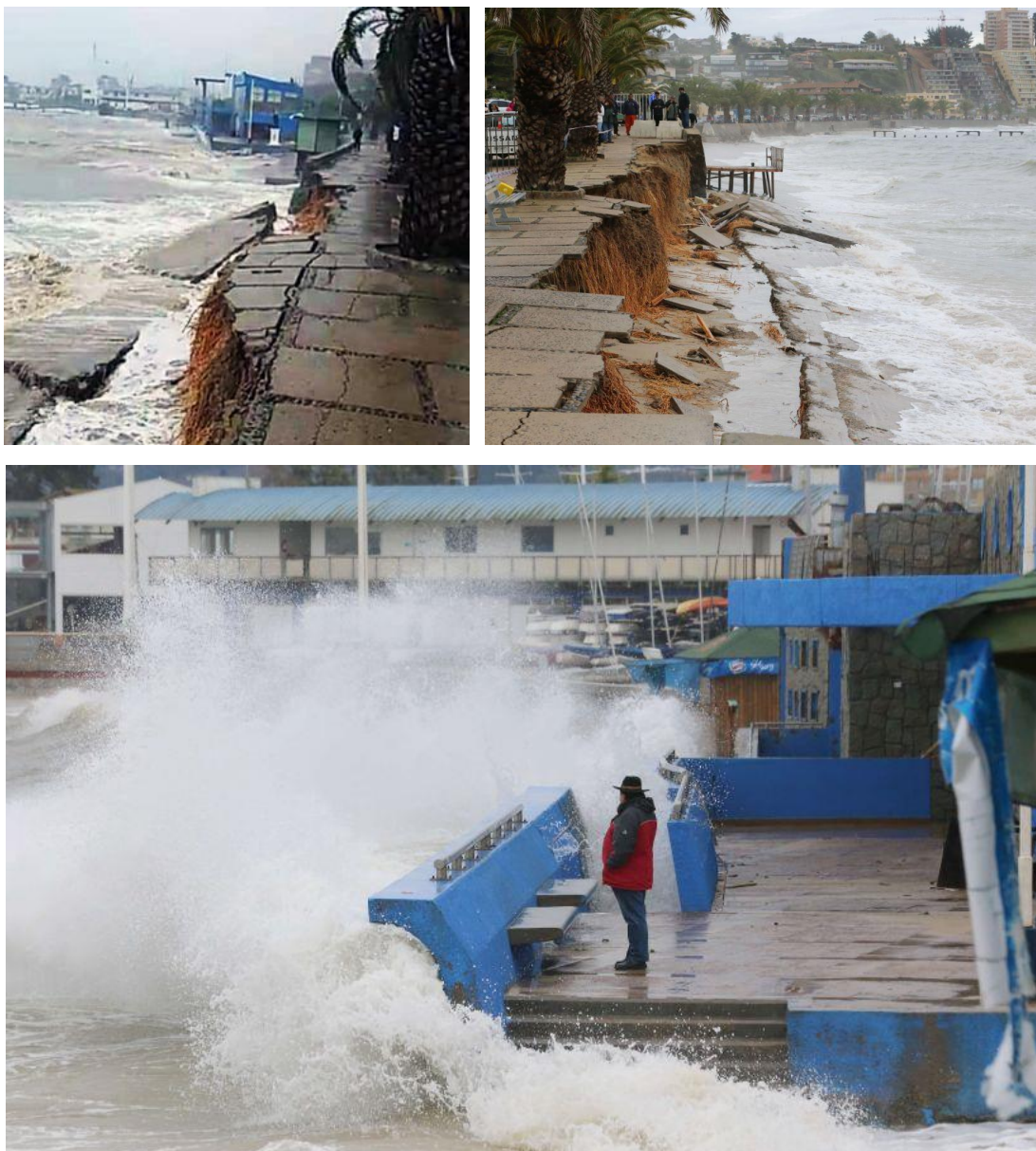
Previo a este estudio, la erosión se había determinado para distintas escalas de tiempo. De acuerdo con Martínez (2007), Algarrobo presentó en el periodo 1967-2006 una tendencia a la erosión en su zona sur-media y una tendencia a la acreción en su zona norte. Posteriormente, Echeverría (2017) estableció una tasa media de cambio de  $-0,84$  m/año para el periodo 1967-2017 (50 años), encontrando similares características (tendencia al retroceso en la zona sur-medio y estado estable intercalado con áreas de acreción en la zona norte). La alta tasa de erosión encontrada aquí se explica por la menor escala de tiempo utilizada (37 años), donde se combina la alta urbanización experimentada en Algarrobo durante la última década, y eventos extremos como la marejada del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017). Estos aspectos deben estudiarse debido a que esta es una de las áreas críticas establecidas en el estudio, donde este tipo de tasas de erosión resultan en procesos de degradación de la costa y mayor exposición a desastres.

De acuerdo a registros históricos, la playa de Algarrobo junto con disminuir su ancho, ha sido severamente afectada por las marejadas recientes, especialmente en la zona sur, donde se localiza la caleta de pescadores (Figura 24 y Figura 25). Las marejadas de junio de 2017 provocaron cuantiosos daños en la costanera y en las instalaciones de la caleta de pescadores. En este último sector se han producido además emergencias sanitarias con vertidos que han producido floración de algas.

Figura 24: Cambios históricos de sector sur de playa Algarrobo entre los años '80 y 2018. Arriba: Sector Club Deportivo nacional en los años '80 ([www.algarrobodigital.cl/2018/04/hace-casi-35-anos-foto-de-playa.html](http://www.algarrobodigital.cl/2018/04/hace-casi-35-anos-foto-de-playa.html)) y Playa Algarrobo, frente a Club deportivo nacional en 2018 ([www.algarrobodigital.cl/2017/01/sucedio-en-algarrobo-y-ocupo-la.html](http://www.algarrobodigital.cl/2017/01/sucedio-en-algarrobo-y-ocupo-la.html)).



Figura 25: Playa Algarrobo, sector Caleta de Pescadores, efectos de las marejadas de junio de 2017 ([www.soychile.cl/San-Antonio/Sociedad/2017/06/26/472249/FOTOS-Asi-queda-el-borde-costero-de-Algarrobo-tras-el-paso-de-las-marejadas.aspx](http://www.soychile.cl/San-Antonio/Sociedad/2017/06/26/472249/FOTOS-Asi-queda-el-borde-costero-de-Algarrobo-tras-el-paso-de-las-marejadas.aspx))



### Playa El Quisco

En playa El Quisco se determinó una tasa de cambio de  $-0,36$  m/año para el periodo 1994-2017 (23 años), clasificándose como “erosión” ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 44, la erosión es predominante a lo largo de toda la playa. La playa El Quisco es encajada y tiene 1 km de largo, recibe aportes de drenaje local y está inserta en área urbana.

## **Playa Bahía de Cartagena**

En el litoral arenoso de la bahía de Cartagena se determinó una tasa de cambio de  $-0,61$  m/año para el periodo 1980-2018 (38 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 45, la erosión predomina a lo largo de la playa, especialmente en la zona sur y centro de esta. Hacia el norte, se presenta un pequeño sector de acreción. Esta playa encajada tiene 5,2 km de largo, la zona de rompiente es intermedia-disipativa con desarrollo de cusps de playa en su zona norte. Varios esteros y quebradas locales aportan sedimentos, sin embargo presentan fuerte intervención antrópica por lo cual se favorece la erosión.

## **Playa Las Cruces**

En el litoral arenoso de Playa Las Cruces se determinó una tasa de cambio de  $-0,65$  m/año para el periodo 1980-2017 (37 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 46, la erosión es predominante a lo largo de la playa, sin embargo se intercala con sectores de estabilidad. Esta playa de 3 km de largo, presenta una zona de rompiente intermedia-disipativa, con aportes locales y desarrollo de un extenso campo dunar compuesto por una variedad de dunas entre ellas antedunas y dunas transversales.

## **Bahía de Santo Domingo**

En el litoral arenoso de la bahía de Santo Domingo se determinó una tasa de cambio de  $-1,73$  m/año para el periodo 1992-2018 (26 años), clasificándose como "erosión alta" ( $> -1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 47, la erosión alta predomina a lo largo de toda la playa, especialmente en la zona entre Punta Toro y el estero El Yali, playa El Convento. Otro sector con erosión alta es el sector de playa Santo Domingo. Estos sectores se alternan con niveles de erosión, siendo los rangos prevalecientes en este litoral. El litoral arenoso se inserta en una playa de ensenada (hedland bay beach) siendo uno de los pocos sistemas de este tipo en Chile. Hasta antes del terremoto de 2010, la playa se mantenía con características disipativas pero luego de este evento, el litoral arenoso se presenta como intermedio-reflectivo. Se desarrolla a lo largo de unos 25 km, con un sistema de drenaje complejo en el sur (sistema de humedales de El Yali), cuencas andinas (río Maipo), grandes campos dunares, entre ellos el Convento-El Yali y los cordones de dunas de Santo Domingo, junto a humedales costeros y albuferas, de alto valor natural.

Antes del terremoto de 2010, la playa se mantenía con características disipativas pero luego de este evento, el litoral arenoso se presenta como intermedio-reflectivo. Al respecto, el trabajo realizado por Martínez (2001) caracterizó el estado morfodinámico promedio de la playa como de barra y surco longitudinal, el más cercano al estado disipativo puro (Figura 26). Así también se determinó en este estudio que las arenas que conforman la playa Santo Domingo (segmento medio y norte) corresponden a arenas finas, lo cual contrasta con el tipo de sedimento que compone la playa actualmente, el cual corresponde a gravas cuyo espesor puede llegar hasta 1 m de profundidad (Martínez, 2016). En este estudio se determinó además una tendencia a la erosión en la zona cóncava de la bahía (sector El Yali). El impacto del terremoto de 2010 en la morfodinámica de la playa es una materia que no ha sido dilucidada a la fecha.

Figura 26: Playa Rocas de Santo Domingo, pre (2001) y post terremoto (2016) del 27 de Febrero de 2010 (Fuente: Carolina Martínez).

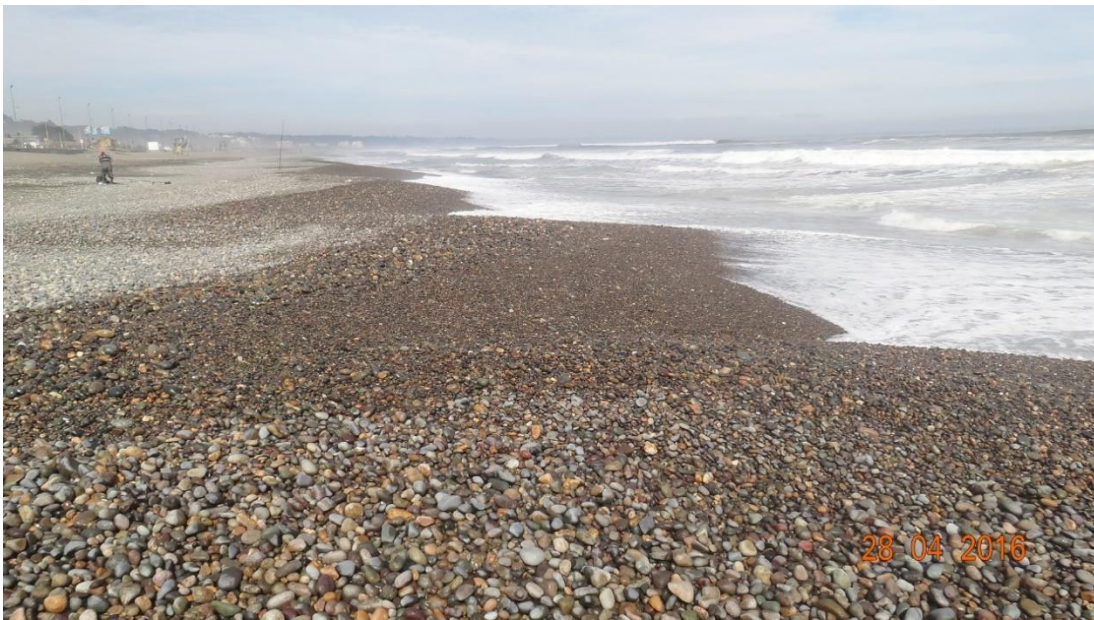


Figura 27: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Los Molles (1994-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

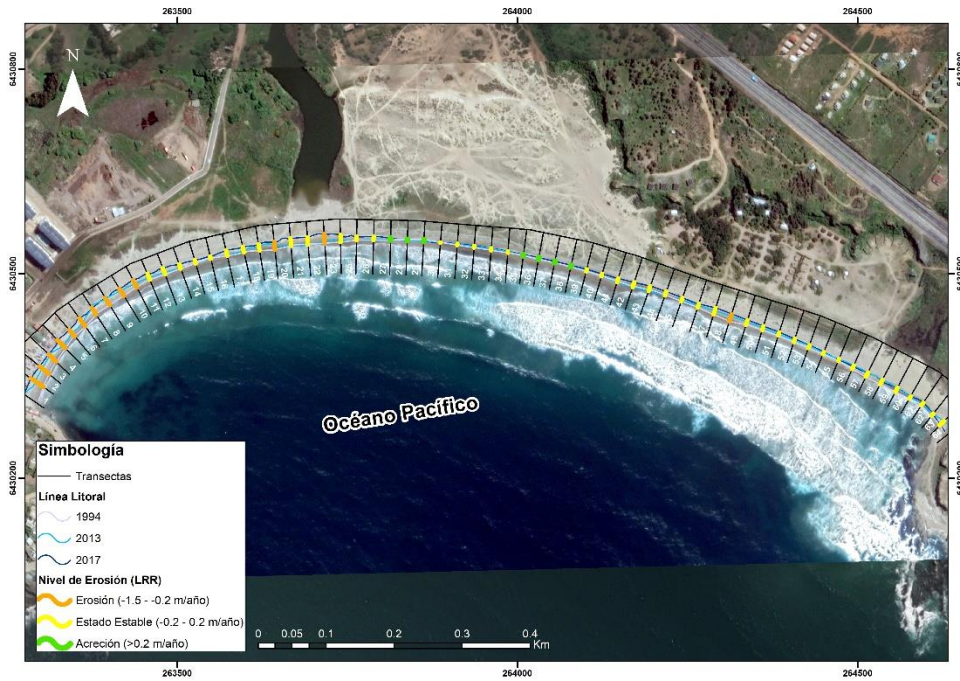


Figura 28: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Pichicuy (1994-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

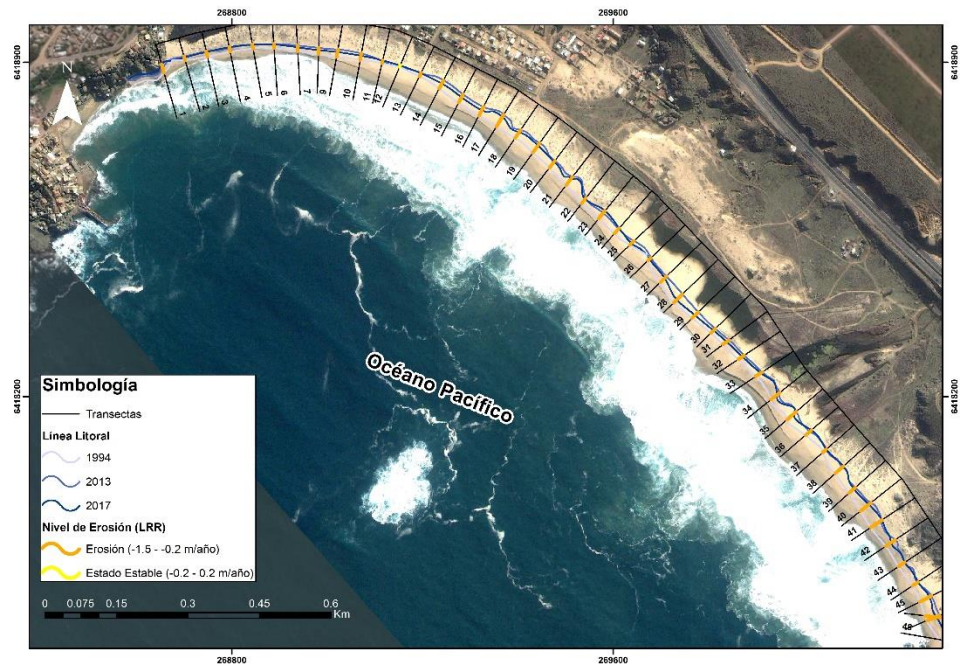


Figura 29: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Cachagua-Maitencillo (1994-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

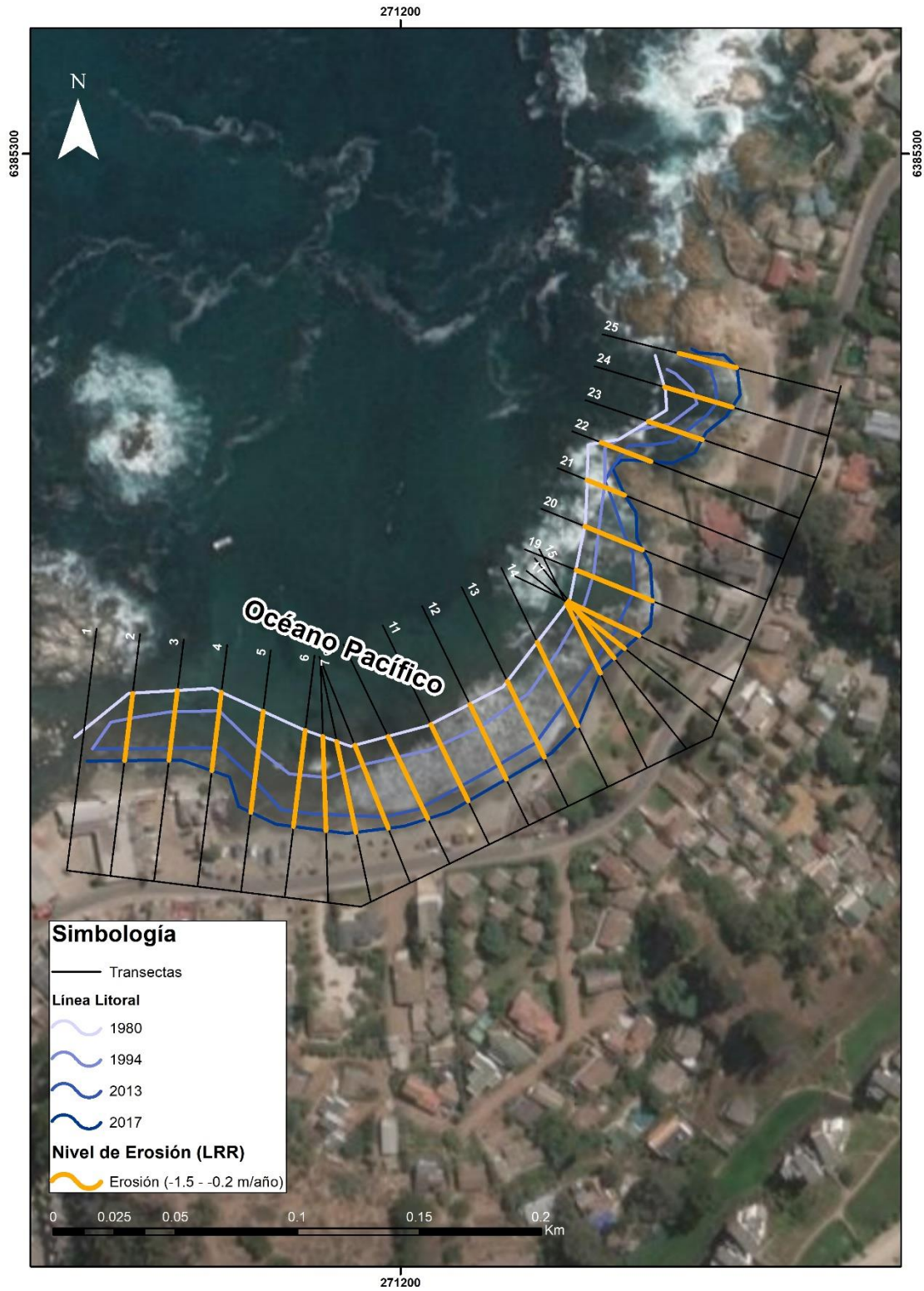


Figura 30: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, bahía de Quintero (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

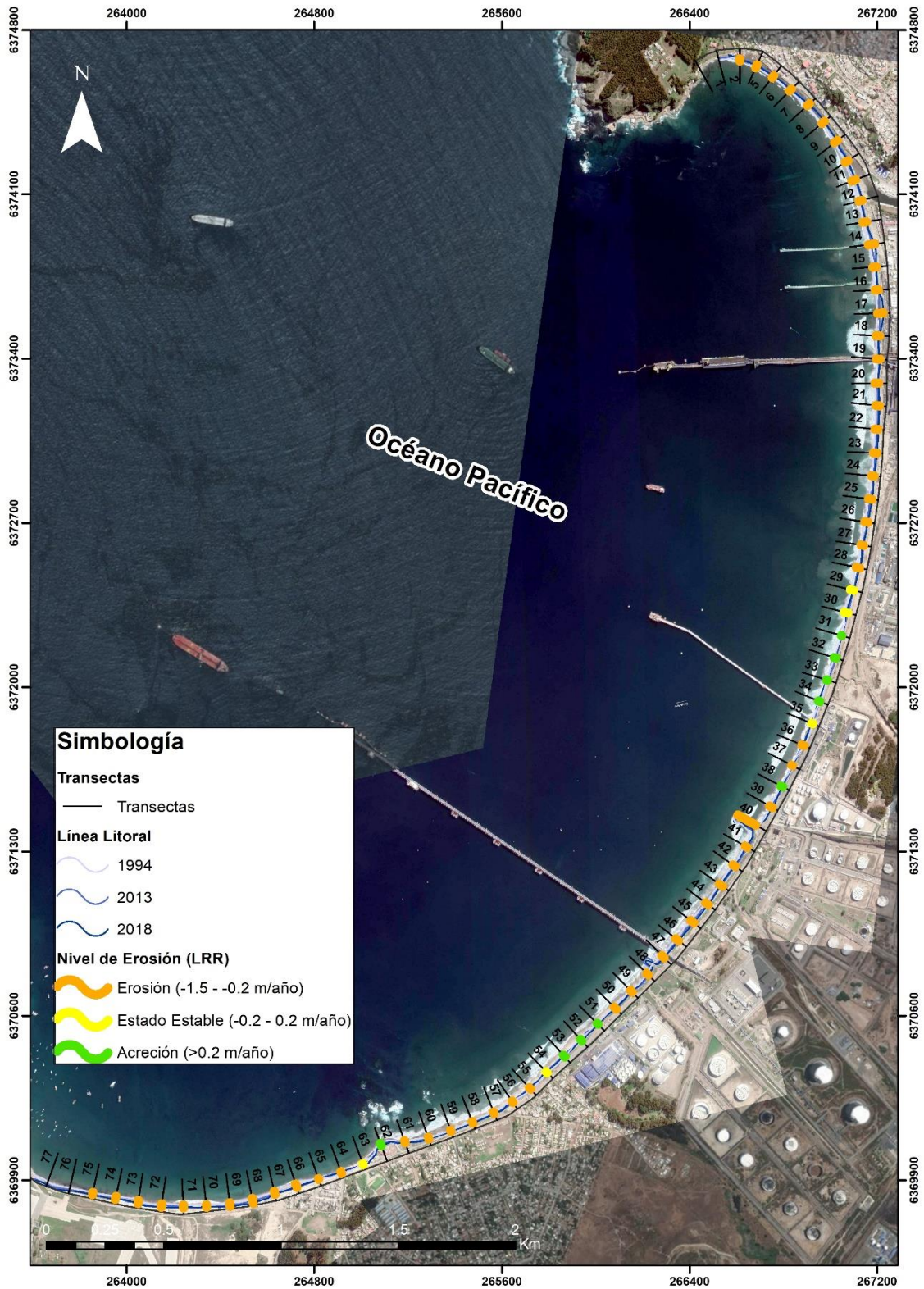




Figura 31: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, bahía de Concón (1980-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

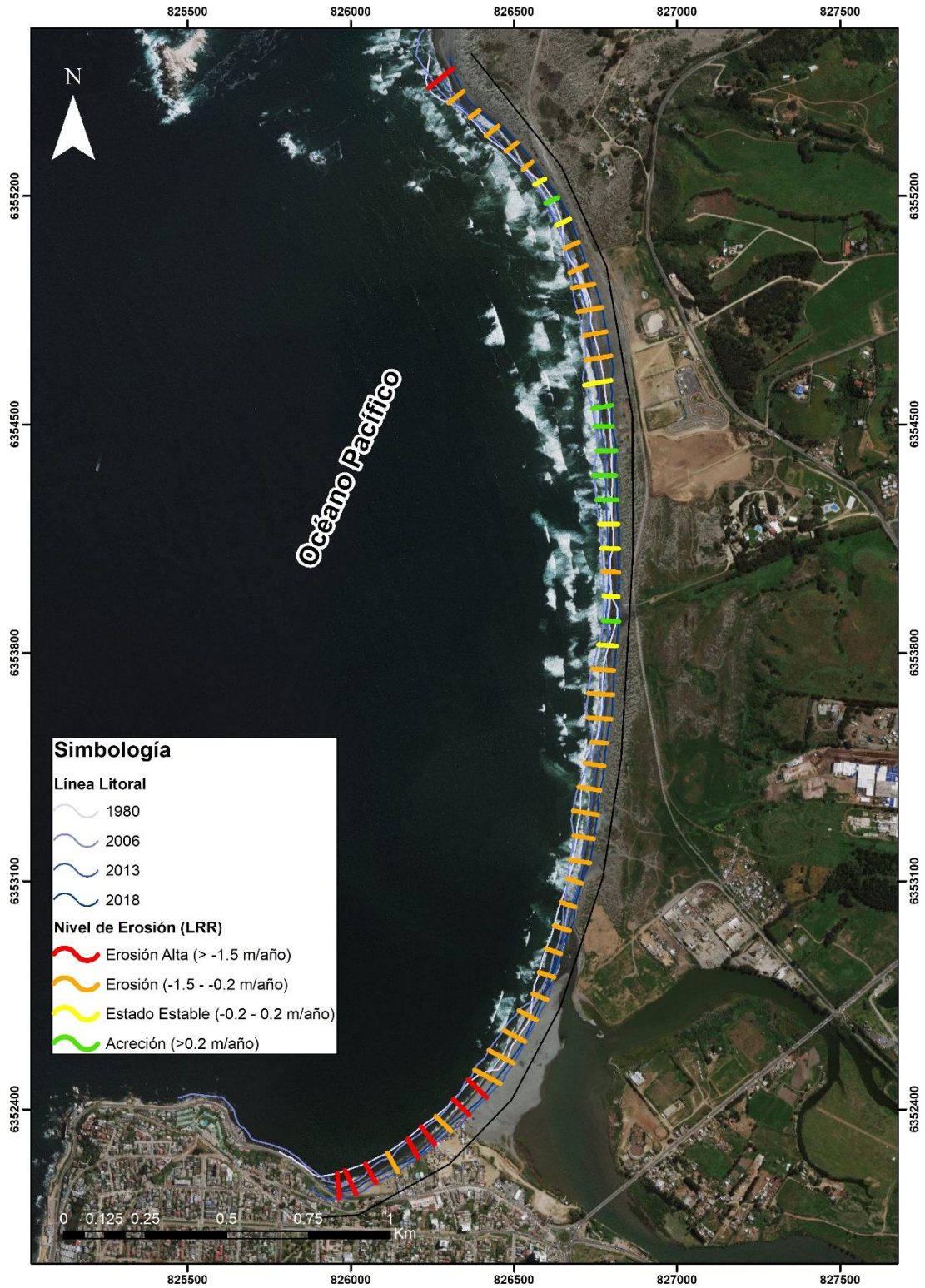


Figura 32: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Cochoa (1980-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

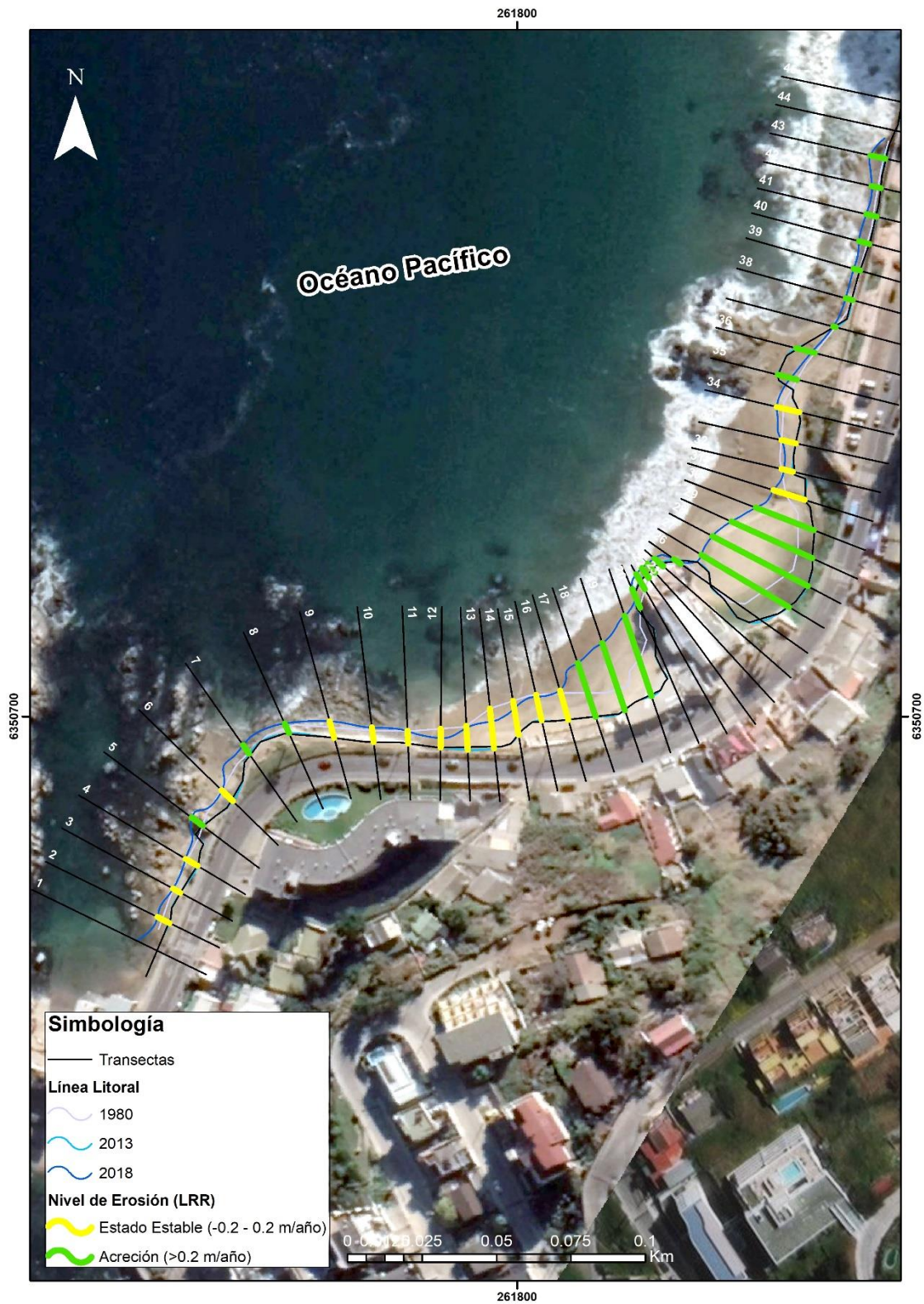


Figura 33: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa El Encanto (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

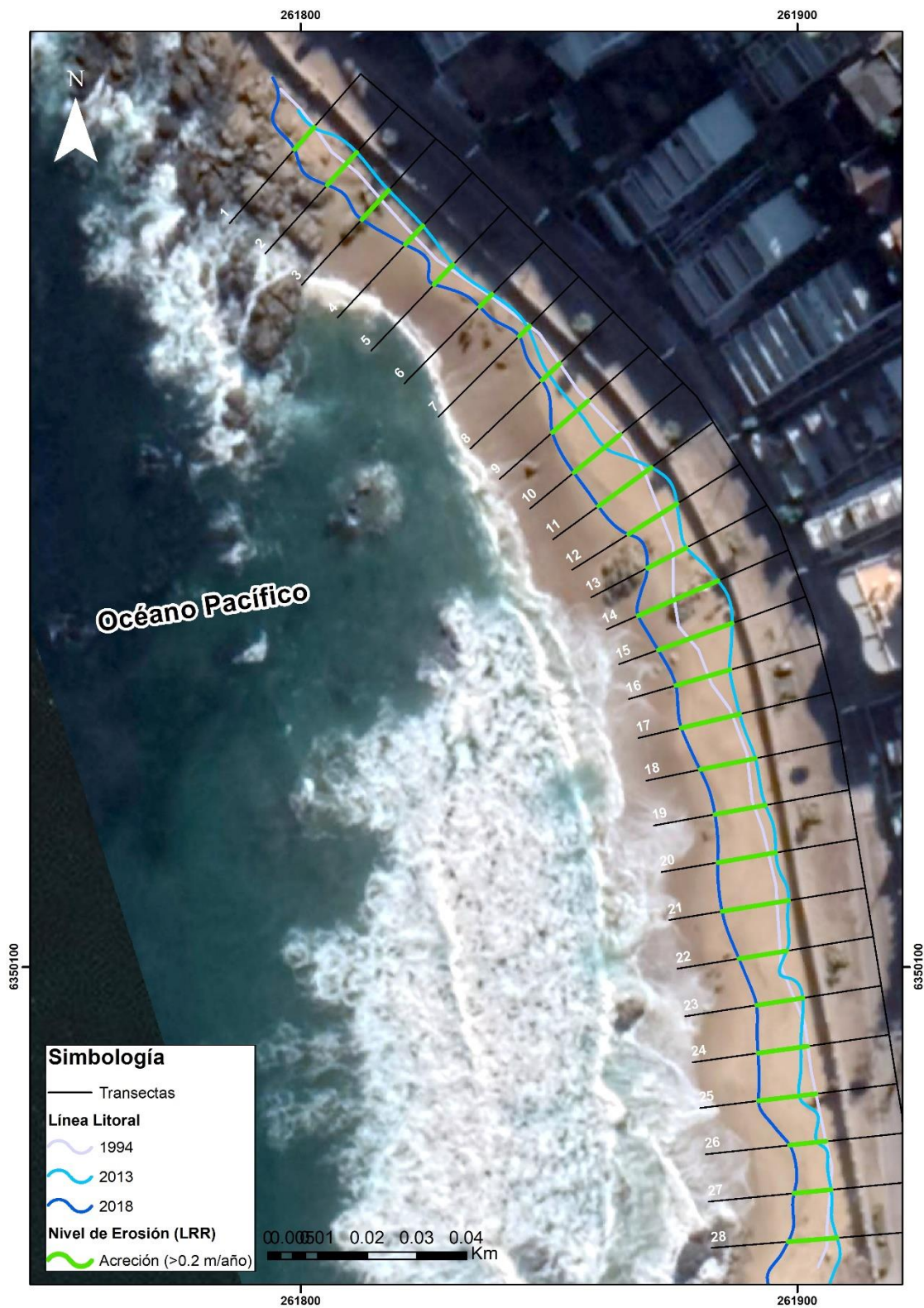


Figura 34: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Reñaca (1980-2016). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

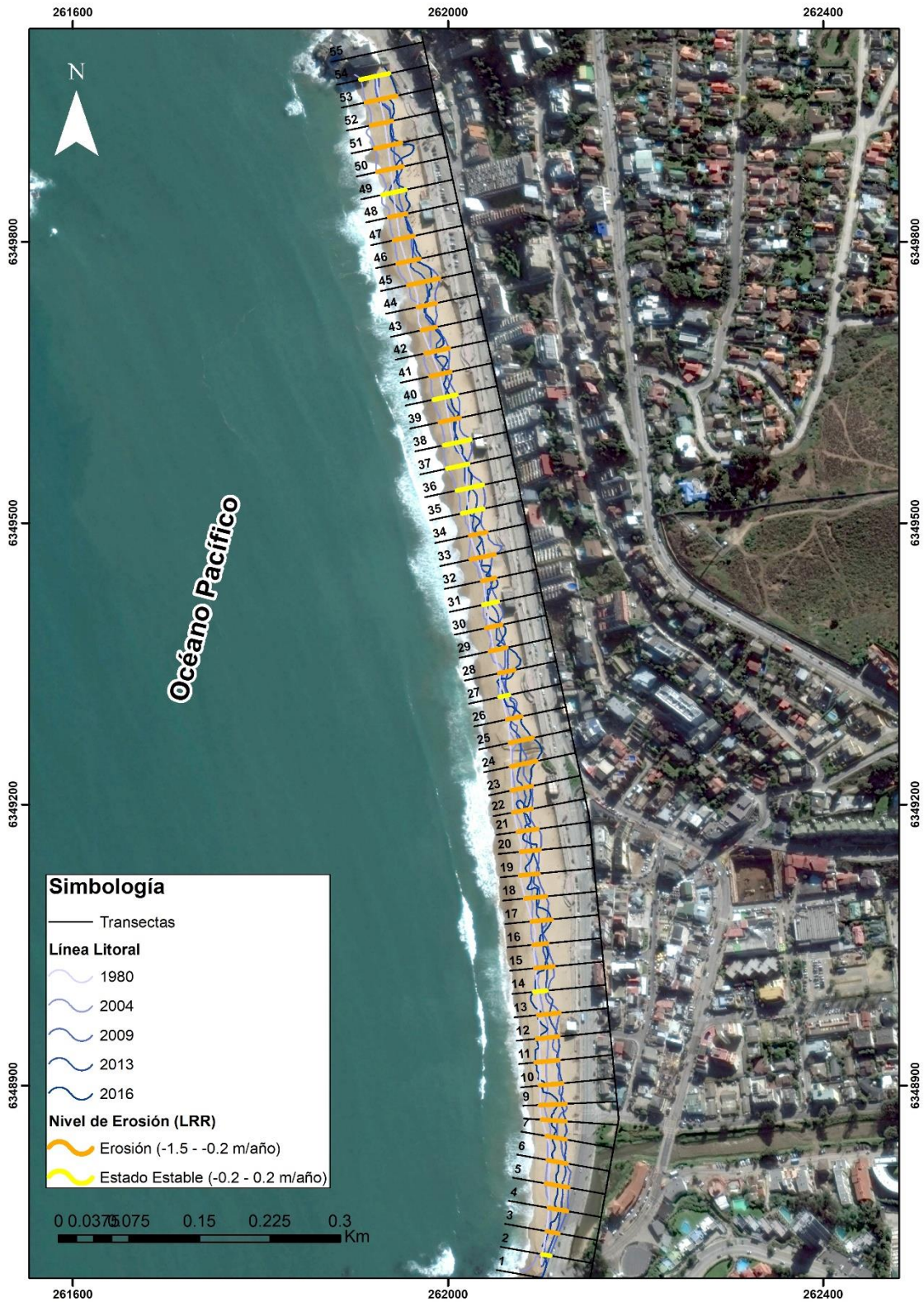


Figura 35: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Las Cañitas (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



Figura 36: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Las Salinas (1986-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



Figura 37: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Los Marineros (1980-2016). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

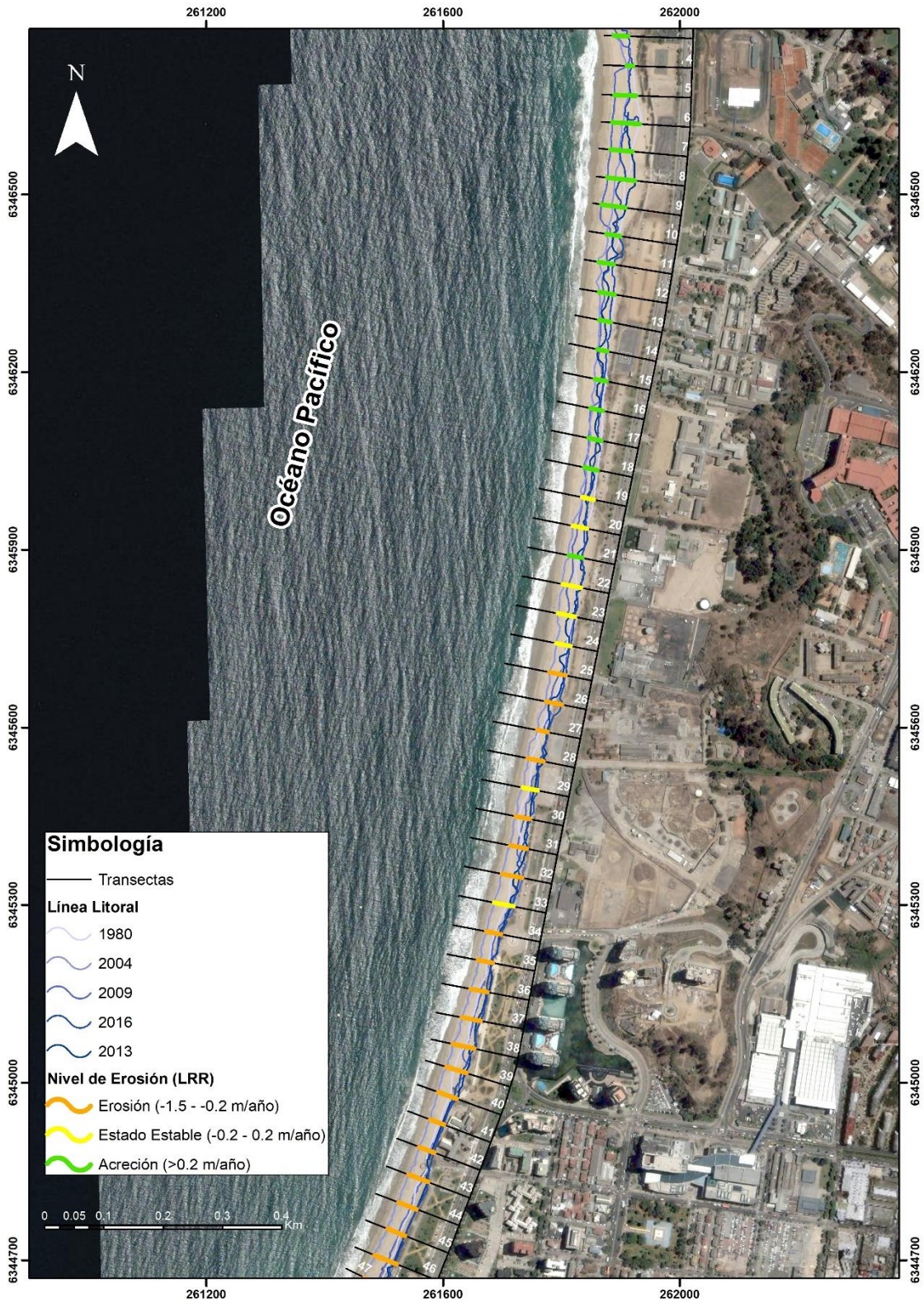


Figura 38: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Miramar (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



Figura 39: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Caleta Abarca (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.





Figura 40: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Caleta Portales (1980-2016). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

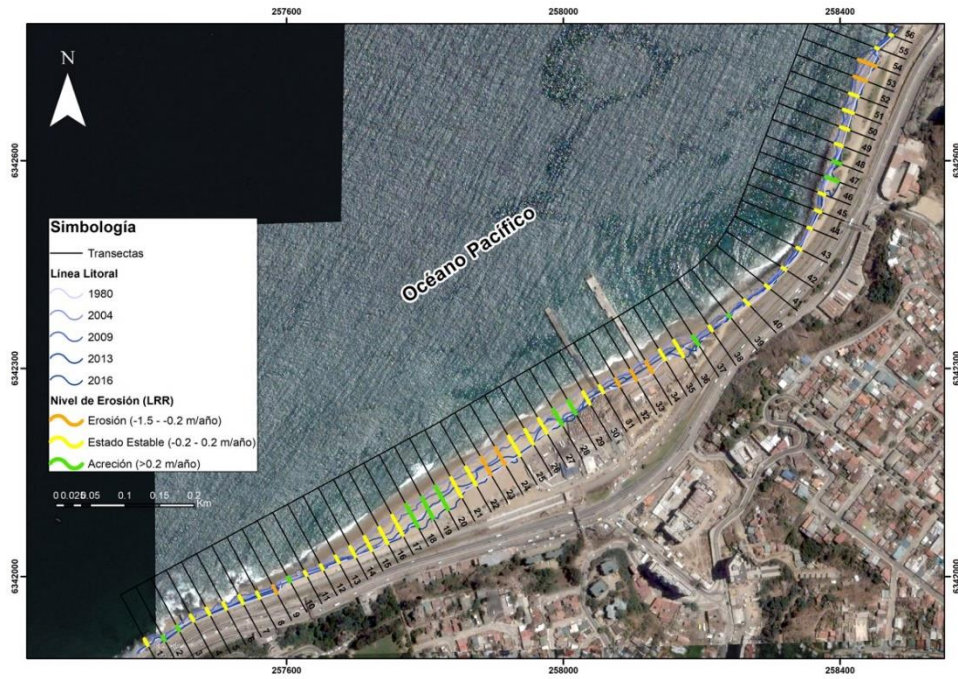


Figura 41: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Las Torpederas (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



Figura 42: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Tunquén (1980-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

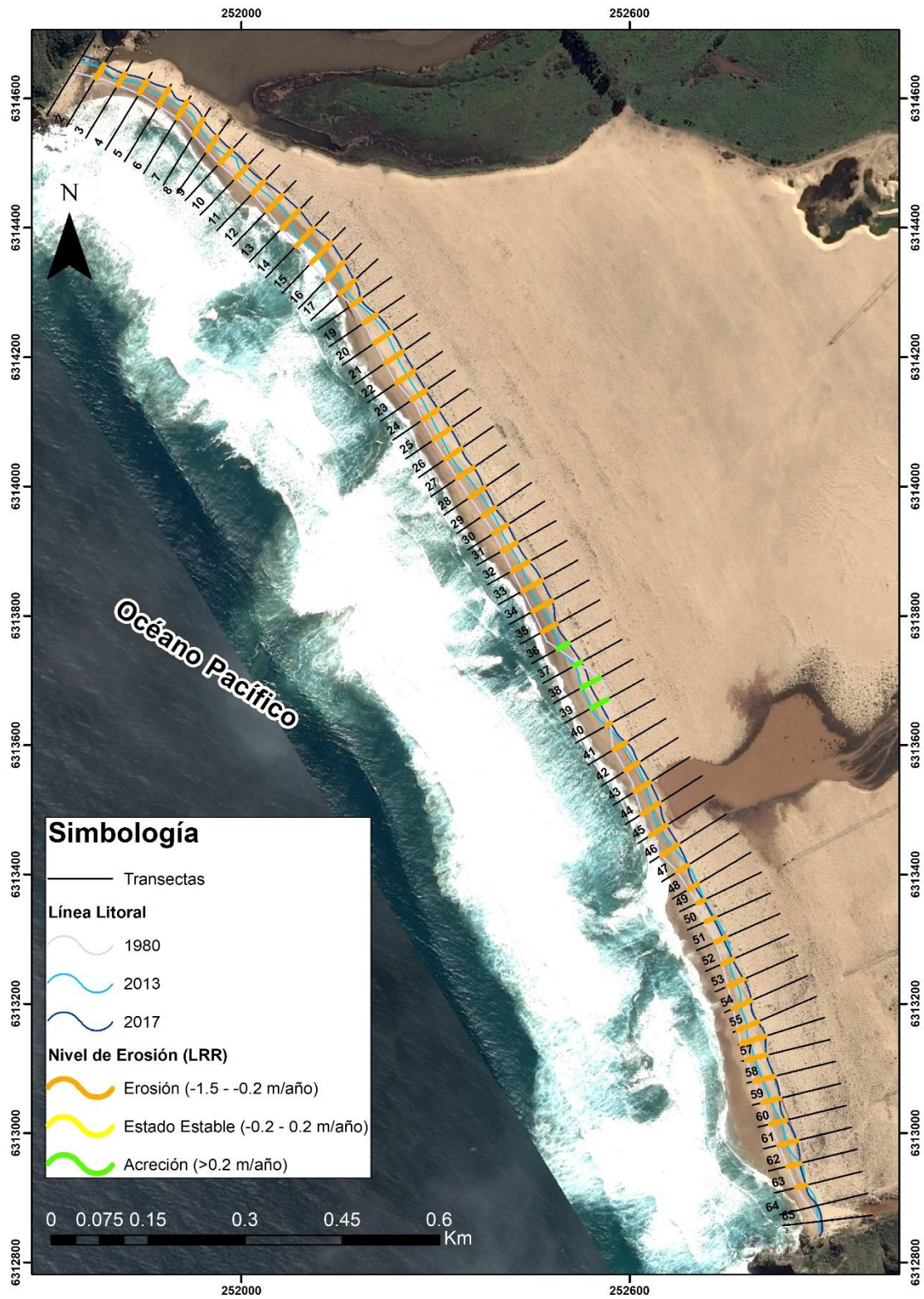


Figura 43: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Algarrobo (1980-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

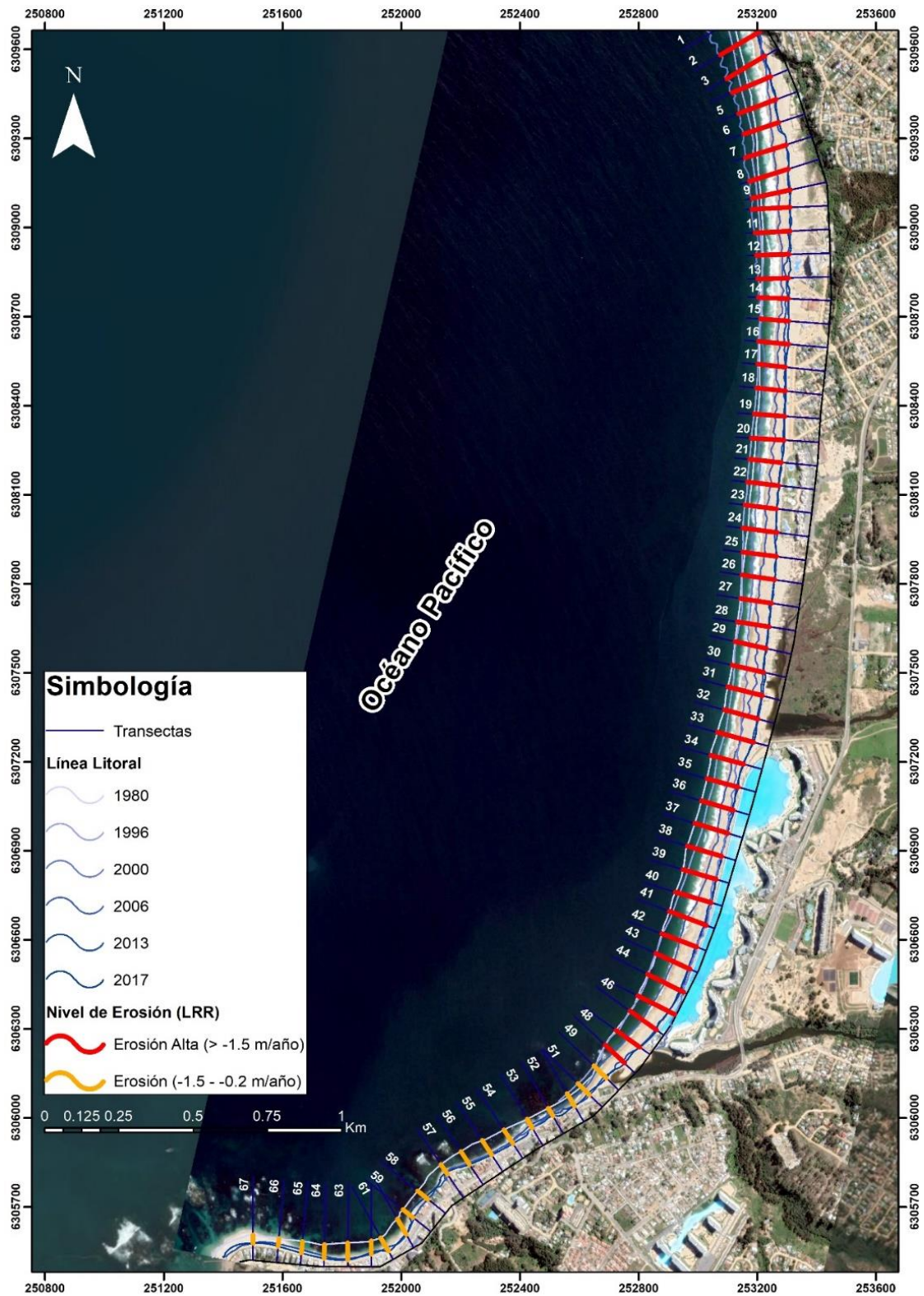


Figura 44: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa El Quisco (1994-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

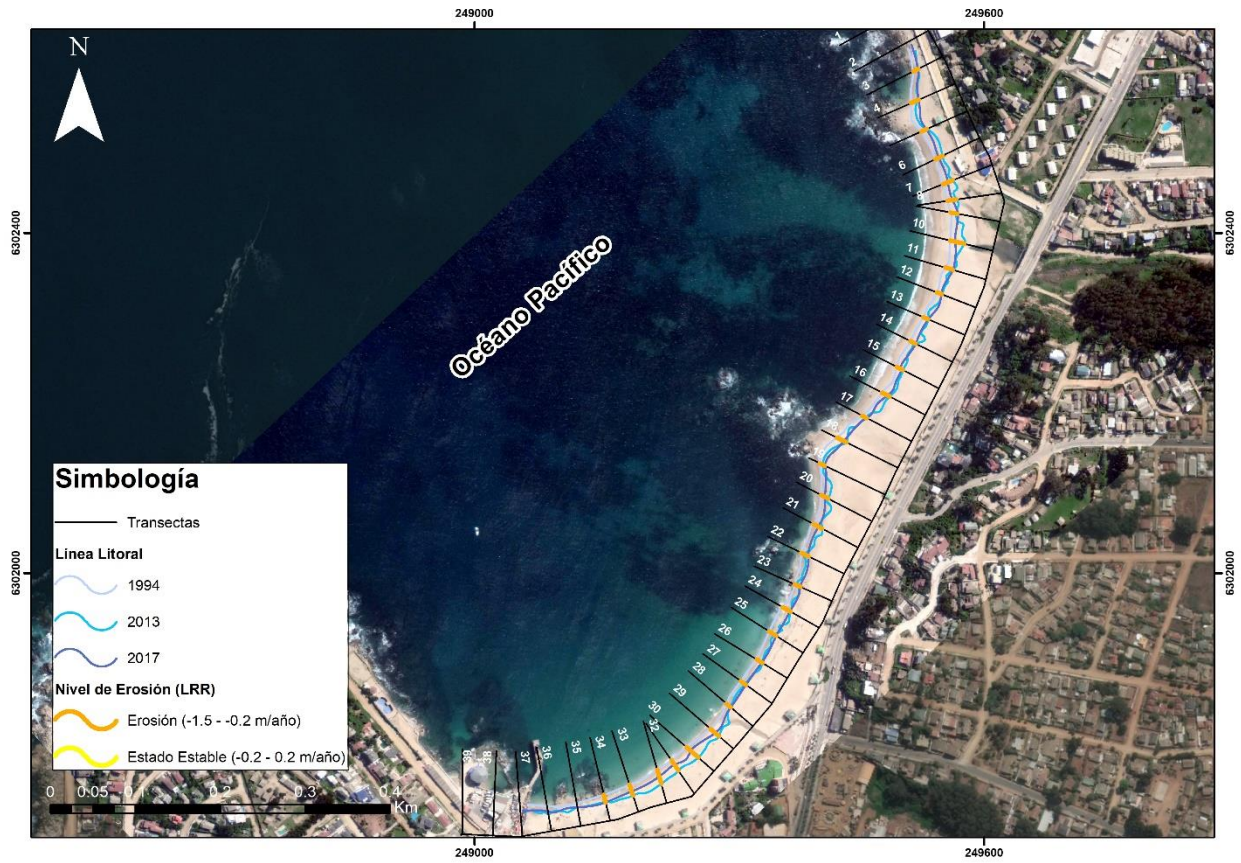


Figura 45: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, Bahía de Cartagena (1980-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

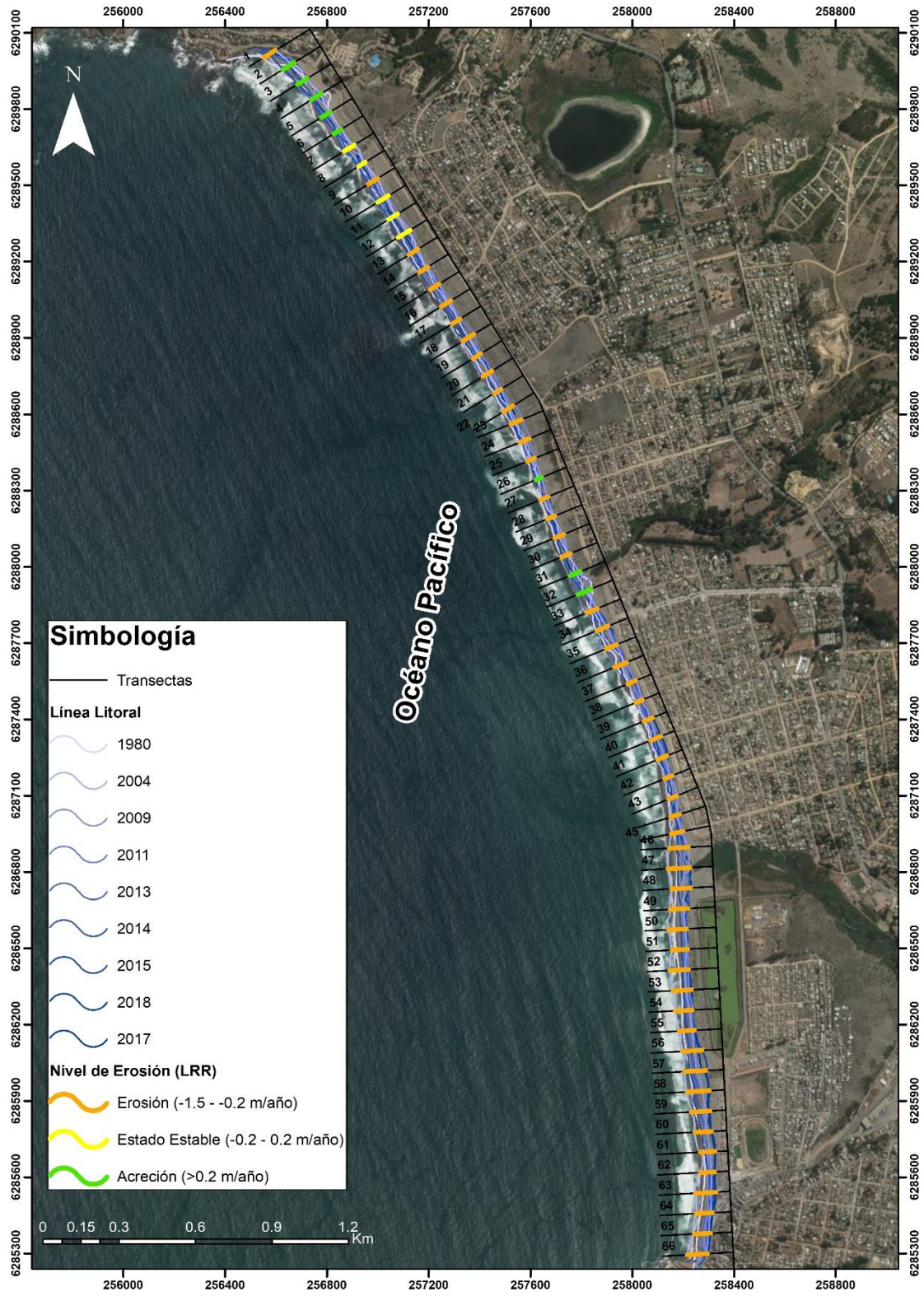


Figura 46: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Las Cruces (1980-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

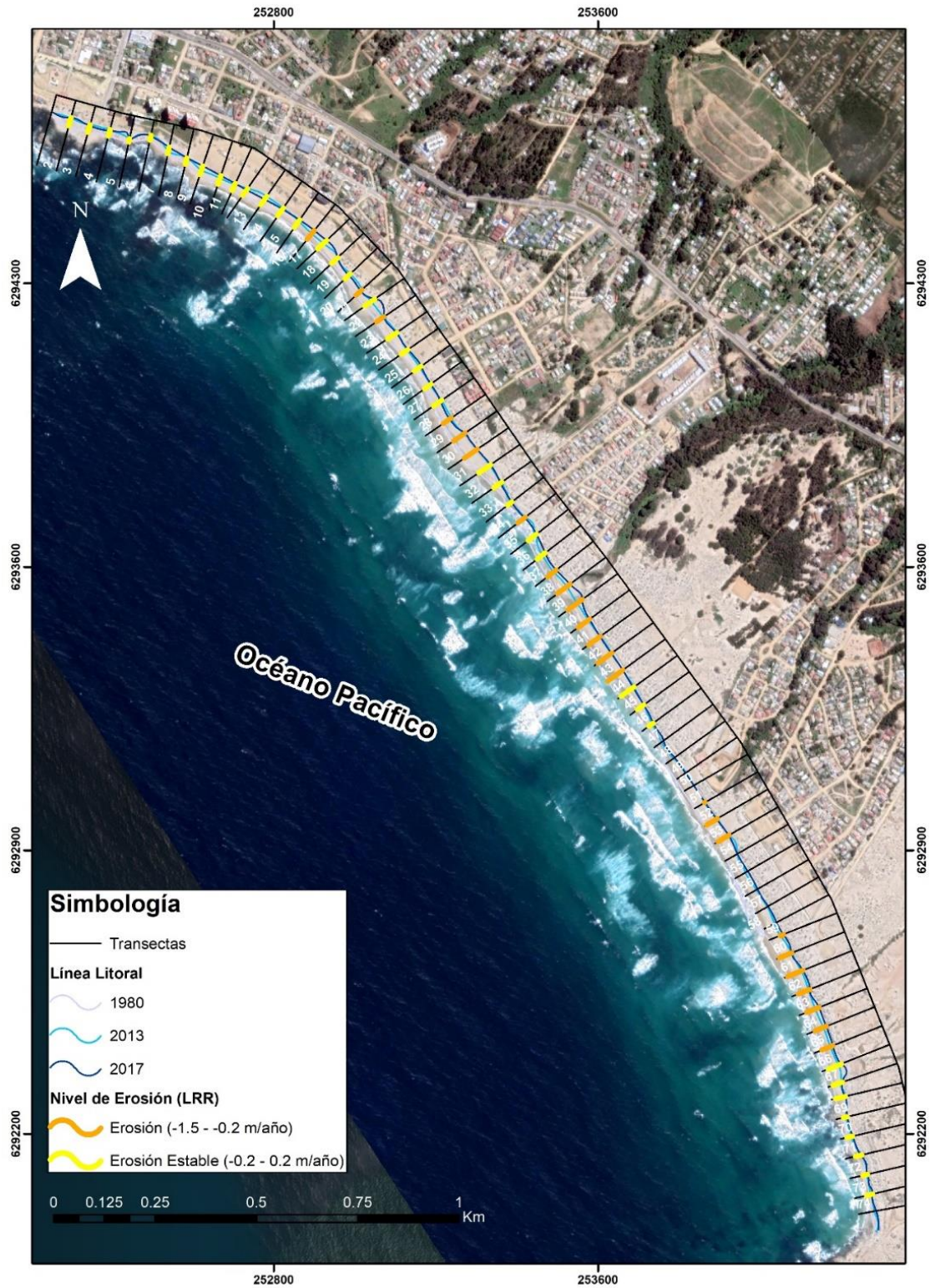
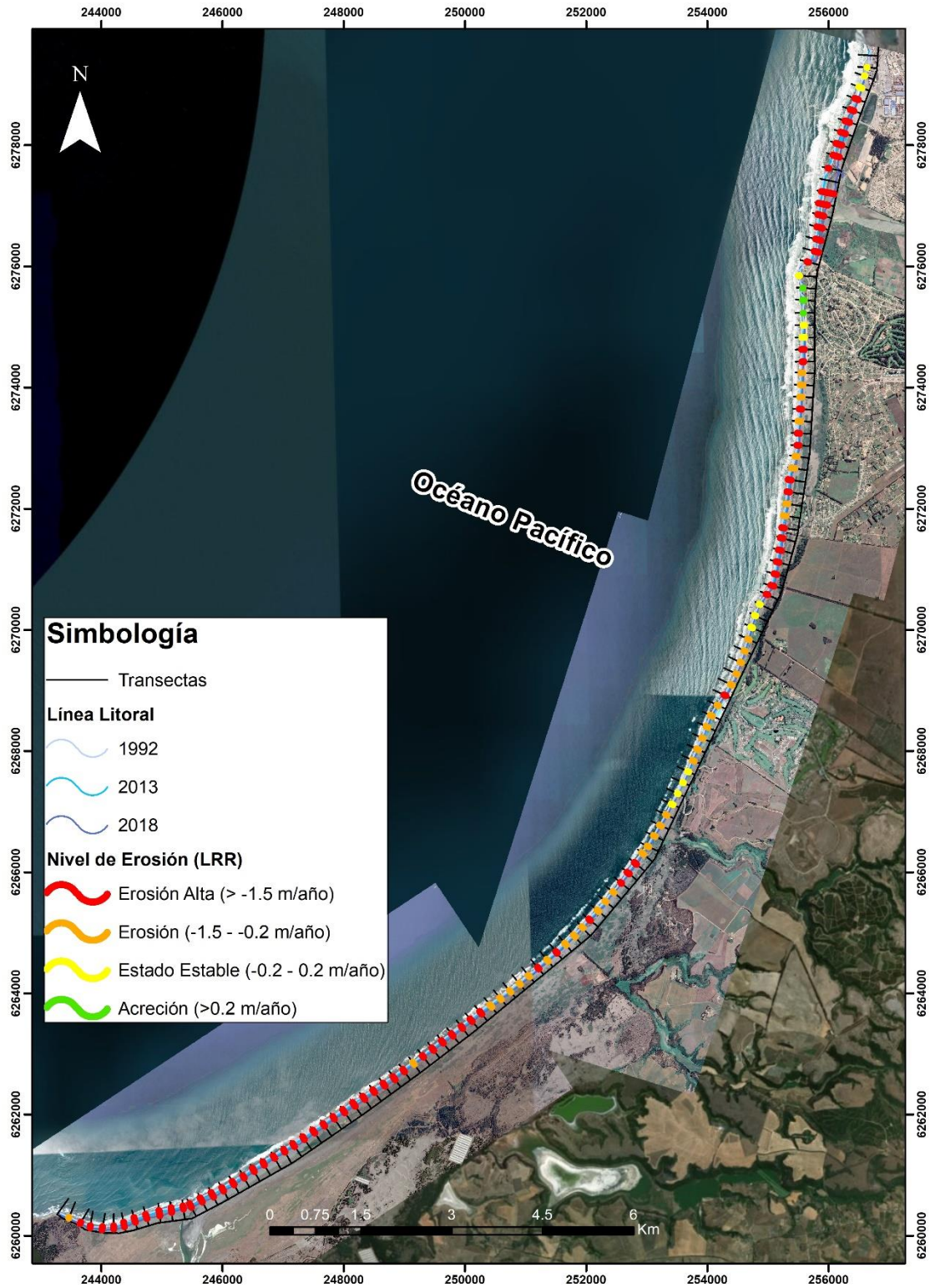


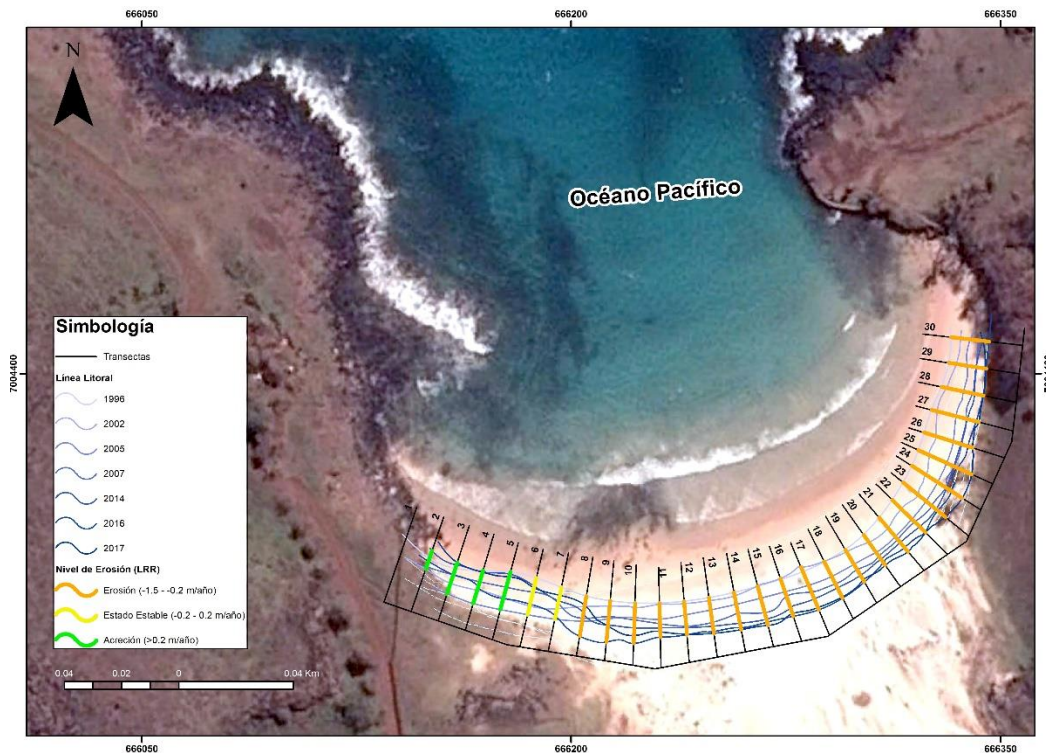
Figura 47: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, bahía de Santo Domingo (1992-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



### 3.3.4 Región de Valparaíso: Rapa Nui

En playa Anakena se determinó una tasa de cambio de  $-0,51$  m/año para el periodo 1996-2017 (21 años), clasificándose como “erosión” ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 48, la erosión predomina en el sector E mientras que en la zona W predomina la acreción. A pesar de ser una playa encajada de 241 m de largo, desarrolla un campo de dunas transgresivo de gran superficie, sobre los acantilados costeros. La playa de Ovahe (Figura 49), inmediatamente al Oeste de Anakena, ha experimentado una severa erosión en los últimos años.

**Figura 48: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Anakena (1996-2017).** La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



**Figura 49: Playa de Ovahe en 2007 y 2019** (Fuente: Izquierda: [www.summitpost.org/ovahe-beach-easter-island/312065](http://www.summitpost.org/ovahe-beach-easter-island/312065); Derecha: Patricio Winckler)



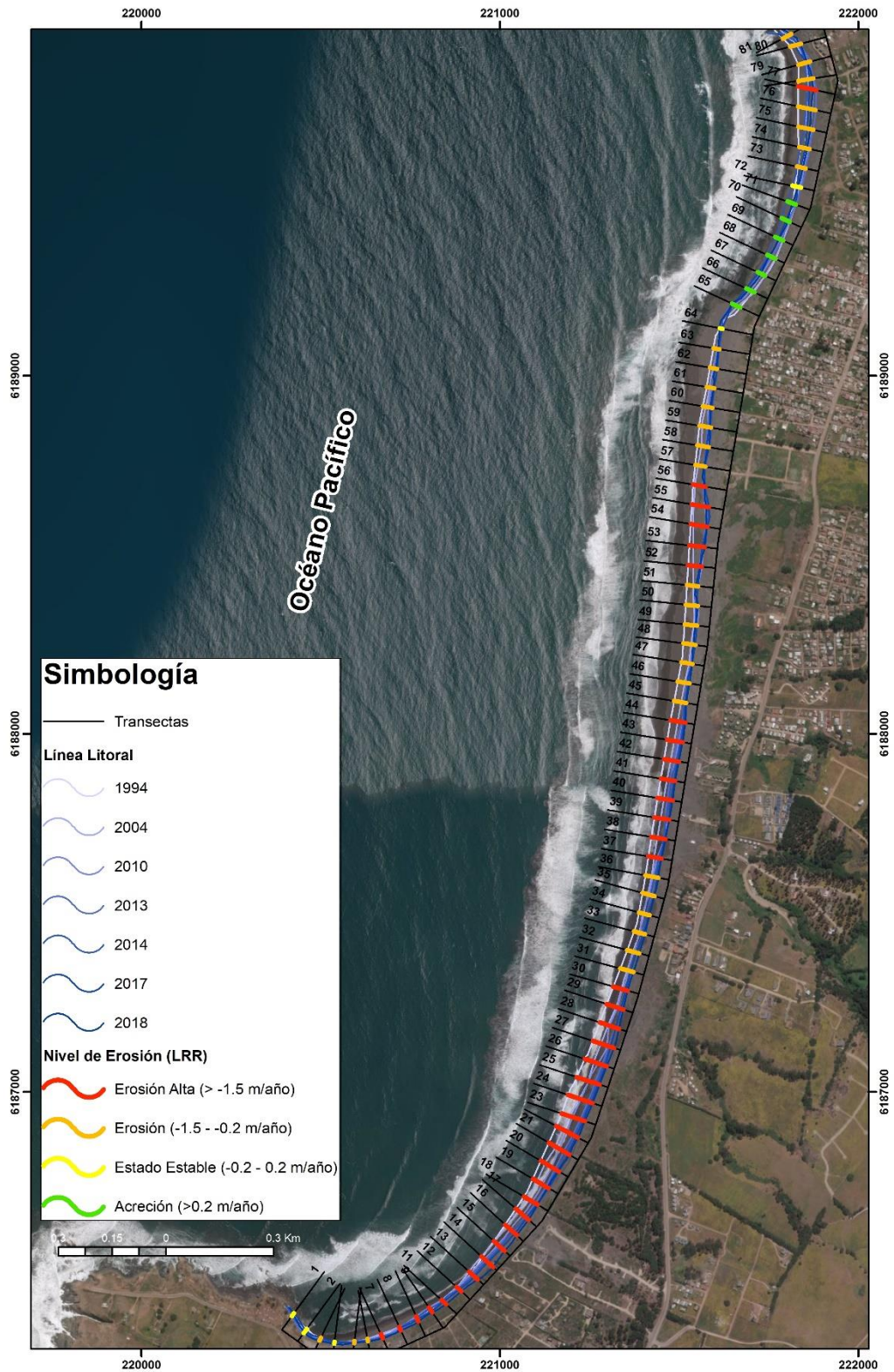


### **3.3.5 Región de O`Higgins: playa Pichilemu**

En playa Pichilemu se determinó una tasa de cambio de -1,30 m/año para el periodo 1994-2018 (24 años), clasificándose como “erosión” (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 50, los rangos predominantes son erosión alta y erosión, los cuales se presentan a lo largo de toda la playa, en especial la zona sur y media. Solo el extremo norte de la playa registra un reducido sector de acreción, favorecido por un sector rocoso. Esta playa corresponde a una ensenada (hedland bay), presenta 4,2 km de largo y una zona de rompiente intermedia-disipativa (barra y surco longitudinal). Presenta dunas vegetadas y drenaje local a través de esteros y quebradas, algunos de los cuales forman humedales. Es una zona altamente turística, en especial por su rompiente (surf), por ello sensible a erosión por causas naturales y antrópicas.

De acuerdo con investigaciones en curso realizadas por este grupo de trabajo, la playa de Pichilemu experimento una subsidencia del orden de los 40 cm producto del terremoto del 27 de febrero de 2010. Este mismo efecto se ha descrito para la bahía de Santo Domingo, donde los efectos tanto en la geomorfología de la playa así como en su morfodinámica fueron notables. Estos sistemas costeros actualmente describen altas tasas de erosión, cambios en el tamaño de grano de los sedimentos de playa (evidenciado cuantitativamente sólo en San Antonio) y características morfodinámicas contrastantes con el estado previo el terremoto y tsunami de 2010. Por ello, urge investigar la relación entre los ciclos sísmicos y los procesos evolutivos de la costa, en especial la erosión, con el fin de establecer medidas de mitigación que eviten el continuo deterioro de esta costa altamente valorada por su paisaje natural.

Figura 50: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Pichilemu (1994-2018). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



### **3.3.6 Región del Biobío**

#### **Playa Escuadrón**

En playa Escuadrón se determinó una tasa de cambio de  $-0,32$  m/año para el periodo 1992-2017 (25 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 51, los rangos predominantes son erosión y estado estable, los que se distribuyen a lo largo de toda la playa. Esta playa se inserta al interior del Golfo de Arauco, tiene forma rectilínea y se encuentra influida directamente por los aportes sedimentarios del río Biobío localizado en el extremo norte de la playa. Tiene 8,5 km de largo y presenta una zona de rompiente reflectiva con desarrollo de cusp de playa especialmente en la zona norte y media, hacia el sur la playa se hace reflectiva. Forma parte del Área Metropolitana de Concepción y se encuentra afectada por presiones antrópicas tales como crecimiento urbano, extracción de arenas, rellenos de humedales y rebajamiento de dunas.

#### **Bahía de San Vicente**

En el litoral arenoso de la bahía de San Vicente se determinó una tasa de cambio de  $-0,22$  m/año para el periodo 1992-2018 (26 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 52, los rangos predominantes son erosión y estado estable, los cuales se alternan a lo largo de la playa. Se presentan reducidos sectores con acreción en la zona norte y media de la bahía. Esta playa se inserta en un área de uso industrial y portuario, por lo cual se presenta con alta sensibilidad a la erosión costera.

#### **Litoral Arauco-Laraquete**

En el litoral arenoso de la bahía Arauco-Laraquete (Golfo de Arauco) se determinó una tasa de cambio de  $-1,11$  m/año para el periodo 1992-2017 (25 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 53, los rangos predominantes son erosión alta y erosión, los cuales se distribuyen a lo largo de toda la playa. Este litoral es uno de los más extensos del país, tiene 12,6 km de largo y se caracteriza por presentar un gran número de aportes locales (río Carampangue, río Laraquete) y quebradas intermitentes que se activan con las lluvias invernales. Aunque presenta desarrollo de humedales costeros y campos dunares, estos se encuentran con fuerte presión por procesos urbanos (peri-urbanos) y actividades económicas (termoeléctricas, forestal e industrial).

## **Bahía de Coronel**

En el litoral arenoso de la bahía Coronel se determinó una tasa de cambio de -0,49 m/año para el periodo 1982-2017 (35 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 54, predomina la erosión a lo largo de toda la bahía, presentando solo un reducido sector de acreción en su zona media. Este litoral tiene 1,7 km de largo y se inserta dentro de una zona de gran actividad industrial y portuaria. La playa Blanca, es una de las más reconocidas en la región, debido a que sus arenas provienen de aportes locales como lejanos (río Biobío), generando mezcla de arenas blancas y oscuras.

## **Playa Tubul**

En playa Tubul se determinó una tasa de cambio de 0,51 m/año para el periodo 1983-2017 (34 años), clasificándose como "acreción" ( $> +0.2$  m/año). De acuerdo a la Figura 55, los rangos predominantes son erosión en la zona marina (playa Tubul) y acreción hacia la zona estuarina. Esta playa tiene características particulares ya que se inserta en un sistema estuarino y humedal costero que fue afectado fuertemente por el terremoto y tsunami del 27/F de 2010, con un alzamiento costero de 1,4 m lo cual provocó el desecamiento del humedal Tubul-Raqui (Quezada et al., 2010; Martínez et al., 2012). La playa es rural, pero ha sido rápidamente transformada por la reconstrucción post-terremoto, agregándose infraestructura costera (muelle).

## **Playa Llico**

En playa Llico se determinó una tasa de cambio de 0,85 m/año para el periodo 1992-2017 (25 años), clasificándose como "acreción" ( $> +0.2$  m/año). De acuerdo a la Figura 56, solo el rango de acreción está distribuida en la playa. Llico tiene 2,2 km de largo, presenta numerosos aportes locales, entre ellos 2 esteros principales y una zona de rompiente reflectiva. Experimento un fuerte alzamiento costero (1,2 m) durante el terremoto del 27/F de 2010, lo cual puede corresponderse con la acreción determinada, ya que por ser un área rural el área no se encuentra afectada por presiones antrópicas de relevancia o por procesos de reconstrucción en la zona de la playa.

## **Bahía de Lebu**

En el litoral arenoso de la bahía de Lebu se determinó una tasa de cambio de -1,22 m/año para el periodo 1984-2017 (33 años), clasificándose como "erosión" (-0,2 y -1,5 m/año). De acuerdo a la Figura 57, los rangos predominantes son la erosión alta y la erosión, los cuales se distribuyen a lo largo de la playa. Se observa que la erosión disminuye de sur a norte en la bahía. El río Lebu que desemboca en la zona sur de la bahía, genera una importante fuente sedimentaria a la playa, sin embargo esta se encuentra con una fuerte erosión. Este sector fue afectado por un alzamiento costero de 1,8 m durante el terremoto del 27 de febrero de 2010 lo cual provocó el ensanchamiento de la playa en 100 m, lo cual se sabe que se mantuvo hasta 2015 (Martínez et al., 2015). La playa tiene 2,8 km de largo y una zona de rompiente intermedia-disipativa, siendo

una playa urbana que combina la actividad de pesca artesanal con el turismo de playa.

### **Litoral Lebu-Tirúa**

En el litoral arenoso Lebu-Tirúa se determinó una tasa de cambio de  $-1,39$  m/año para el periodo 2013-2016 (3 años), clasificándose como "erosión" ( $-0,2$  y  $-1,5$  m/año). De acuerdo a la Figura 58, los rangos predominantes son la erosión alta y la erosión, los cuales se intercalan con sectores de acreción. Este litoral es uno de los más extensos del país, tiene 58 km de largo y está asociado al desarrollo de grandes campos dunares, estuarios costeros y humedales.

Figura 51: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, playa Escudrón (1992-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

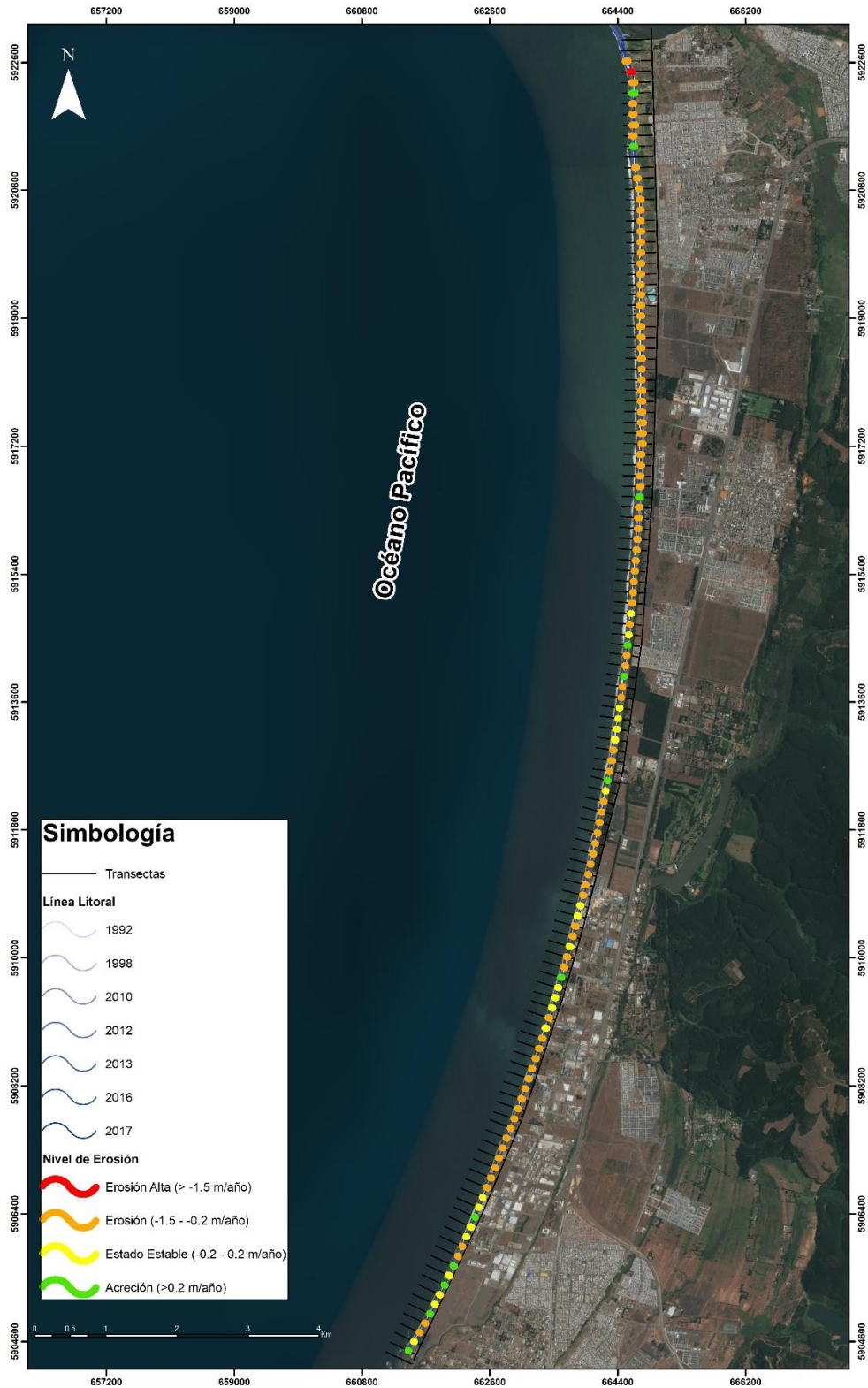


Figura 52: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, bahía de San Vicente (1992-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

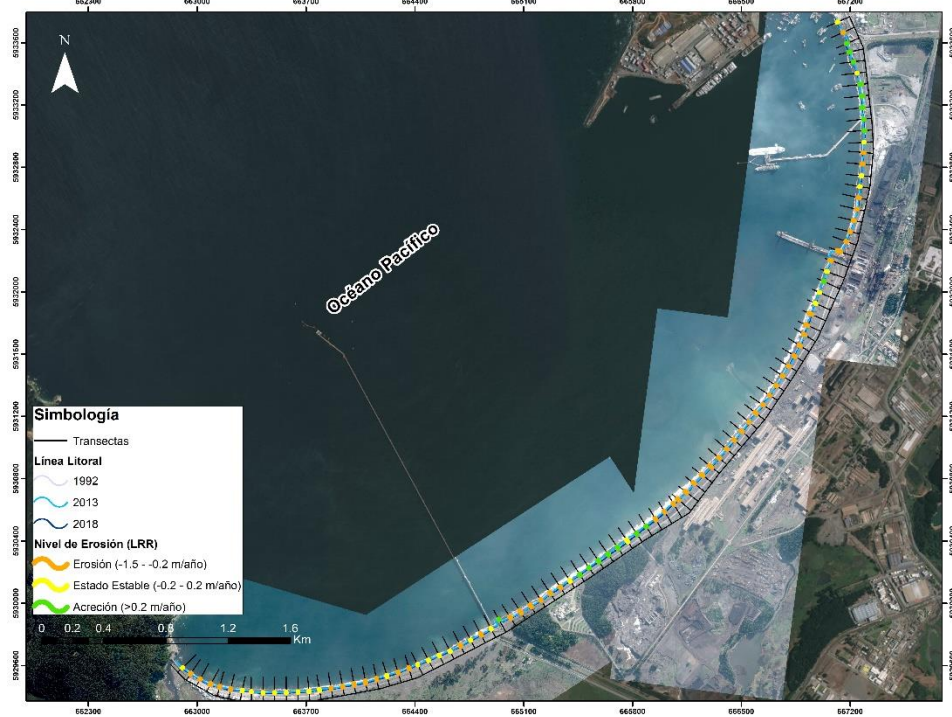


Figura 53: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, litoral Arauco-Laraquete (1992-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

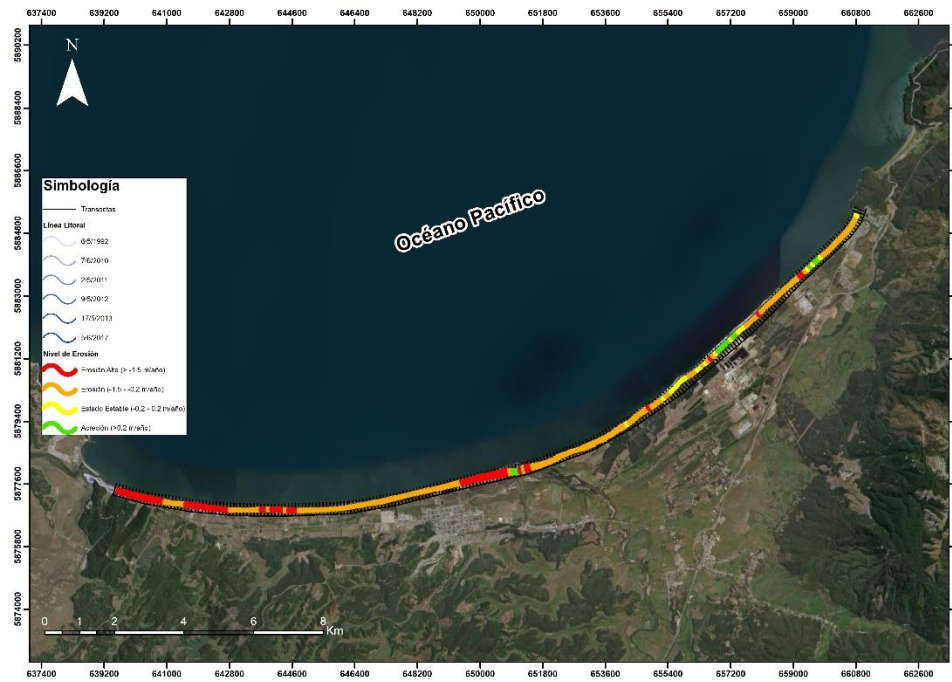


Figura 54: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, bahía de Coronel (1982-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.





Figura 55: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, Tubul (1983-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



Figura 56: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, Llico (1992-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

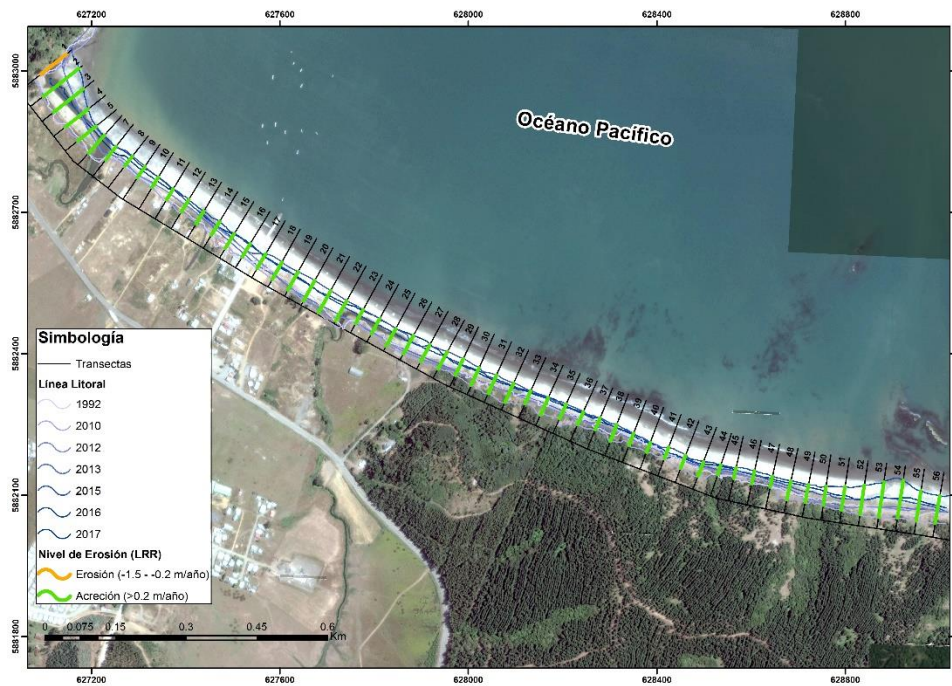


Figura 57: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, bahía de Lebu (1984-2017). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.

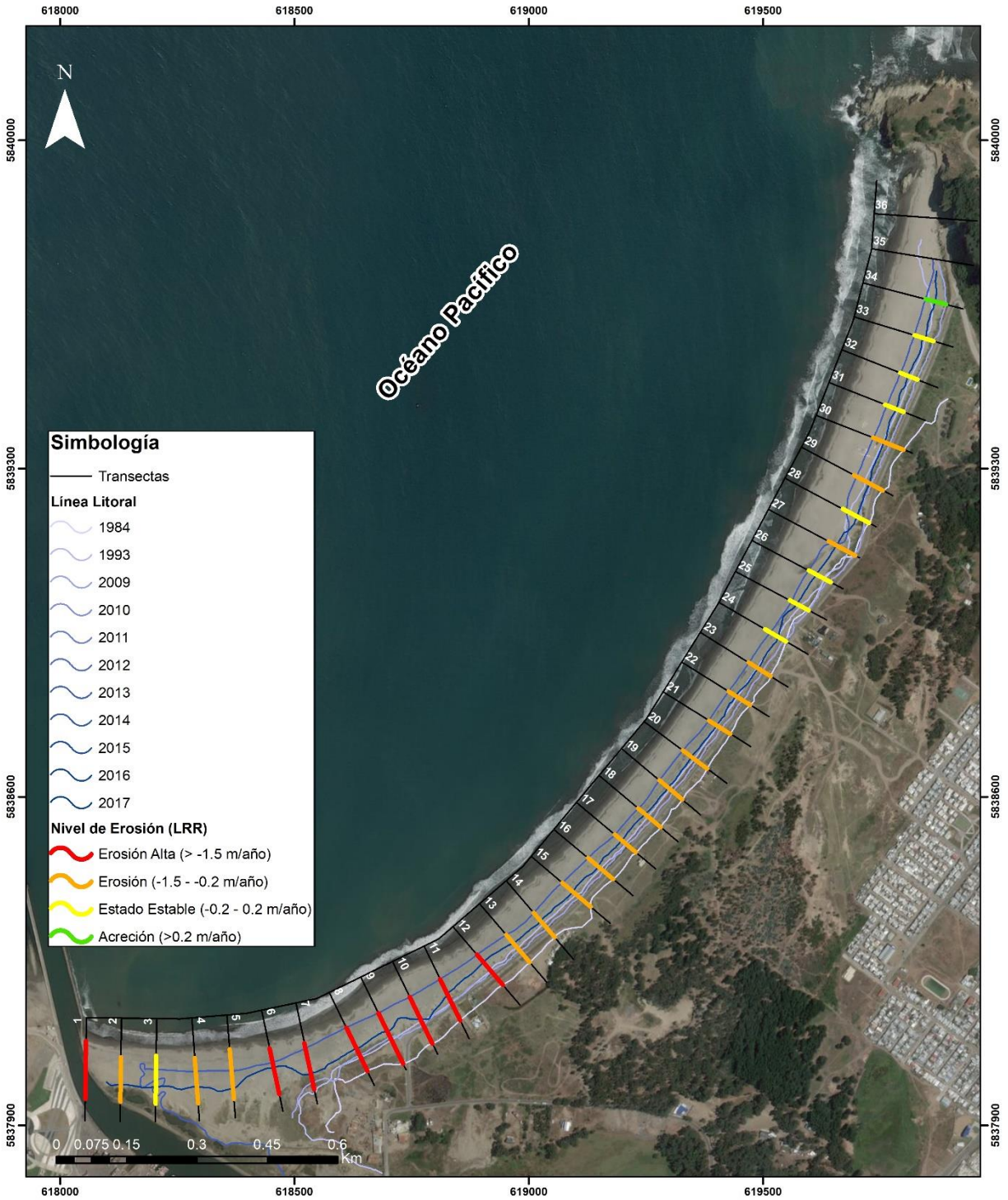
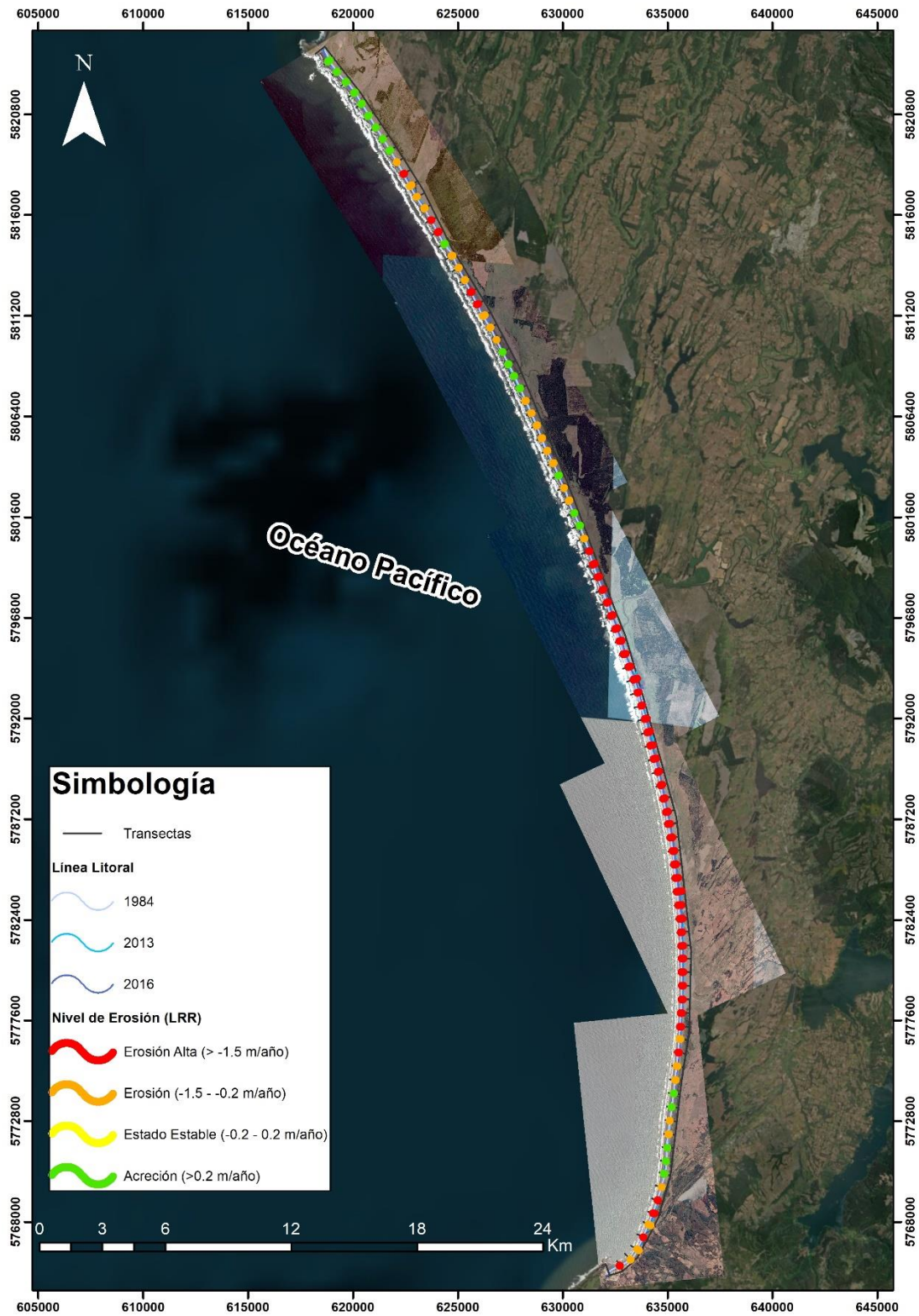


Figura 58: Cambios espacio-temporales de la línea litoral, Lebu-Tirúa (2013-2016). La longitud de cada barra representa el rango entre el perfil más y el menos erosionado.



## 4 RIESGO DE EROSIÓN EN PLAYAS

En esta sección se efectúa una clasificación de las 35 playas indicadas en la sección anterior, cuyo objetivo será evaluar impactos debidos al cambio climático como la erosión o el giro en planta. En este informe se incluye el catastro (ya presentado en el Informe 2) además de la metodología a seguir para la estimación de las tasas de retroceso/avance de la línea litoral.

### 4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PLAYAS

Debido a su extensión, algunas de las playas incluidas en la Tabla 1 se analizan en diferentes secciones, según se indica a continuación:

- La Serena: Sector norte, centro y sur
- Quintero: Sector norte y centro
- Bahía de Concón: Ritoque y Mantagua
- Santo Domingo: Santo Domingo, El Yali sector norte y El Yali sector sur
- Bahía de San Vicente: Talcahuano y Hualpén

Para la clasificación se utilizaron imágenes de Google Earth Pro de los últimos 5 años (21/dic/2014 a la fecha). El objeto de usar varios años es evitar efectos que dependen del momento exacto donde se tomó la imagen de cada playa. Asimismo, se seleccionó sólo una imagen en cada período estival (21/dic al 21/mar). Cabe mencionar que no siempre estuvieron disponibles para todos los años del período considerado en todas las playas.

Las variables registradas se incluyen en la Tabla 4 en tanto que el listado de fotografías por playa se presenta en la Tabla 5. Las variables se estimaron como el promedio aproximado de las imágenes disponibles de los últimos 5 años. En caso de haber muchas diferencias dentro de ese período, éstas se detallan mediante rangos indicados en cada columna. El registro de estas variables se incluye en la Tabla 6 y Tabla 7.

**Tabla 4: Variables utilizadas para clasificar las playas.**

<b>Variable</b>	<b>Clasificación</b>
Tipo de playa	Urbana Urbana-Periurbana Industrial Periurbana Rural
Longitud	Unidad: [m]
Ancho	Unidad: [m]
Área	Unidad: [m <sup>2</sup> ]
Orientación del frente de playa	Unidad: [°]
Zona de surf + Zona de swash	Unidad: [m]
Longitud onda de cusps	Unidad: [m]
Forma en planta	Confinamiento lateral rígido Rectilínea Elíptica Encajada Con desembocadura adyacente
Tipo zona rompiente	Disipativa Disipativa - Intermedia Intermedia con barra intermedia rítmica Intermedia con terraza Intermedia Intermedia - Reflectiva Disipativa – Intermedia - Reflectiva Reflectiva
Tipo de barra	No existe Una Múltiple
Forma de la barra	No existe Lineal Lineal-Rítmica 3D Intersectada Rítmica 3D
Drenaje	Curso permanente: estero local Curso permanente: río andino Curso permanente: río Curso intermitente No
Campos dunares	Dunas de playa sin vegetación Dunas de playa con vegetación Antedunas Barjanes Dunas transgresivas Dunas remanentes Erg No
Sedimento	Grava Arena dorada Arena negra

Tabla 5: Listado de fotografías seleccionadas para cada playa.

Región	Núm.	Nombre playa	Fechas de imágenes (período estival)			
			2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018
<b>Antofagasta</b>	1	Hornitos	-	-	12/03/2017	-
<b>Coquimbo</b>	2	La Serena	21/02/2015	21/12/2015	19/02/2017	15/01/2018
	3	La Herradura	21/02/2015	21/12/2015	19/02/2017	02/12/2017
	4	Guanaqueros	-	-	18/01/2017	-
<b>Valparaíso</b>	5	Los Molles	-	27/02/2016	-	08/03/2018
	6	Pichicuy	-	27/02/2016	-	08/03/2018
	7	Maitencillo	13/03/2015	27/02/2016	29/03/2017	14/03/2018
	8	Quintero	27/01/2015	15/01/2016	19/01/2017	15/03/2018
	9	Bahía de Concón	27/01/2015	15/01/2016	19/01/2017	05/01/2018
	10	Cochoa	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	08/03/2018
	11	El Encanto	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	08/03/2018
	12	Reñaca	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	08/03/2018
	13	Las Cañitas	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	08/03/2018
	14	Las Salinas (playa chica)	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	08/03/2018
	15	Los Marineros	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	08/03/2018
	16	Miramar	27/01/2015	12/01/2016	06/01/2017	11/03/2018
	17	Caleta Abarca	27/01/2015	07/03/2016	04/01/2017	11/03/2018
	18	Caleta Portales	27/01/2015	07/03/2016	04/01/2017	11/03/2018
	19	Las Torpederas	27/01/2015	07/03/2016	06/01/2017	25/12/2017
	20	San Mateo <sup>7</sup>	27/01/2015	07/03/2016	11/01/2017	25/12/2017
	21	Tunquén	14/03/2015	21/02/2016	26/02/2017	-
	22	Algarrobo	14/03/2015	26/02/2016	26/02/2017	10/02/2018
	23	El Quisco (playa El Quisco Norte)	-	26/02/2016	26/02/2017	10/02/2018
	24	Cartagena (playa El Tabo)	-	26/02/2016	26/02/2017	10/02/2018
		Cartagena (playa Cartagena)	-	21/02/2016	-	10/02/2018
	25	Las Cruces	-	26/02/2016	26/02/2017	10/02/2018
	26	Santo Domingo (Santo Domingo)	-	17/02/2016	-	10/02/2018
Santo Domingo (El Yali, norte)		-	17/02/2016	-	10/02/2018	
Santo Domingo (El Yali, sur)		-	17/02/2016	-	-	
27	Anakena	-	-	-	05/07/2017	
<b>O'Higgins</b>	28	Pichilemu (Punta de Lobos)	-	-	31/01/2017	-
<b>Biobío</b>	29	Escuadrón	14/03/2015	14/02/2016	12/01/2017	22/01/2018
	30	Bahía San Vicente	14/03/2015	16/01/2016	12/01/2017	21/01/2018
	31	Bahía Coronel (playa Blanca)	14/03/2015	16/01/2016	12/01/2017	11/01/2018
	32	Arauco - Laraquete	02/01/2015	14/02/2016	-	22/01/2018
	33	Tubul	-	14/02/2016	-	-
	34	Llico	-	14/02/2016	-	-
	35	Bahía de Lebu	-	14/02/2016	-	-
	36	Lebu - Tirúa	07/01/2015	27/02/2016	-	-

<sup>7</sup> La playa de San Mateo no se analizó finalmente.

Tabla 6: Registro de variables utilizadas para clasificar las playas.

Núm.	Nombre playa	Tipo	Forma planta	Longitud (m)	Ancho o rango (m)	Área o rango (m <sup>2</sup> )	Orientación del frente de playa (°)
1	Hornitos	Rural	Rectilínea	6400	39 147	555.5	Norte: 257 Centro: 266 Sur: 305
2	La Serena (norte)	Urbana	Rectilínea	18850	44 108	1214620	266
	La Serena (centro)						290
	La Serena (sur)						330
3	La Herradura	Urbana	Encajada	1574	26 95	78800	325
4	Guanaqueros	Urbana- Periurbana	Rectilínea	5900	25 86	382596	325
5	Los Molles	Periurbana	Elíptica	1460	20 80	42245 54354	199
6	Pichicuy	Periurbana	Elíptica	2184	10 120	129128	228
7	Maitencillo	Urbana	Encajada	224	13 25	3483	335
8	Quintero (norte)	Urbana	Elíptica	7360	13 85	216458 413982	252
	Quintero (centro)	Industrial	Rectilínea				290
	Quintero (sur)	Periurbana	Rectilínea				340
9	Bahía de Concón (Ritoque)	Rural	Rectilínea	7538	10 132	403212	264
	Bahía de Concón (Mantagua)	Periurbana	Rectilínea	2854	12 100	101335	Mitad: 270 Sur: 310
10	Cochoa	Urbana	Encajada	160	11 46	3214 7944	315
11	El Encanto	Urbana	Confinamiento lateral rígido	232	9 26	5494 9590	257
12	Reñaca	Urbana	Rectilínea	1300	20 70	70488 72216	264
13	Las Cañitas	Periurbana	Confinamiento lateral rígido	185	13 28	4193	275
14	Las Salinas (playa chica)	Urbana	Encajada	190	20 40	7324	290
15	Los Marineros	Urbana	Rectilínea	2680	25 68	125889	Norte: 278 Sur: 300
16	Miramar	Urbana	Confinamiento lateral rígido	117-147	14 21	1517 1921	325
17	Caleta Abarca	Urbana	Rectilínea	420	18 33	11570	312

Núm.	Nombre playa	Tipo	Forma planta	Longitud (m)	Ancho o rango (m)	Área o rango (m <sup>2</sup> )	Orientación del frente de playa (°)
18	Caleta Portales	Urbana	Rectilínea	633	0 83	11718 20736	330
19	Las Torpederas	Urbana	Confinamiento lateral rígido	95	38	3460	333
20	San Mateo	Urbana	Confinamiento lateral rígido	300	0 56	6826	17
21	Tunquén	Rural	Rectilínea	2184	10 68	71252 87616	241
22	Algarrobo	Urbana	Rectilínea	2484	39 97	153137	275
23	El Quisco (Playa El Quisco Norte)	Urbana	Encajada	1050	43 107	65410	295
24	Cartagena (playa El Tabo)	Periurbana	Rectilínea	2869	10 80	143558	230
	Cartagena (playa Cartagena)	Urbana	Rectilínea	1587	15 90	49814 80970	266
25	Las Cruces	Periurbana	Encajada	376	47 53	14161	224
26	Santo Domingo (Santo Domingo)	Urbana- Periurbana	Rectilínea	7035	10 88	513612	285
	Santo Domingo (El Yali, norte)	Rural	Rectilínea	14772			321
	Santo Domingo (El Yali, sur)	Rural	Rectilínea				305
27	Anakena	Rural	Encajada	241	12 40	7273	344
28	Pichilemu (Punta de Lobos)	Periurbana	Elíptica	4201	10 90	230996	287 Sur: 333
29	Escuadrón	Urbana- Periurbana	Rectilínea	8555	25 40	278347	286
30	Bahía San Vicente (Talcahuano)	Industrial	Rectilínea	3262,00	6 38	84960	313
	Bahía San Vicente (Hualpén)	Periurbana	Rectilínea	2198	9 41	48662	348
31	Bahía Coronel (playa Blanca)	Periurbana	Rectilínea	1790	20 107	92248	293
32	Arauco - Laraquete	Urbana- Periurbana	Rectilínea	12658,00	49 86	696862	322
33	Tubul	Periurbana	Con desembocadura adyacente	1227	9 52	41250	50
34	Llico	Rural	Rectilínea	2257	25 44	70510	25
35	Bahía de Lebu	Periurbana	Encajada	2862	68 126	270026	310
36	Lebu - Tirúa	Rural	Rectilínea	4283,00	43 130	349227	264



Tabla 7: Registro de variables utilizadas para clasificar las playas (continuación).

Núm.	Nombre playa	Zona de surf + swash (m)	Longitud onda de cusps (m)	Tipo zona rompiente	Barra		Drenaje	Campos dunares	Sedimento
					Tipo	Forma			
1	Hornitos	35 145	47 78 (sólo en zona central)	Intermedia con barra	Una	Lineal	No	No	Arena dorada
2	La Serena (norte)	150 300	200 400 (Megacusps)	Disipativa	No	No	Curso permanente: estero local	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada
	La Serena (centro)	35 200	30 50	Intermedia	No	No	Curso permanente: río andino	No	Arena dorada
	La Serena (sur)	10 50	20 30	Reflectiva	No	No	Curso permanente: estero local	No	Arena dorada
3	La Herradura	15 26	20 40	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
4	Guanaqueros	10 20	15	Reflectiva	No	No	No	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada
5	Los Molles	35 195	0 25	intermedia rítmica	No	No	Curso intermitente	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada
6	Pichicuy	72 205	Cusps: 30 55 Megacusps: 163 220	Disipativa-Intermedia	No	No	Curso intermitente	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada
7	Maitencillo	17 40	20 30	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
8	Quintero (norte)	20 100	15 38	Intermedia	Una	Lineal	Curso permanente: estero local	No	Arena dorada
	Quintero (centro)	35 105	13 30	Intermedia			No		
	Quintero (sur)	15 67	14 24	Reflectiva			No		
9	Bahía de Concón (Ritoque)	93 434	Cusps: 30 56; Megacusps: 150 380	Disipativa-Intermedia	Una	Lineal-Rítmica 3D	Curso permanente: estero local	Dunas transgresivas	Arena dorada
	Bahía de Concón (Mantagua)	30 420	Cusps: 24 44; Megacusps: 200	Disipativa-Intermedia	Una	Lineal-Rítmica 3D	Curso permanente: río andino	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada

Núm.	Nombre playa	Zona de surf + swash (m)	Longitud onda de cusps (m)	Tipo zona rompiente	Barra		Drenaje	Campos dunares	Sedimento
					Tipo	Forma			
10	Cochoa	10 22	-	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
11	El Encanto	71 90	35 40	Reflectiva			No	No	Arena dorada
12	Reñaca	29 71	40 50 Megacusps: 100	Intermedia-Reflectiva	Una	Rítmica 3D	Curso permanente: estero local	No	Arena dorada
13	Las Cañitas	20 36	-	Intermedia-Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
14	Las Salinas (playa chica)	3 26	-	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
15	Los Marineros	4 15	24 50	Reflectiva	No	No	Curso permanente: estero local	No	Arena dorada
16	Miramar	6 38	-	Intermedia-Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
17	Caleta Abarca	-	35 39	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
18	Caleta Portales	-	27 34	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
19	Las Torpederas	-	-	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
20	San Mateo	7	8 11	Reflectiva	No	No	No	No	Arena dorada
21	Tunquén	155 310	Megacusps: 200 313	Intermedia-Reflectiva	Múltiple	Rítmica 3D	Curso permanente: estero local	Dunas transgresivas	Arena dorada
22	Algarrobo	15 60	48 60	Intermedia-Reflectiva	No	No	Curso permanente: estero local	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada
23	El Quisco (Playa El Quisco Norte)	19 30	-	Reflectiva	No	No	Curso intermitente	No	Arena dorada
24	Cartagena (playa El Tabo)	110 370	Cusps: 29 61 Megacusps: 225 581	Disipativa	Una	Rítmica 3D	No	Dunas transgresivas	Arena dorada
	Cartagena (playa Cartagena)	83 195	25 50	Disipativa-Intermedia-Reflectiva	Una	Rítmica 3D	Curso permanente: estero local	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada
25	Las Cruces	7 33	40	Reflectiva	No	No	No	Dunas de playa con vegetación	Arena dorada

Núm.	Nombre playa	Zona de surf + swash (m)	Longitud onda de cusps (m)	Tipo zona rompiente	Barra		Drenaje	Campos dunares	Sedimento
					Tipo	Forma			
26	Santo Domingo (Santo Domingo)	135 270	10 40	Intermedia	Una	Lineal	No	Dunas de playa con vegetación	Grava
	Santo Domingo (El Yali, norte)			Intermedia	Una	Lineal	No	Dunas transgresivas	Arena negra
	Santo Domingo (El Yali, sur)			Intermedia	Una	Lineal	Curso permanente: estero local	Dunas transgresivas	Arena negra
27	Anakena	24 33	-	Reflectiva	No	No	No	Dunas transgresivas	Arena dorada
28	Pichilemu (Punta de Lobos)	140 240	-	Disipativa-Intermedia	Una	Lineal-Rítmica 3D	No	No	Arena negra
29	Escuadrón	15 65	50 78	Reflectiva	No	No	No	No	Arena negra
30	Bahía San Vicente (Talcahuano)	12 30	18 45	Reflectiva	No	No	No	No	Arena negra
	Bahía San Vicente (Hualpén)	10 36	22 47	Reflectiva	No	No	Curso permanente: estero local	No	Arena negra
31	Bahía Coronel (playa Blanca)	15 80	17 30	Intermedia-Reflectiva	No	No	No	No	Arena negra
32	Arauco - Laraquete	13 84	25 44	Intermedia-Reflectiva	Una	Lineal-Rítmica 3D	Curso permanente: río	Dunas remanentes	Arena negra
33	Tubul	15 45	-	Reflectiva	No	No	Curso permanente: río	No	Arena dorada
34	Llico	18 41	-	Reflectiva	No	No	Curso permanente: estero local	No	Arena dorada
35	Bahía de Lebu	32 107	30 44	Reflectiva	No	No	Curso permanente: río andino	Dunas de playa con vegetación	Arena negra
36	Lebu – Tirúa	93 250	40 61	Intermedia	Múltiple	Lineal	Curso permanente: río andino	Dunas transgresivas	Arena negra

## 4.2 ESTIMACIÓN DE CAMBIOS ESPERADOS EN LA LÍNEA LITORAL

A partir de las proyecciones del nivel medio del mar absoluto NMMA y del clima del oleaje operacional (definido por el percentil 50%) y extremo (definido por el percentil 99%) local, se evalúan los cambios en estas variables entre el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045), de modo de estimar los cambios morfológicos en las playas.

La estadística del oleaje para el período histórico y proyección se propagan desde aguas profundas hasta profundidades entre 10 y 20 metros siguiendo dos metodologías, dependiendo de la disponibilidad de información en cada playa:

1. **Metodología simplificada:** Propagaciones con datos cada 5 km en sentido latitudinal entre Arica y el Canal de Chacao. Esta metodología se efectúa mediante la Ley de Snell y teoría lineal del oleaje, considerando los efectos de asomeramiento y refracción que experimenta el oleaje en su propagación. Los efectos de difracción y reflexión que pueden predominar en playas encajadas o aquellas cercanas a salientes o bordes costeros rocosos no son considerados en el clima local de oleaje. Esta metodología se usa para obtener valores de retroceso/avance y giro de las líneas de costa, sin hacer diferenciación de las características específicas de cada playa (tamaño de sedimento y altura de la berma). Los estadísticos usados en el análisis de cambio de la línea litoral corresponden al percentil 50% para condiciones medias y el percentil 99% para condiciones más energéticas, pero no necesariamente extremas.
2. **Metodología detallada:** Propagaciones detalladas a cada playa analizada mediante el método de transferencia espectral del oleaje, que considera los procesos relevantes que experimenta el oleaje entre aguas profundas y la zona cercana a la playa (asomeramiento, refracción, difracción y rotura). Esta metodología se usa para analizar aquellas playas donde la calidad de la batimetría en las cartas náuticas provee de datos de altura, período y dirección específicos. El estadístico usado para estos casos es el percentil 50% o mediana temporal del período proyectado entre 2026-2045.

### 4.2.1.1 Retroceso/avance de la línea litoral

El retroceso o avance de la línea litoral se calcula mediante la fórmula de Brunn (1962)

$$R = W \frac{S}{B+h^*} \quad (1)$$

la cual depende del cambio del nivel de mar y de las condiciones del oleaje a través de la profundidad de cierre,  $h^*$  (Birkemeier, 1985)

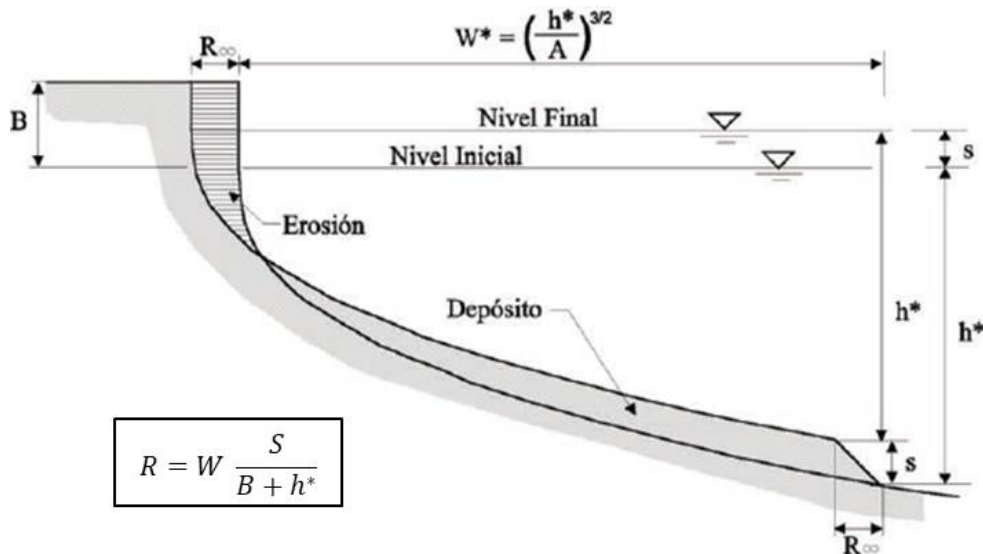
$$h^* = 1,75H_{s12} - 57,9 \left( \frac{H_{s12}^2}{gT_s^2} \right) \quad (2)$$

Donde  $S$  es el aumento del nivel del mar y  $W$  es la distancia horizontal de la línea de costa a la profundidad de cierre ( $h^*$ ), evaluada como

$$W = \left(\frac{h^*}{A}\right)^{3/2} \quad (3)$$

$A$  es el parámetro de forma del perfil de equilibrio de Dean (1977), siendo  $A(m^{1/3}) = Kw^{0.44} (m/s)$ , con  $K = 0.51$ .  $B$  es la altura de la berma,  $H_{s12}$  es altura de ola significativa que es excedida doce horas al año y  $T_s$  es el período peak asociado a  $H_{s12}$ .

Figura 59: Esquema de la regla de Bruun que muestra el perfil de equilibrio actual y el perfil futuro debido al aumento del nivel del mar. Extraída de CEPAL (2012).



A partir de las tendencias estimadas de ascenso del NMMMA y variaciones de la estadística de la altura y el período del oleaje, se calculan los retrocesos de las líneas de costa para el efecto conjunto. El tamaño de sedimento ( $D_{50}$ ) y la altura de la berma ( $B$ ) son datos necesarios pero desconocidos para la mayoría de las playas a analizar. El cálculo para ambas metodologías se describe a continuación:

- **Metodología simplificada:** se calcula el retroceso de la línea de costa para tres tamaños de sedimento y cuatro alturas de berma, según se expone en Cepal (2012).
- **Metodología detallada:** se usan los mismos tamaños de sedimento y alturas de berma que en la metodología simplificada, excepto en aquellas playas donde sí existen datos específicos de estos parámetros para estos cálculos.

#### 4.2.2 Pivoteo en planta de la línea litoral

El pivoteo (giro o basculamiento) de la línea de playa depende de los cambios en la dirección del oleaje que ocurre entre el período histórico y la proyección. El cálculo para ambas metodologías se describe a continuación:

- **Metodología simplificada:** se calcula la diferencia entre la dirección del oleaje a 20 metros de profundidad entre ambos períodos de tiempo, tanto para los percentiles percentil 50% y 99% que representarían, respectivamente, los cambios en la condiciones modales y más energéticas, pero no necesariamente extremas, de la playa.
- **Metodología detallada:** se calcula la diferencia entre la dirección del oleaje a 10 o 20 metros de profundidad, dependiendo de la calidad de la batimetría disponible, entre ambos períodos de tiempo, para todos los estados de mar (esto es sin restringirse a ciertos percentiles).

#### 4.2.3 Obtención de $H_s$ 12% a partir de $H_s$ 99%

Los cálculos de retroceso o avance de la línea litoral requieren de los datos de altura significativa que es superada 12 horas al año ( $H_{s12}$ ), correspondiente a aquel valor cuya probabilidad de no excedencia es 99.863%. El cálculo para ambas metodologías se describe a continuación:

- **Metodología simplificada:** Para obtener el parámetro ( $H_{s12}$ ), se calcularon las correlaciones del estadístico  $H_{s99\%}$  con el  $H_{s99.863\%}$  del total de los registros históricos de altura significativa y período obtenidos del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016) cada 2° de latitud para el período 1980-2015. Los datos de  $H_{s99\%}$  se calcularon tanto para el período histórico como para las proyecciones, por lo que una vez obtenidas las correlaciones se podrá pasar de un estadístico al otro mediante las expresiones:

$$H_{s99.863\%} = C_H \times H_{s99\%} \qquad T_{s99.863\%} = C_T \times T_{s99\%} \qquad (4)$$

Los coeficientes que correlacionan estas variables se presentan en la Tabla 36.

**Tabla 8: Coeficientes de correlación entre estadísticos de altura de ola y período.**

Nodo	Nodo	$C_H$	$C_T$
Nodo 1 (19°S,-72°W)	Arica	1,1573	1,0926
Nodo 2 (21°S,-72°W)	Iquique	1,1435	1,0997
Nodo 3 (23°S,-72°W)	Mejillones.txt	1,1504	1,0972
Nodo 4 (25°S,-72°W)	Taltal	1,1696	1,0948
Nodo 5 (27°S,-72°W)	Bahía Inglesa	1,1346	1,1051
Nodo 6 (29°S,-73°W)	Huasco	1,1701	1,1186
Nodo 7 (31°S,-73°W)	Tongoy	1,1623	1,1015
Nodo 8 (33°S,-73°W)	Valparaíso	1,1772	1,0968
Nodo 9 (35°S,-73°W)	Constitución	1,2210	1,0922
Nodo 10 (37°S,-75°W)	Talcahuano	1,3286	1,0789
Nodo 11 (39°S,-75°W)	Puerto Saavedra	1,2923	1,0794
Nodo 12 (41°S,-75°W)	Bahía Mansa	1,2306	1,0831

Nodo	Nodo	$C_H$	$C_T$
Nodo 13 (43°S,-76°W)	Chiloé	1,2805	1,0862
Nodo 14 (45°S,-76°W)	Archipiélago de Los Chonos	1,2810	1,0840
Nodo 15 (47°S,-77°W)	Golfo de Penas	1,2604	1,0913
Nodo 16 (49°S,-77°W)	Isla Esmeralda	1,1751	1,0879
Nodo 17 (51°S,-77°W)	Isla Diego de Almagro	1,1748	1,0865
Nodo 18 (53°S,-76°W)	Isla Contreras	1,1769	1,0862
Nodo 19 (55°S,-73°W)	Isla London	1,2126	1,0923
Nodo 20 (27°S,-81°W)	Islas Desventuradas	1,2702	1,0841
Nodo 21 (28°S,-110°W)	Isla de Pascua	1,1786	1,0790
Nodo 22 (35°S,-81°W)	Archipiélago de Juan Fernández	1,2836	1,0841

- **Metodología detallada:** el estadístico  $H_s$  99,863% se obtuvo de la serie de oleaje transferida espectralmente a las mismas, siendo más precisos los resultados obtenidos para estas playas específicas. El detalle del procedimiento de transformación de oleaje desde aguas profundas a las zonas portuarias se describe en el Anexo 7.1.

#### 4.2.4 Resultados

Se presentan primero los resultados para el contexto general de la costa de Chile entre Arica y el Canal Chacao mediante la metodología simplificada, y después los resultados específicos para playas seleccionadas mediante la metodología detallada. Esta metodología busca estimar i) el retroceso y ii) el pivoteo de la línea litoral que se espera para la proyección (2026-2045) respecto del período histórico (1985-2004).

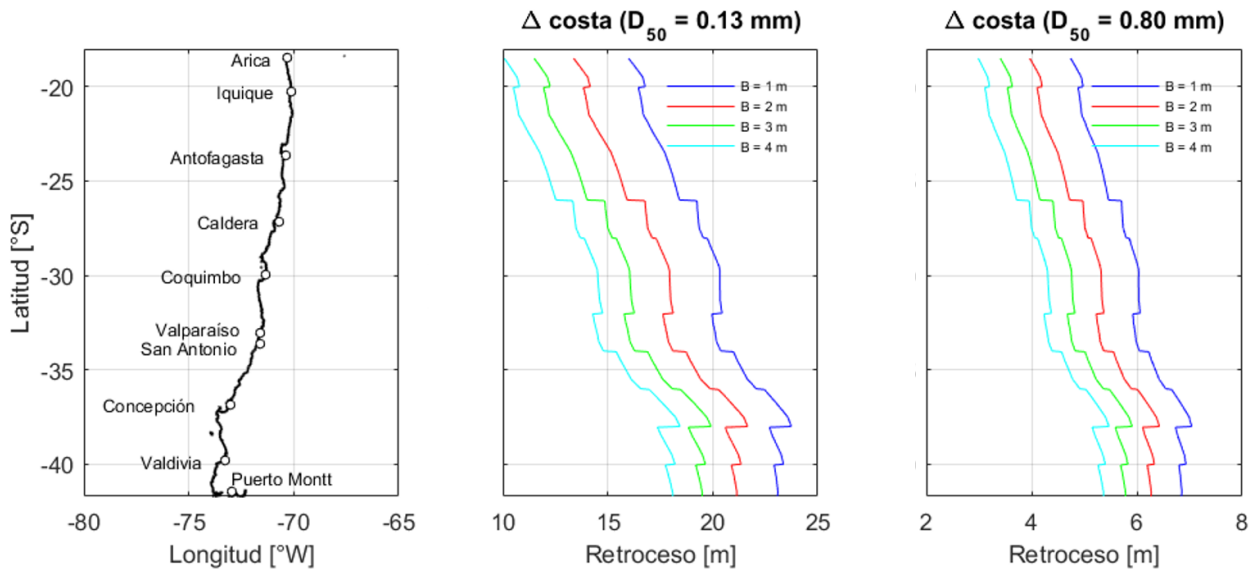
##### 4.2.4.1 Metodología simplificada para playas ubicadas entre Arica y el Canal Chacao

#### Retroceso de la línea litoral

Para los cálculos de retroceso de la línea litoral se hace uso de las medianas obtenidas de todos los modelos analizados. Una vez calculados los datos necesarios para la obtención de retrocesos de la línea de costa, se presentan los resultados generales para 12 posibles opciones a lo largo de la costa chilena (Figura 60), que dependen tanto del tamaño de grano de sedimento, como de la altura de la berma en cada playa. Sin tener datos específicos de estas dos variables en todas las playas, los resultados se presentan de esta forma general. Se observa que, mediante esta metodología simplificada, que para playas ubicadas entre Arica y el Canal Chacao, los retrocesos medios esperados para la proyección (2026-2045) varían entre 3 y 23 m, dependiendo del tamaño del grano y de la altura de la berma de la playa. Playas con tamaños de sedimentos finos experimentarán mayores retrocesos que playas de arena gruesa en tanto que playas con menor altura de la berma serán más erosionadas que aquellas con mayor altura<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Mayor altura de berma significa mayor cantidad de arena en la playa, por esto es que a mayor altura de la berma menor es la erosión de la playa

Figura 60: Retroceso de la línea de costa debido al efecto conjunto de cambio en el nivel medio del mar y proyecciones de altura de ola. Cada gráfico se refiere a un tamaño de sedimento ( $D_{50} = 0.15$  y  $0.8$  mm) y para 4 medidas de la berma de playa ( $B = 1, 2, 3$  y  $4$  m).



### Pivoteo en planta de la línea litoral

Asimismo, las playas tenderán a girar en sentido anti horario enfrentando direcciones más hacia el SW (Figura 61 y Figura 62). La tendencia es que playas largas tiendan a experimentar erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte, aun cuando la erosión y acreción respectiva sea del orden de metros. Para una playa larga de, por ejemplo, 1 km, el giro generaría una acreción promedio del orden de 5 m en el extremo norte y una erosión del mismo orden en el extremo sur de la playa. En otras palabras, las playas tenderán a girar enfrentando direcciones más hacia el SW.



Figura 61: Basculamiento o giro del frente de playa debido a los cambios en la dirección de aproximación del oleaje. Se presenta la dirección normal a las playas, asociada al percentil 50 % y 99% para el periodo histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045).

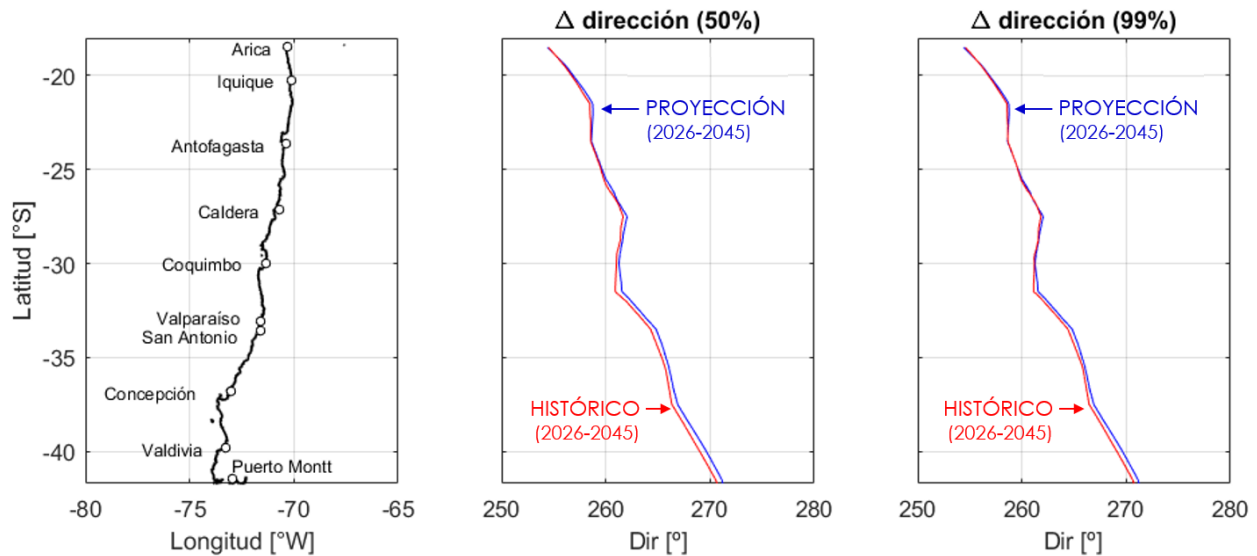
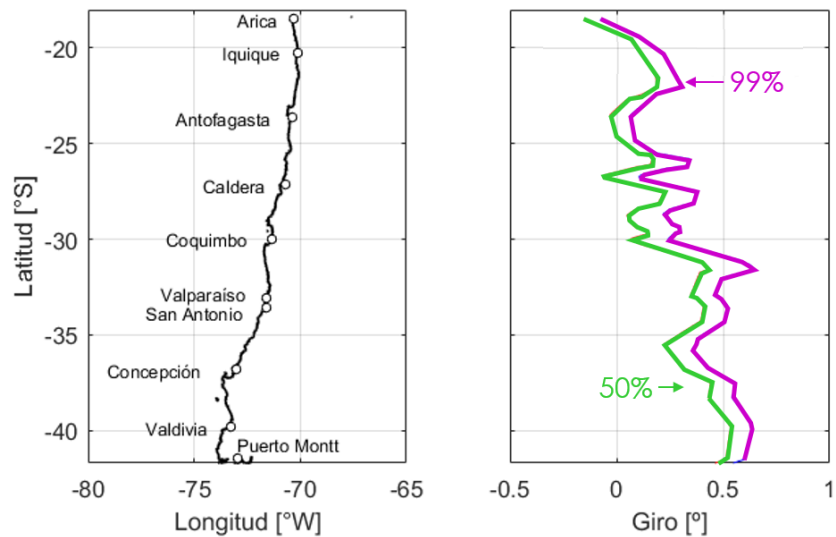


Figura 62: Giro del frente de playa debido a los cambios en la dirección de aproximación del oleaje para datos de dirección del percentil 50 % y 99%. El giro corresponde a la diferencia entre el alineamiento de la línea de costa proyectada (2026-2045) y el alineamiento en el período histórico (1985-2004). Los valores negativos significan giro en la dirección horaria y los positivos giros en la dirección anti-horaria.



#### 4.2.4.2 Metodología detallada para playas seleccionadas

##### Retroceso de la línea litoral

Para las playas seleccionadas se tienen datos de  $H_s$  99.863% y  $T_m$  99.863% para el período histórico y las proyecciones de aumento del NMMA para el escenario futuro RCP8.5. En estas playas se usó la metodología de propagación detallada hasta profundidades que varían entre los 10 y los 20 metros dependiendo de la disponibilidad de información batimétrica. Los retrocesos de las líneas de costa se calcularon para dos grupos de playas:

1. Playas donde se tiene tanto los oleajes propagados como el tamaño de sedimento ( $D_{50}$ ) y la altura de la berma ( $B$ ). Estas playas se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9: Listado de playas con todos los datos necesarios para el cálculo del retroceso de la línea litoral. Todas estas playas pertenecen a la Región de Valparaíso.**

N	Fecha de muestreo	Nombre playa
1	mar-16 / sep-16	Reñaca
2	mar-16	Las Salinas
3	sep-16	Los Marineros
4	mar-16 / sep-16	Caleta Portales
5	mar-16	Las Torpederas
6	mar-16 / ago-16	San Mateo

Los datos de granulometría de los sedimentos y altura de la berma de playa fueron aportados por el proyecto Fondecyt N°1151367.<sup>9</sup> Los datos de granulometría de los sedimentos corresponden a muestras obtenidas del frente de playa entre marzo y septiembre de 2016, las cuales fueron analizadas mediante tamizado en el Laboratorio de Bentos de la Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales, Universidad de Valparaíso.

2. Playas con datos de oleajes propagados, sin conocer el tamaño de sedimento ( $D_{50}$ ) y la altura de la berma ( $B$ ): Al no encontrarse estos datos en la literatura se dan resultados para rangos de estos dos parámetros (Tabla 10). Este procedimiento permite mejorar sustantivamente los resultados obtenidos con la metodología simplificada de propagación de oleaje.

---

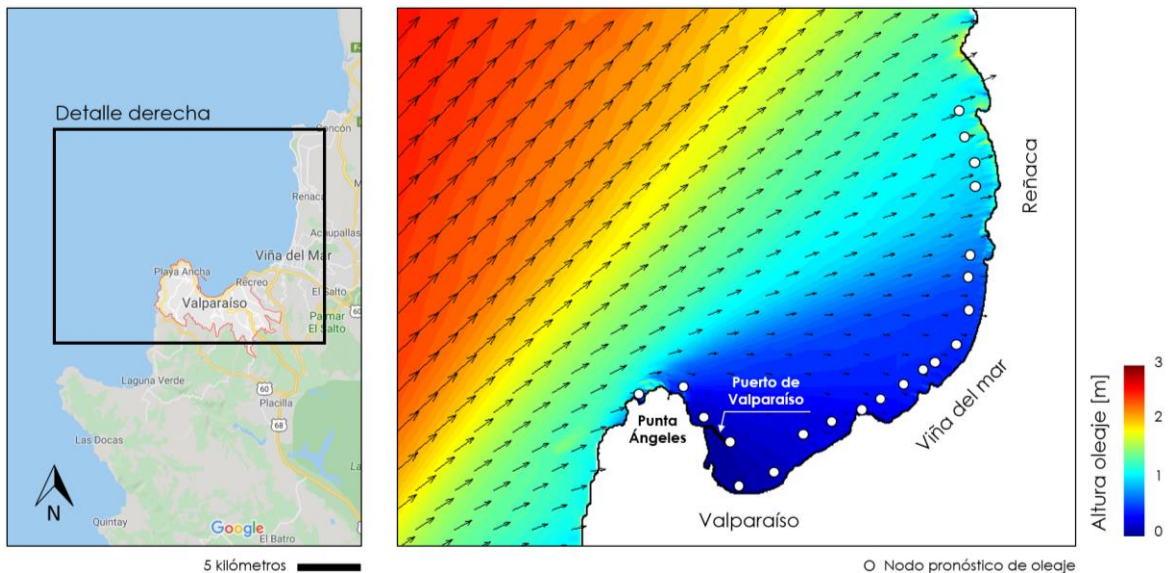
<sup>9</sup> Proyecto Fondecyt N°1151367 denominado "Evolución costera, morfodinámica y factores de cambio de la línea litoral en una costa de influencia tectónica: orientaciones al manejo integrado de la costa" (2015-2019).

Tabla 10: Listado de playas con  $D_{50}$  y  $B$  no conocidos para el cálculo del retroceso de la línea de costa. Por su extensión, en Hornitos y Pichilemu se consideran los cálculos de retrocesos para varias secciones. Se continúa la numeración de las playas respecto de la Tabla 9.

N	Nombre playa	Región
7	Hornitos 0	Antofagasta
	Hornitos 1	
	Hornitos 2	
	Hornitos 3	
8	Cochoa	Valparaíso
	Las Cañitas	
	Miramar	
9	Pichilemu (Punta de Lobos) 0	O'Higgins
	Pichilemu (Punta de Lobos) 1	
	Pichilemu (Punta de Lobos) 2	
	Pichilemu (Punta de Lobos) 3	

La Figura 63 muestra un ejemplo del patrón de propagación de oleaje proveniente del SW desde aguas profundas a lugares ubicados frente a algunas de las playas ubicadas en la bahía de Valparaíso (Anexo 7.1).

Figura 63: Patrón de propagación de oleaje proveniente del Suroeste a lugares ubicados frente a algunas de las playas en la bahía de Valparaíso. Se ilustra el campo de altura significativa de oleaje (colores) y la dirección local (flechas), además de los nodos de extracción de los datos de oleaje utilizados en el Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso<sup>10</sup>. El color azul representa sectores con oleaje de baja altura producto de la protección de la Punta Ángeles y el rojo representa sectores expuestos al oleaje.



<sup>10</sup> marejadas.uv.cl

Los resultados de este procedimiento se presentan en la Tabla 11 para las playas listadas en la Tabla 9 y en la Tabla 12 para playas de la Tabla 10.

En las playas donde tenemos datos de  $D_{50}$  y berma (Tabla 11), para las condiciones medias tanto de aumento del NMMA como de las condiciones de oleaje ( $H_{s12}$  y  $T_{12}$ ), los retrocesos medios esperados para la proyección (2026-2045) varían entre 2.00 y 3.48 [m]. Cabe notar que esos valores no contemplan los cambios asociados a las variaciones estacionales de invierno y verano, que pueden ser significativamente mayores, dependiendo del año. Es necesario mencionar que estos retrocesos están calculados exclusivamente para variaciones del NMMA y de las condiciones de oleaje medias en el período proyectado, y no se tienen en cuenta otros motivos de cambio como podrían ser las variaciones de niveles topográficos debidas a alzamientos o subsidencias por terremotos<sup>11</sup>.

Si bien el retroceso de una playa está relacionado con la combinación del aumento del NMMA, las condiciones del oleaje y el tipo de sedimento, se aprecia que la playa que experimentaría mayor retroceso de la línea litoral corresponde con la playa de Reñaca, que es la playa más expuesta a los oleajes predominantes de la costa analizada (oleajes provenientes del SW), y por tanto con altura de olas mayores. Por el contrario, la playa de San Mateo es la que sufriría menores retrocesos, debido a la combinación de su tipo de sedimento y estar menos expuesta a los oleajes predominantes, con las menores alturas de olas de este grupo de playas analizadas.

**Tabla 11: Cálculo de los retrocesos de la línea de costa en playas seleccionadas cuando se conocen los datos de  $D_{50}$  y B. Los datos de NMMA,  $H_{s12}$  y  $T_{12}$  corresponden a las medianas temporales de los datos proyectados en el período entre 2026-2045.**

Región	Playa	Coordenadas (Lat/Ion)	NMMA (m)	$H_{s12}$ (m)	$T_{12}$ (s)	$D_{50}$ (mm)	B (m)	Retroceso (m)
Valparaíso	Reñaca	32°58'02.53" 71°32'46.28"	0,1315	3,64	17,86	0,50	3,54	3,48
	Las Salinas	32°59'21.82" 71°32'48.55"	0,1314	3,43	18,17	0,63	2,74	3,06
	Los Marineros	33°00'02.84" 71°32'58.56"	0,1314	3,12	19,47	0,75	4,54	2,05
	Caleta Portales	33°01'56.21" 71°35'31.65"	0,1312	2,37	20,16	0,42	3,37	2,78
	Las Torpederas	33°01'19.78" 71°38'39.19"	0,1314	3,20	18,61	0,50	3,00	3,33
	San Mateo	33°01'37.66" 71°37'49.01"	0,1312	1,19	19,77	0,25	3,35	2,00

<sup>11</sup> Esta consideración es válida para todos los cálculos de retrocesos de la línea litoral de este capítulo.

En las playas donde no tenemos reportados datos del tamaño de sedimento y altura de la berma, los resultados se exponen para las distintas combinaciones de estos dos parámetros especificados anteriormente (Tabla 12). Como se puede ver, los retrocesos de la línea de costa, en todos los casos, disminuyen a medida que el tamaño de sedimento ( $D_{50}$ ) se hace mayor y la altura de la berma (B) aumenta. Para las playas de este grupo, los retrocesos serán mayores mientras menores sean sus tamaños de grano y/o cuanto menos disponibilidad de arena exista en la playa, es decir, cuanto más pequeña sea la altura de la berma. El contar con una estimación del retroceso para distintos tamaños de sedimento es útil en casos donde la realimentación (*nourishment*) pueda ser una opción de restauración o estabilización de la playa<sup>12</sup>.

**Tabla 12: Cálculo de los retrocesos de la línea de costa en playas seleccionadas cuando no se conocen específicamente los datos de  $D_{50}$  y/o B. Los datos sombreados corresponden a rangos de  $D_{50}$  (0.15, 0.3 y 0.8 [mm]) y B (1, 2, 3 y 4 [m]). Los datos de oleaje,  $H_{s12}$  y  $T_{12}$  corresponden a las medianas temporales de los datos proyectados en el período entre 2026-2045.**

Región	Playa	Coordenadas (Lat/lon)	NMMA (m)	$H_{s12}$ (m)	$T_{12}$ (s)	$D_{50}$ (mm)	B (m)	Retroceso (m)
Antofagasta	Hornitos 0	22°54'35.34" 70°17'58.79"	0,130	1,69	18,43	0,12	1	8,00
							2	6,37
							3	5,29
							4	4,52
	Hornitos 1	22°54'7.39" 70°17'49.09"		1	9,21			
				2	7,53			
				3	6,38			
				4	5,53			
	Hornitos 2	22°53'23.29" 70°17'41.72"		1	10,24			
				2	8,56			
				3	7,35			
				4	6,44			
	Hornitos 3	22°51'58.98" 70°18'1.27"		1	8,91			
				2	7,25			
				3	6,11			
				4	5,28			
Valparaíso	Cochoa	32°57'20.72"	0,132	3,79	17,41	0,15	1	11,59
							2	10,20
							3	9,11
							4	8,23
						0,3	1	7,01
							2	6,17

<sup>12</sup> Este comentario debe considerarse en cada caso particular, teniendo en cuenta las características sedimentológicas de la playa original, y evitando en todo caso cambios ecosistémicos que puedan alterar la fauna y flora existente. La opción de realimentación no siempre es posible o recomendable.

Región	Playa	Coordenadas (Lat/Ion)	NMMA (m)	H <sub>s12</sub> (m)	T <sub>12</sub> (s)	D <sub>50</sub> (mm)	B (m)	Retroceso (m)					
		71°32'51.20"					3	5,51					
							4	4,97					
						0,8	1	3,44					
							2	3,03					
							3	2,70					
							4	2,44					
						Las Cañitas	32°58'42.48" 71°32'44.88"	0,131	3,76	17,80	0,15	1	11,53
												2	10,15
												3	9,06
												4	8,18
	0,3	1	6,97										
		2	6,13										
		3	5,48										
		4	4,95										
	0,8	1	3,42										
		2	3,01										
		3	2,69										
		4	2,43										
	Miramar	33°01'15.04" 71°33'58.05"	0,131	2,77	20,09	0,15	1	9,55					
							2	8,13					
3							7,08						
4							6,27						
0,3						1	5,77						
						2	4,91						
						3	4,28						
						4	3,79						
0,8						1	2,83						
						2	2,41						
						3	2,10						
						4	1,86						
O`Higgins	Punta de Lobos 0	34°25'8.31" 72° 2'38.54"	0,125	4,53	18,09	0,15	1	12,30					
							2	11,02					
							3	9,97					
							4	9,11					
						0,3	1	7,44					
							2	6,66					
							3	6,03					
							4	5,51					
						0,8	1	3,65					
							2	3,27					
							3	2,96					

Región	Playa	Coordenadas (Lat/Ion)	NMMA (m)	H <sub>s12</sub> (m)	T <sub>12</sub> (s)	D <sub>50</sub> (mm)	B (m)	Retroceso (m)
	Punta de Lobos 1	34°24'41.34" 72° 2'42.27"	0,125	4,73	16,58	0,15	4	2,70
							1	12,53
							2	11,25
							3	10,21
						4	9,34	
						0,3	1	7,58
							2	6,80
							3	6,17
							4	5,65
						0,8	1	3,72
							2	3,34
							3	3,03
	4	2,77						
	Punta de Lobos 2	34°24'8.26" 72° 2'21.82"	0,125	4,75	16,58	0,15	1	12,56
							2	11,28
							3	10,24
							4	9,37
						0,3	1	7,59
							2	6,82
							3	6,19
							4	5,67
						0,8	1	3,73
							2	3,35
							3	3,04
							4	2,78
	Punta de Lobos 3	34°23'47.22" 72° 2'6.51"	0,125	4,90	16,98	0,15	1	12,81
							2	11,54
							3	10,50
							4	9,63
						0,3	1	7,75
							2	6,98
							3	6,35
4							5,82	
0,8						1	3,80	
						2	3,42	
						3	3,11	
						4	2,86	

Las potenciales zonas de pérdida de algunas de las playas analizadas en este capítulo se presentan en el Anexo 7.2 para las playas de Cochoa, Las Salinas y Pichilemu. A modo de ejemplo, la Figura 64 muestra la playa de Cochoa. En ellas se considera la posición de la línea litoral actual (2018) y la proyección establecida por el modelo utilizado en este estudio (Tabla 11 y Tabla 12). Se consideran las líneas de menor retroceso<sup>13</sup> y mayor retroceso<sup>14</sup>. Como se mencionara anteriormente, estos valores no contemplan los cambios asociados a las variaciones estacionales de invierno y verano, que pueden ser significativamente mayores.

**Figura 64: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Cochoa (Viña del Mar)**



<sup>13</sup> Sedimento más grueso (0.8 mm) y mayor altura de berma (4 m)

<sup>14</sup> Sedimento más fino (0.15 mm) y menor altura de berma (1 m)



Si bien los retrocesos de la línea litoral estimados en este estudio son consecuencia principal del aumento del nivel de mar al escenario proyectado, las condiciones de oleaje asociadas a un percentil 99% -esto es oleajes intensos pero no extremos- también se han tenido en cuenta para los cálculos. Estos oleajes, con ocurrencia sobre un nivel del mar aumentado, inciden en los procesos físicos tales como el transporte longitudinal y transversal de sedimentos, así como la sobre elevación del oleaje por efecto de la rotura del mismo sobre la costa (*wave setup*), aumentando los efectos de erosión de las playas y las probabilidades de inundaciones costeras (Sierra, 2014).

Cuando estos oleajes corresponden a eventos extremos, los cambios, tanto en localización como frecuencia, dirección y severidad, se acompañan con cambios en la posición y magnitud de eventos erosivos o acrecionales (Stive 2002). Esto puede provocar aumento del riesgo de inundaciones costera afectando a la sustentabilidad de la zona costera. El análisis de eventos extremos y otros procesos que ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales (Figura 65), no obstante, se excluye del presente análisis.

### **Pivoteo en planta de la línea litoral en playas seleccionadas**

Al igual para el retroceso de la línea litoral, el giro o basculamiento se calculó de forma más precisa para las playas seleccionadas a través del cambio en la dirección de aproximación de los oleajes propagados por el método de propagación espectral. Los resultados se presentan en la Tabla 11, donde se evidencia que la tendencia general es a un giro de los oleajes hacia el SW.

El giro se calculó por diferencia entre las medianas de las direcciones de aproximación de los oleajes para el período histórico (1985-2004) y el escenario futuro RCP8.5 (2016-2045) en cada una de las playas analizadas. La mayoría de las playas experimentarían un giro anti-horario (valores de giro positivo) lo que corresponde con erosiones en la zona sur y acreciones en la zona norte de la playa, donde la línea litoral se ajusta para buscar de nuevo la perpendicularidad con la nueva dirección de aproximación del oleaje. En las playas con giro negativo, el efecto sería el contrario, erosión en la zona norte y acreción en la zona sur<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Los efectos del giro también dependerán de la forma en planta de la playa. Si esta es rectilínea se producirán acreciones y erosiones similares en los extremos de la playa, mientras que si la playa es encajada dependerá del punto de difracción de la misma, así como de si está o no colmatada de sedimentos (CEPAL, 2012).

Tabla 11: Basculamiento o giro del frente de playa debido a los cambios en la dirección de aproximación del oleaje para datos de dirección del percentil 50 % (media temporal) en el período proyectado entre 2026-2045. Los valores negativos significan giro en el la dirección horaria y los positivos giros en la dirección anti-horaria.

Región	Playa	Coordenadas (Lat/lon)	Dirección (°) Histórico (1985-2004)	Dirección (°) RCP8.5 (2026-2045)	Giro (°)
Antofagasta	Hornitos 0	22°54'35.34" 70°17'58.79"	271,78	272,05	-0,26
	Hornitos 1	22°54'7.39" 70°17'49.09"	268,92	269,21	-0,30
	Hornitos 2	22°53'23.29" 70°17'41.72"	273,10	273,38	-0,28
	Hornitos 3	22°51'58.98" 70°18'1.27"	263,17	263,17	0,00
Valparaíso	Cochoa	32°57'20.72" 71°32'51.20"	251,14	250,61	0,53
	Reñaca (re)	32°58'02.53" 71°32'46.28"	252,19	251,86	0,33
	Las Cañitas	32°58'42.48" 71°32'44.88"	263,07	262,92	0,16
	Las Salinas (sa)	32°59'21.82" 71°32'48.55"	271,12	271,13	-0,01
	Los Marineros (ma)	33°00'02.84" 71°32'58.56"	282,14	282,08	0,06
	Miramar	33°01'15.04" 71°33'58.05"	296,74	296,66	0,08
	Caleta Portales (po)	33°01'56.21" 71°35'31.65"	314,48	314,61	-0,13
	Las Torpederas (to)	33°01'19.78" 71°38'39.19"	274,60	274,57	0,02
	San Mateo (sm)	33°01'37.66" 71°37'49.01"	253,61	250,62	3,00
O`Higgins	Punta de Lobos 0	34°25'8.31" 72° 2'38.54"	285,60	285,19	0,40
	Punta de Lobos 1	34°24'41.34" 72° 2'42.27"	262,23	261,44	0,79
	Punta de Lobos 2	34°24'8.26" 72° 2'21.82"	263,34	262,04	1,29
	Punta de Lobos 3	34°23'47.22" 72° 2'6.51"	263,87	263,28	0,60

### 4.3 ESTIMACIÓN DEL DAÑO ECONÓMICO POR EROSIÓN DE PLAYAS

Una de las funciones de las playas es el servicio ecosistémico de la provisión de un espacio de recreación (Enríquez-Acevedo et al., 2018; Raheem et al., 2012). Cambios que puedan ocurrir en la calidad de estos servicios tendrán consecuencias en el valor que generan. Esto ha dado origen a una literatura que busca cuantificar el valor económico generado por las playas y por las medidas de remediación de sus procesos erosivos (Landry et al., 2003). El análisis económico se ha centrado en medir:

- Los efectos a través del valor de las propiedades cercanas a las playas (Gopalakrishnan et al., 2011) y los costos de viaje a las mismas
- Directamente los beneficios de los usuarios de playas a través de encuestas (Huang et al., 2007).

La estimación de beneficios a partir del valor de las propiedades generalmente utiliza el método de precios hedónicos que se basa en descomponer el valor de la propiedad entre sus distintos atributos incluyendo, por ejemplo, la distancia a la playa (Jin et al., 2015). El método del costo de viaje utiliza este costo como un precio pagado por el servicio recreativo, que generalmente es gratuito en el caso de las playas. Una vez obtenido este precio a partir del número de viajes y otras características de la persona y de la playa, se estima una demanda por viajes a la playa, de donde se obtiene la disposición a pagar por cambios en alguno de sus atributos, como calidad del agua, tamaño, etc.

Por otra parte, los métodos directos utilizan el método de valoración contingente o métodos de experimentos de elección, que a través de encuestas a los usuarios de las playas permiten obtener estimaciones de la disposición a pagar por los servicios provistos por ellas (Lew and Larson 2008). Estos estudios generan un valor monetario por visita realizada a una playa o también por metro cuadrado de playa por visita realizada. Este último tipo de medición permite cuantificar los beneficios económicos asociados a los cambios en el tamaño de las playas, ya sea por erosión o aumento natural o artificial de las mismas.

#### 4.3.1 Metodología

Ya que los resultados de la modelación de este estudio son estimaciones de la disminución en la superficie de las playas como resultado del cambio climático en la proyección (2026-2045) respecto del período histórico (1985-2004), se utilizó una medida de beneficios basada en la disposición a pagar por visita y por metro cuadrado. Sin embargo, dado el carácter exploratorio del análisis económico de este estudio, no se realizó un estudio primario con levantamiento de encuestas, si no que se usó la metodología de transferencia de beneficios<sup>16</sup>. Esta metodología propone transferir los resultados de un estudio primario al lugar del estudio en cuestión (Desvousges et al., 1992). En este caso los estudios primarios serían aquellos realizados en otro

---

<sup>16</sup> El método de transferencia de beneficios ha sido usado para el análisis costo-beneficios de distintas políticas públicas, incluyendo efectos en la salud de la contaminación, calidad de las aguas, servicios recreativos, entre otros.

lugar en base a levantamiento primario de datos y los lugares de este estudio serían las playas de Chile a ser analizadas. Los estudios primarios que combinan información de preferencias reveladas (costo de viaje) y preferencias declaradas (experimento de elección) permite obtener mejor resultados en la transferencia de beneficios (Johnston et al., 2015).

Se identifican dos tipos de transferencias de beneficios: aquellas basados en valores unitarios y en funciones de transferencias (Brouwer, 2000). La transferencia de valores unitarios consiste simplemente en utilizar el valor económico por unidad de análisis en el sitio del estudio primario (por ejemplo, dólares por visita por metro cuadrado) y utilizarlo en el sitio de aplicación. Los valores unitarios también pueden ser ajustados para reconocer posibles diferencias entre ambos lugares y ajusta los valores para compensar por estas diferencias a partir de información externa al estudio original. Las funciones de transferencia son usadas para ajustar las diferencias entre ambos lugares pero a partir de los modelos o funciones estimadas en el estudio primario.

Para implementar esta metodología se realizó una búsqueda de estudios primarios en la base de datos especializada para transferencia de beneficios *Environmental Valuation Reference Inventory* (EVRI) de Canadá, y una búsqueda general en la literatura. Esta base contiene estudios primarios realizados en distintos países y que valoran diferentes servicios ambientales. El análisis se efectúa, a modo de ejemplo, para 6 playas ubicadas en la bahía de Valparaíso (Reñaca, Las Salinas, Los Marineros, Caleta Portales, Las Torpederas y San Mateo).

En estos casos no fue posible encontrar estudios que permitieran aplicar una función de transferencia, por lo que se utilizó la metodología de valores unitarios ajustados. Czajkowski and Ščasny (2010) recomiendan ajustar estos valores por al menos dos factores:

- Una corrección de precios y
- Una corrección de diferencias de ingresos entre el país donde se realizó el estudio primario y el país donde se aplica el valor.

La corrección de precios consiste en ajustar por inflación y por diferencias de precios entre los bienes de ambos países. Para esto primero se corrige por inflación desde el año del estudio hasta el año 2011, año en que se utiliza el tipo de cambio corregido por paridad de poder de compra (PPP) para transformar a pesos de ese año (ambos obtenidos del WDI del Banco Mundial). Luego siguiendo la literatura, se utiliza una elasticidad unitaria para corregir por las diferencias de ingresos entre el país del estudio y Chile, donde el valor unitario del país de origen en moneda nacional es multiplicado por la razón de PGB corregido por PPP de ambos países.

#### **4.3.2 Resultados**

Para la obtención de valores se identificaron trabajos que valorarán playas en distintos lugares del mundo. Sin embargo, la mayoría solo identifica un valor asociado al número de visitas o al valor de cada propiedad. Por otra parte, en un estudio que combina información de preferencias reveladas (costo de viaje) y preferencias declaradas (experimento de elección), Whitehead et al., (2007) encontraron un valor de 7 dólares por visita por un aumento del ancho de la playa de 100 pies. Este valor, que equivale a 23 centavos de dólar por metro de retroceso,

es ajustado por inflación, tipo de cambio e ingreso para obtener un valor de 26 centavos. No obstante, para utilizar este valor se requiere del número de visitas a cada una de las playas, información que no fue posible obtener.

Para subsanar esta falta de información y entregar un valor aproximado, se utilizó el número de pernoctaciones obtenido de la encuesta mensual de alojamiento turístico del INE, de acuerdo a elaboración de SERNATUR, para los meses de diciembre de 2016 y enero, febrero y marzo de 2017, para el destino turístico de Valparaíso/Viña del Mar/Concón. Se eligieron estos meses ya que es el periodo donde se concentra el uso de las playas. Esto entrega un total 990.048 pernoctaciones para este destino turístico. Este total fue asignado proporcionalmente a las playas en esta área, algunas de las cuales contaron con una proyección del retroceso producto del riesgo de erosión. Este número asume que todas estas personas fueron a la playa cada día, lo que no es realista. Tampoco considera las visitas a playas realizadas por residentes o visitantes que alojaron en sus propias viviendas o arrendaron viviendas. Sin información adicional es imposible saber si se está sobre o subestimando el número de visitas. Sin embargo, los valores obtenidos de uso diario de las playas están en línea con lo reportado en la literatura.

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos al multiplicar los metros de retroceso con el número de visitas anuales a cada playa y el valor por metro y por visita. Esto da un total cercano a los 500 mil dólares anuales de pérdida económica producto del riesgo de erosión causada por cambio climático para estas playas.

**Tabla 13: Pérdida anual asociada a erosión de playas debido al cambio climático. La pérdida de área se estima como la diferencia de área entre la proyección (2026-2045) y el período histórico (1985-2004). El número de visitas anuales se calcula a partir del largo de la playa (y por tanto está implícito en este valor). Fuente: Elaboración propia con datos de Sernatur.**

Playa	Retroceso (m)	Número de visitas anuales	Pérdida anual (USD)
Reñaca	3,48	57.529	211.541
Las Salinas	3,06	4.805	15.535
Los Marineros	2,05	115.209	249.559
Caleta Portales	2,78	33.214	97.567
Las Torpederas	3,33	2.282	8.030
San Mateo	2,00	10.621	22.445
Total		223.659	604.676

El análisis del daño económico de este tipo podría ser extendido a más playas, con el objetivo de aportar en la decisión de tomar medidas de adaptación como la protección y alimentación artificial (*nourishment*) de playas. La evidencia de que las playas de Chile estarían expuestas a erosión es contundente (este estudio y Martínez et al. 2018), sin embargo, existe en el país poca información respecto de su uso y el valor económico que generan. Una medición mediante encuestas y levantamiento específico en playas relevantes permitirá precisar las estimaciones iniciales que se han realizado en este estudio.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se sintetizan los resultados del estudio de la evolución histórica y proyección de la línea de costa y se efectúan recomendaciones generales sobre aspectos que debieran considerarse en el marco de la adaptación de las playas al cambio climático. Las conclusiones y recomendaciones se agrupan según temáticas específicas.

### 5.1 RESULTADOS DE EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA LITORAL

En el estudio de evolución histórica de la línea de costa (capítulo 3) se constata que el 80% de las 35 playas analizadas se encuentran con erosión o erosión alta. Las playas con erosión alta corresponden a Hornitos, Algarrobo y Santo Domingo y corresponden a playas de ensenada donde se desarrollan extensos litorales arenosos, asociados a antiguos campos dunares y humedales costeros.

El análisis de evolución histórica de la línea de costa se basa en evidencia de aerofotogrametría, fotografía satelital y levantamientos y no se enfoca en explicar las causas de dicha erosión. Los cambios en la posición de la línea de costa, sin embargo, podrían ser atribuibles a las siguientes causas:

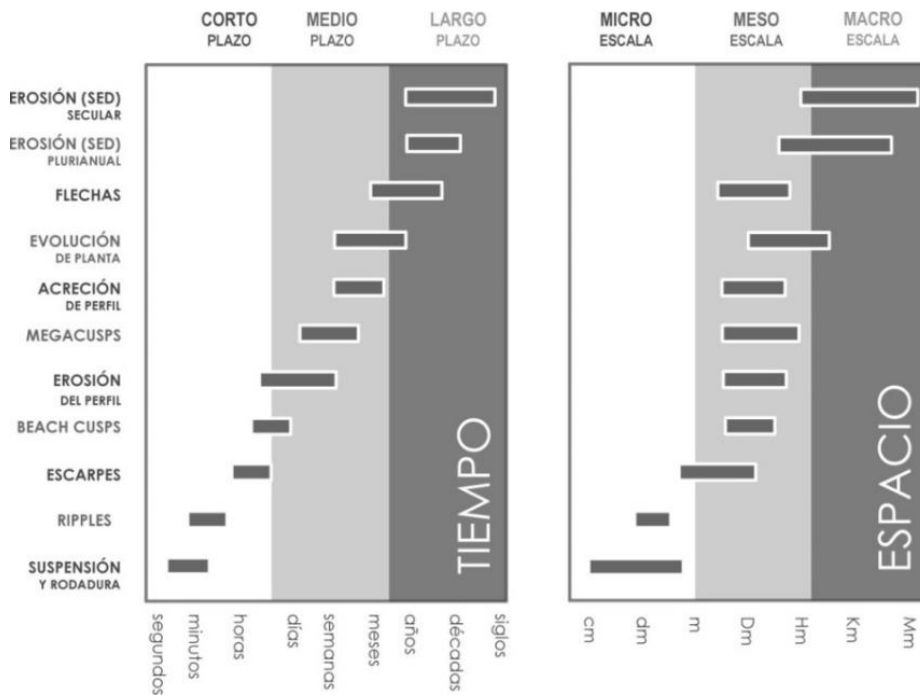
- **Factores oceanográficos** asociados a i) el incremento en la frecuencia e intensidad de marejadas, ii) cambios en la dirección del flujo medio de energía del oleaje y iii) el aumento del nivel medio del mar absoluto
- **Factores geofísicos** asociados a i) la subsidencia o el levantamiento cosísmica durante eventos recientes o ii) cambios más lentos ocurridos durante las diferentes etapas del ciclo sísmico
- **Factores antrópicos** asociados a i) los cambios en el aporte sedimentario de los ríos debidos a la expansión urbana de las cuencas, ii) la extracción de arenas para construcción, iii) la construcción de presas y embalses sin un debido sistema de gestión de sedimentos, iv) efectos locales debido a la construcción de obras costeras y v) la extracción de algas en zonas expuestas al oleaje
- **Factores hidrológicos** asociados a i) la variabilidad climática manifestada en eventos como la megasequía de la zona central (CR<sup>2</sup>, 2015) o ii) procesos a mayor escala asociados al cambio climático.

Dada la complejidad del proceso de erosión, los plazos limitados de este estudio y la gran cobertura considerada (35 playas), no es posible evaluar la influencia relativa de cada una de estas causas para cada playa en particular. Por ende, se recomienda estudiar en detalle las playas que muestran tasas altas de erosión a objeto de comprender los mecanismos de cambio sobre la base de investigación científica sistematizada. Para cumplir con este objetivo, se debiera contar con programas de monitoreo de playas en áreas críticas para validar estudios de oleaje extremo y modelado costero, monitoreo que actualmente no se realiza desde instancias gubernamentales.

El estudio de evolución de la línea de costa en el escenario RCP 8.5 para la proyección (2026-2045) (capítulo 4) indica que las playas ubicadas entre Arica y el Canal Chacao experimentarán retrocesos medios de entre 3 y 23 m, dependiendo del tamaño del grano y de la altura de la berma de la playa. Playas con tamaños de sedimentos finos experimentarán mayores retrocesos que playas de arena gruesa en tanto que playas con menor altura de la berma serán más erosionadas que aquellas con mayor altura. Asimismo, las playas tenderán a girar en sentido anti horario enfrentando direcciones más hacia el SW. La tendencia es que playas largas tiendan a experimentar erosión en sus extremos sur y acreción en sus extremos norte, aun cuando la erosión y acreción respectiva sea del orden de metros.

Por otra parte, como se menciona en Winckler et al., (2019), “Las playas evolucionan en un amplio rango de escalas en el tiempo y el espacio (Figura 65). En escalas asociadas al paso de una ola, se evidencian cambios relativamente pequeños y rápidos, asociados a la suspensión y rodadura del sedimento. En escala sucesivamente mayores, las playas evolucionan en pocos días durante el paso de una marejada, en escalas estacionales con la manifestación de los perfiles típicos de invierno y verano, y en escalas de tiempo decadales asociadas a procesos seculares de erosión y sedimentación”. A este respecto cabe mencionar que tanto la evolución histórica de la línea de costa como su proyección a mediados de siglo estimadas en este estudio no contemplan la variabilidad natural que experimentan las playas en estas diferentes escalas espaciales.

Figura 65: Escalas de evolución espacio-temporal de las costas. (Winckler, 2019; Adaptado de GIOC)



## 5.2 CRITERIOS DE ADAPTACIÓN

Con el objeto de reducir el impacto del cambio climático en playas, dunas y humedales, se recomiendan las siguientes medidas de adaptación, las que se describen en detalle a continuación:

- Conservación de campos dunares, humedales y campos de algas
- Generación de cuotas de extracción de arenas
- Soluciones de ingeniería verde
- Gestión integrada de zonas costeras
- Política nacional de uso del borde costero

### 5.2.1 Conservación de campos dunares, humedales y campos de algas

Debido a la importancia que tienen las antedunas (*foredunes*) en la estabilización de las playas y en el control de la erosión costera, la mantención, estabilización o regeneración de los campos dunares es prioritario. Actualmente tanto las playas como los campos dunares son afectados por el tránsito de vehículos motorizados, el depósito de basuras y escombros, la extracción de arenas y la construcción de edificaciones. La regulación de estas actividades que son importantes estresores de la costa es vital para conservar y controlar la erosión de las playas, así como el impacto de amenazas naturales y eventos extremos como tsunamis y marejadas. La implementación de métodos de fijación de arenas mediante vegetación pionera, para elevar la altura de las Antedunas, es una práctica recomendable y ha resultado exitosa en numerosos lugares del mundo. Algunos estudios establecen que una duna litoral estabilizada con *Ammophila arenaria* captura entre 50 y 70% de la arena proveniente de la playa (Carter & Wilson, 1990 en Tavares, 2002).

Los humedales y praderas de macroalgas promueven la atenuación del oleaje y la marea meteorológica, además de estabilizar la costa, gracias a su capacidad de disipar la energía mecánica del oleaje y retener el sedimento. La extracción indiscriminada de algas ha generado la pérdida de playas, erosión costera y edificaciones en playas como el Papagayo, en Quintero (Quezada, 2007), efectos que la Dirección de obras Portuarias ha intentado resolver con infraestructura costera (Figura 66).

A partir de 69 estudios, Narayan et al., (2016) muestra que, en promedio, estos hábitats pueden reducir la energía del oleaje entre un 70% y un 30%, siendo de más a menos eficientes los corales, humedales, manglares y macroalgas. Los impactos antrópicos y del cambio climático pueden conducir a la degradación de estos ecosistemas y, como consecuencia, a un aumento de la erosión e inundación costera. Utilizar los recursos que provee el mismo ecosistema marino-costero se asocia además a soluciones basadas en la naturaleza (SbN), utilizando el capital natural costero y que están orientadas a enfrentar los grandes retos de la sociedad, entre ellos el cambio climático y el riesgo de desastres.



Figura 66: Arriba: Playa El Papagayo en el año 1960. Centro: Temporal de 1995 en Playa El Papagayo. Abajo: Protección de fondo construida al pie del talud. Foto tomada en 2007 (Quezxada, 2007).



### 5.2.2 Generación de cuotas de extracción de arenas

La extracción ilegal y/o desregulada de arenas provenientes de playas, campos dunares y ríos favorece la erosión de las playas y conduce a alteraciones ecosistémicas que degradan la zona costera en general. Con la demanda por materiales para la construcción, esta práctica es habitual en muchos lugares de Chile. Un ejemplo de extracción ilegal en las dunas de Ritoque se ilustra en la Figura 67<sup>17</sup>. Actualmente la legislación es poco rigurosa en el control de estas actividades y existe además escasa fiscalización y control en las áreas afectadas. Por otra parte, las consecuencias que esta actividad tiene en la dinámica sedimentaria no han sido estudiadas en detalle en nuestro país. Por ende, se requiere definir cuotas de extracción de arenas de estos sitios de empréstito de modo de garantizar una gestión sustentable del sistema sedimentológico litoral.

Figura 67: extracción periódica de arena desde las dunas de Ritoque (Fuente: soychile.cl).



### 5.2.3 Soluciones de ingeniería verde<sup>18</sup>

En las últimas décadas, se han evidenciado cambios en los principios de diseño de infraestructura costera. En los años 60 se pensaba que la “rigidización” de playas mediante espigones o diques exentos era la solución a la erosión costera. Estas soluciones, no obstante, generaron impactos en la dinámica litoral, como la acreción de playas aguas arriba y socavación aguas abajo de las obras. Hay casos donde los impactos de las obras sobre la dinámica litoral se han combatido

<sup>17</sup> [www.soychile.cl/Valparaiso/Sociedad/2018/08/11/550027/Preocupacion-en-Quintero-por-extraccion-de-arena-de-las-dunas-de-Ritoque.aspx](http://www.soychile.cl/Valparaiso/Sociedad/2018/08/11/550027/Preocupacion-en-Quintero-por-extraccion-de-arena-de-las-dunas-de-Ritoque.aspx)

<sup>18</sup> Este texto ha sido adaptado de Winckler et al., (2019).

mediante sistemas de bypass de arena, pero estas soluciones son caras y de difícil mantenimiento para la realidad nacional. En Chile, la rigidización se ha utilizado como defensa de caminos, vías férreas y paseos costeros y en alrededor de una decena de playas artificiales (Figura 68). A fines del siglo pasado se introdujo la "alimentación artificial" de arenas como una opción ambientalmente amistosa a la rigidización, pero la evidencia indica que el trasvase de grandes volúmenes de arena de un sitio de empréstito al de la obra puede generar impactos relevantes en los ecosistemas si no se efectúa respetando los ciclos naturales.

**Figura 68: Playas artificiales desarrolladas mediante espigones de roca a comienzos del presente siglo en Antofagasta. Se indican las coordenadas para facilitar su inspección.**



El paradigma actual consiste en el uso de "infraestructura verde" que responda a las demandas económicas, garantizando el bienestar humano y el funcionamiento del ecosistema (Gironás y Yáñez, 2019). Algunos ejemplos de este tipo de soluciones son la restauración de humedales, la rehabilitación y reconstrucción de dunas y playas, el uso de arrecifes artificiales de coral o el uso de cinturones verdes para la protección contra la inundación.

En la actualidad existen estrategias encaminadas a adaptarse al eventual retroceso de la costa, que se basan en determinar la posición histórica y futura de la línea de costa (*managing shoreline retreat*). Este tipo de soluciones puede ser una alternativa de menor impacto a la rigidización mediante defensas o la alimentación artificial (McLachlan et al., 2013). En esta línea, se proponen medidas como i) favorecer la migración hacia el interior de marismas y humedales, ii) evitar la construcción de infraestructura en zonas altamente vulnerables, iii) introducir estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio climático en la planificación territorial de zonas parcialmente recuperables y iv) promover la compra de terrenos con fines de conservación. Otro tipo de medidas se ilustran en la Tabla 14 (Reguero et al., 2018). En Chile, desafortunadamente, existe poca sensibilidad frente a este tipo de soluciones, lo que se evidencia en el excesivo desarrollo inmobiliario de zonas altamente vulnerables en ciudades costeras, cuyo denominador común es contar con terrenos bajos altamente vulnerables a las variaciones del nivel del mar, las marejadas y los tsunamis.

Tabla 14: Ejemplos de medidas de adaptación evaluadas por Reguero et al. (2018) para el Golfo de México. Las medidas, en su terminología en inglés, se denominan i) green or nature-based measures, i.e. interventions that use ecosystems and natural features to, provide hazard attenuation; ii) artificial or grey measures, i.e. built rigid structures; and iii) policy measures, i.e. home elevation of high-risk assets.

Table 1. Inventory of adaptation measures.

Measure		Description of measure	Locations and implementation	Unitary Cost	Total of units/surface <sup>a</sup>
Local Levees		6 ft levees built to protect houses	All houses in the counties at highest risk areas	\$15,000 /house	1.5 to 1.7 M houses
Sandbags		Sandbags used around homes for all Category 3+ hurricanes	All counties around all houses in low-lying areas (below 10m)	\$360/ house	2.9 to 3.2 M houses
Dikes		20 ft dikes along the shore	In high risk areas of Houma & New Orleans, LA	\$10,000 /ft	340 miles
Home Elevation		Homes elevated by 10 ft	All existing homes in high risk areas	\$83,300 / house	1.4 M houses
Wetland Restoration	Risk Reduction Priority	Salt marsh restoration built along shorelines	Wetland restoration in the 6 counties with highest past asset damages & loss of > 25 sq miles of marsh	\$25 M /mile	100 miles restored x 0.5ml wide Total: 2.4M acres
	Conservation Priority	Salt marsh restoration built along shorelines	Wetland restoration in the 5 counties that have lost the most marsh in the last 2 decades	\$25 M /mile	150 miles restored x 0.5ml wide Total: 3.6M acres
Barrier Island Restoration		Restoration by increasing width	AL & LA counties	\$12.1 M/ mile	115.5 miles x 1,000 ft
Oyster Reef Restoration		Artificial construction of oyster reefs	Restoration of 25 miles of oyster reefs in each of 24 counties with suitable habitat. For Tampa Bay 25 miles divided among 3 counties	\$1.5 M /mile	1,050 miles
Beach restoration	western Gulf (TX)	Artificial beach nourishment to increase width	Coastal beach front across Texas	\$22 M /mile	370 miles x 100 ft wide
	eastern Gulf (FL)	Artificial beach nourishment to increase width	All Gulf counties with significant beachfronts across Florida	\$22 M /mile	300 miles x 100ft wide

#### 5.2.4 Gestión integrada de zonas costeras

Resulta adecuado atender al concepto de Gestión integrada de zonas costeras (GIZC) como un proceso continuo de administración cuyo objetivo general es poner en práctica el desarrollo sostenible, la conservación de la zona costera y la mantención de la biodiversidad (Comisión Europea, 1999 en Barragán, 2014). Este concepto si bien está ampliamente fundamentado y difundido a nivel internacional y también en Chile, no ha sido aplicado en el país como criterio estandarizado, lo cual es visto como una debilidad en la gobernanza de la costa. Al respecto, el diagnóstico elaborado por Castro et al., (2011), sobre gestión costera en Chile establece que:

- en la Política Nacional las actuaciones están pensadas para el borde costero y el espacio marítimo, no existiendo una idea de ordenación en profundidad
- este proceso ha tenido más en cuenta las necesidades de desarrollo que las de protección y conservación
- existe una gran desconexión entre la base legal amplia y el espacio-recursos litorales
- existe falta de criterios para la zonificación en regiones
- existe falta de recursos económicos y humanos
- existe falta de mecanismos eficaces de coordinación y cooperación.

La gestión integrada de zonas costeras, con base ecosistémica, involucra cambios de usos de suelo funcionales con la fragilidad de los ambientes costeros, lo cual es urgente realizar en Chile. Este enfoque de gestión implica trabajar con el funcionamiento natural del ecosistema y su capacidad de ajuste frente al cambio climático (Yañez and Day, 2012; Yañez-Arancibia, 2013). Algunas de las estrategias de manejo para mitigar o adaptarse al cambio climático son (Yañez and Day, 2012):

- Promover y utilizar activamente la productividad continuada de los humedales costeros.
- Evitar los pulsos negativos de la disminución del aporte de agua dulce de los ríos en su cuenca baja por la actividad industrial.
- Evitar alteraciones al ciclo de nutrientes inducidos por la agricultura.
- Mantener los ecosistemas costeros saludables con el fin de mantener la capacidad resiliente de mitigar los impactos del cambio climático.

Una oportunidad al respecto lo representa el proyecto GEF de Gobernanza de Ecosistemas Marinos que se coordina actualmente en el Ministerio de Medio Ambiente con el apoyo de la FAO. Este proyecto busca el uso sustentable y conservación de los sectores marino-costeros, con un enfoque ecosistémico, participativo, multisectorial y con base local, donde la dinámica de las costas y los desastres naturales son incluidos. A partir de estos resultados en áreas piloto, se espera llegar a una metodología que reconozca las singularidades de la costa del país, para llevarla a un modelo de gobernanza para un efectivo desarrollo sostenible en Chile.

### 5.2.5 Política nacional de uso del borde costero

Desde el punto de vista de la gestión costera, Chile posee una Política Nacional de Uso del Borde Costero (PNUBC) que ya tiene 25 años sin revisión, cuyas orientaciones son (CNUBC, 2018):

- Creación y consolidación de una estructura nacional y regional, para la implementación de la Política Nacional de Uso del Borde Costero.
- Fortalecimiento de las visiones regionales sobre los usos preferentes de sus espacios costeros, materializados en propuestas de zonificación.
- Reconocimiento a nivel nacional, regional y local de la Zonificación de Uso del Borde Costero como un instrumento de ordenamiento territorial validado en normativas legales.
- Incorporación de consulta a las Comisiones Regionales en la decisión de otorgamiento de nuevas concesiones marítimas, como una acción participativa y de carácter consultivo.
- Participación de las Comisiones Regionales en el proceso de solicitud de Espacios Costeros Marinos de Pueblos Originarios, de carácter resolutivo.

El actual escenario de crecimiento urbano y su tendencia creciente, las actividades económicas de alto impacto están afectando el funcionamiento de los ecosistemas marino-costeros y la provisión de servicios ecosistémicos. Esto hace que sea necesario una revisión crítica de su marco operativo y de sus alcances en su vinculación con instrumentos de planificación territorial y especialmente en la forma de conducir la gobernanza de la costa para la sostenibilidad del bienestar humano, ya que las metas internacionales de reducir la pobreza y detener la degradación ambiental se encuentran estrechamente interrelacionadas y deben abordarse de manera simultánea (BID, 2017). La costa degradada está mucho más expuesta a amenazas naturales y con ello a grandes desastres, siendo ello un indicador de no sostenibilidad.

Actualmente la Ley de Borde Costero se encuentra en agenda parlamentaria pero no se ha puesto en discusión pública su contenido, lo cual es prioritario realizar. Recientemente el Policy Paper elaborado por Martínez et al. (2019), establecieron las siguientes recomendaciones referentes a la actual Ley de Borde Costero:

- La revisión del concepto de "borde costero" que, como unidad básica de gestión, es insostenible frente a las actuales necesidades de ordenamiento y planificación territorial debido a la rápida degradación que está experimentando la zona costera del país. Es urgente que se releve el concepto de zona costera y se reconozca en la práctica como un territorio singular, para que pueda ser comprendida como objeto de gestión.
- Uno de los mayores desafíos que involucra la revisión de la PNUBC, es su adecuación a las modificaciones que están teniendo lugar en el país en materia de ordenamiento y planificación territorial. Ello conlleva a asegurar que la visión del desarrollo sostenible planteada por las Estrategias Regionales sea plasmada en instrumentos de planificación que reconocen y valoran los ambientes costeros como parte esencial de este desarrollo. Es fundamental que, en este nuevo escenario de ordenamiento territorial que se abrió en

el país, se reconozca e integre a la zona costera como objeto particular de gestión local.

- Frente a esto último, se observó que si bien a nivel nacional y regional, todos los lineamientos estratégicos asociados al ordenamiento y la planificación territorial reconocen los ecosistemas costeros como parte fundamental del desarrollo sostenible, en la práctica el enorme traslape de atribuciones, la descoordinación entre funciones y la gran cantidad de entidades públicas que participan en la gestión, entorpece los procesos de gestión y termina generando zonificaciones costeras con poco poder de articulación y desfasadas en el tiempo.

### **5.3 DAÑO ECONÓMICO ASOCIADO A LA EROSIÓN DE PLAYAS DE CHILE**

El análisis del daño económico asociado a la erosión de playas se efectúa, a modo de ejemplo, para 6 playas ubicadas en la bahía de Valparaíso, donde se estima en un total cercano a los 500 mil dólares anuales de pérdida económica producto del riesgo de erosión causada por cambio climático para estas playas.

Este análisis debiera ser refinado i) sobre la base de información obtenida mediante encuestas y ii) extendiendo a más playas de Chile, con el fin de aportar en la decisión de tomar medidas de adaptación como la protección y alimentación artificial (*nourishment*) de arenas. Una medición más detallada permitirá precisar las estimaciones iniciales que se han realizado en este estudio.

## 6 REFERENCIAS

Agredano, R., Cienfuegos, R., Catalán, P., Mignot, E., 2015. Descripción de la evolución mensual de la playa de Reñaca y el impacto de las marejadas de agosto 2015. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, October 21-23.

Barragán, J., De Andrés, M., 2015. Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Ocean & Coastal Management* 114: 11-20.

Barragán Muñoz, J. 2014. *Política, Gestión y Litoral: Nueva visión de la gestión integrada de áreas litorales*. UNESCO. Ed. Tebar Flores: Madrid.

BID. 2017. Soluciones basadas en la naturaleza para fortalecer la resiliencia costera. Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0000824>

Bird, E. (2011). *Coastal geomorphology: an introduction*. John Wiley & Sons.

Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(3), 598-602.

Booij, N., Holthuijsen, L. H., & Ris, R. C. (1996). The "SWAN" wave model for shallow water. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(25).

Brouwer, R. (2000). Environmental value transfer: state of the art and future prospects. *Ecological Economics*, 32(1), 137–152. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00070-1)

Bruun, P. (1962) Sea-level rise as a cause of shore erosion. *J Waterways Harbors Division* 88:117–130  
Callaghan D (2008) Coastal hazard and severe storms in New South Wales, Australia. Report prepared for the NSW Dept of Natural Resources, Civil Engineering, Univ. of Queensland, Australia.

Bruun, P. (1988). The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion of large-scale two- and three- dimensional usages. *Journal of Coastal Research* 4, 627–648.

Campos-Caba, R., 2016. Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile. 136 pp.

Campos-Caba, R., Beyá, J. and Mena, M., 2015. Cuantificación de los daños históricos a infraestructura costera por marejadas en las costas de Chile. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, October 21-23.

Castro, C., Alvarado, C., Andrade, R., de La Maza, C., Guijón, R., Godoy, C., Labbé, G., Peña, F., Viejo, M., Villablanca, R., Zamora, F., Urrea, J. (2011). Algunas orientaciones para el manejo costero integrado en Chile. En: Barragán Muñoz, J.M. (coord.). *Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Propuestas para la acción*. Red IBERMAR (CYTED), Cádiz, 159-170.

CNUBC (2018). Antecedentes de la política nacional de uso del borde costero. Secretaría Técnica. Comisión Nacional de Uso del Borde Costero

CR<sup>2</sup> (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. <http://www.cr2.cl/megasequia/>. Accessed 2019/09/10.

Czajkowski, M., & Ščasný, M. (2010). Study on benefit transfer in an international setting. How to improve welfare estimates in the case of the countries' income heterogeneity? *Ecological Economics*, 69(12), 2409–2416. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.07.008>

Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts*. Department of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware.



Del Río, L., Plomaritis, T., Benavente, J., Valladares, M., Ribera, P., 2012. Establishing storm thresholds for the Spanish Gulf of Cádiz coast. *Geomorphology* 143-144, 13–23.

Desvousges, W. H., Naughton, M. C., & Parsons, G. R. (1992). Benefit transfer: Conceptual problems in estimating water quality benefits using existing studies. *Water Resources Research*, 28(3), 675–683. <https://doi.org/10.1029/91WR02592>

Echeverría, Joaquín. 2017. Cambios históricos en la línea litoral de la Ensenada de Algarrobo y morfodinámica reciente: criterios para el manejo integrado de la costa. Seminario de Grado presentado al Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile como uno de los requisitos para optar al Grado Académico de Licenciado en Geografía. P. Universidad Católica de Chile.

Enriquez-Acevedo, T., Botero, C. M., Cantero-Rodelo, R., Pertuz, A., & Suarez, A. (2018). Willingness to pay for Beach Ecosystem Services: The case study of three Colombian beaches. *Ocean & Coastal Management*, 161, 96–104. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2018.04.025>

Gironás, J. y Yáñez, G. (2019). Capítulo 18. Impactos y Adaptación en Infraestructura. En *Cambio Climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación*. Castilla, J. C., Meza, F., Vicuña, S., Marquet, P. A., Montero, J.-P. (eds.). Ediciones UC. Santiago, Chile, 2019, p. 480.

Gopalakrishnan, S., Smith, M. D., Slott, J. M., & Murray, A. B. (2011). The value of disappearing beaches: A hedonic pricing model with endogenous beach width. *Journal of Environmental Economics and Management*, 61(3), 297–310. <https://doi.org/10.1016/J.JEEM.2010.09.003>

Huang, J. C., Poor, P. J., & Zhao, M. Q. (2007). Economic valuation of beach erosion control. *Marine Resource Economics*, 22(3), 221–238. <https://doi.org/10.1086/mre.22.3.42629556>

Jiménez, J., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, E., Guillén, J., 2012. Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958–2008. *Geomorphology* 143-144, 24–33.

Jin, D., Hoagland, P., Au, D. K., & Qiu, J. (2015). Shoreline change, seawalls, and coastal property values. *Ocean & Coastal Management*, 114, 185–193. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2015.06.025>

Johnston, R. J., Ramachandran, M., & Parsons, G. R. (2015). Benefit Transfer Combining Revealed and Stated Preference Data (pp. 163–189). [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9930-0_9)

Landry, C. E., Keeler, A. G., & Kriesel, W. (2003). An economic evaluation of beach erosion management alternatives. *Marine Resource Economics*, 18(2), 105–127. <https://doi.org/10.1086/mre.18.2.42629388>

Lew, D. K., & Larson, D. M. (2008). Valuing a beach day with a repeated nested logit model of participation, site choice, and stochastic time value. *Marine Resource Economics*, 23(3), 233–252. <https://doi.org/10.1086/mre.23.3.42629616>

Martínez, C., Arenas, F., Bergamini, K., Urrea, J. 2019. *Hacia Una Ley De Costas En Chile: Criterios Y Desafíos En Un Contexto De Cambio Climático*. Serie Policy Paper, CIGIDEN. 24 pp.

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.

Martínez, C. 2016. Estudio de erosión costera, comuna de Santo Domingo. Elaborado por el Laboratorio de Geografía Aplicada UC para I. Municipalidad de Santo Domingo y Fundación COSMOS.

Martínez, C., Rojas, D., Quezada, M., Oliva, R., Quezada, J. 2015. Post-Earthquake coastal evolution and recovery of an embayed beach in central-southern Chile. *Geomorphology* 250: 321-333.

Martínez, C., Rojas, O., Aránguiz, R., Belmonte, A., Quezada, J., Altamirano, A., Flores, P. 2012. Riesgo de tsunami en Caleta Tubul, Región del Bio-Bío: escenarios extremos y transformaciones territoriales post-terremoto. *Revista de Geografía Norte Grande*, 53: 85-106.

- Martínez, C., Quezada, M., Rubio, P. 2011. Historical changes in the shoreline and littoral processes in a headland bay beach in central Chile. *Geomorphology*, 135: 80-96.
- Martínez, C. y S. Salinas. 2009. Morfodinámica y evolución reciente de playa Tunquén, Chile central. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(1):203-215.
- Martínez, C. 2007. Shoreline changes in Concon and Algarrobo bays, central Chile using an adjustment model. *Revista Investigaciones Marinas, Valparaíso*, 35 (2): 99-112.
- Martínez, C. 2001. El efecto de ensenada en los procesos litorales de las ensenadas de Valparaíso, Algarrobo y Cartagena, Chile Central. Tesis para optar al grado de Magister en Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.
- Masselink, G., Castelle, B., Scott, T., Dodet, G., Suarez, S., Jackson, D., Floc'h, F., 2016. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along
- Mulder, J., Hommes, S., Horstman, E., 2011. Implementation of coastal erosion management in the Netherlands. *Ocean & Coastal Management* 54, 888-897.
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., Van Wesenbeeck, B., Pontee, N., ... & Burks-Copes, K. A. (2016). The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLoS one*, 11(5), e0154735.
- Quezada, J., Jaque, E., Belmonte, A., Fernández, A., Vásquez, D., Martínez, C. 2010. Cambios geomorfológicos ocasionados por el evento sísmico del 27 de febrero de 2010 en el centro-sur de Chile. *Revista Obras y Proyectos*, 8: 4-11.
- Quezada, M. (2007). Estudio de erosión costera y regeneración de Espacios litorales. Una aplicación en playa el Papagayo, Quintero. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico, Universidad de Valparaíso.
- Raheem, N., Colt, S., Fleishman, E., Talberth, J., Swedeen, P., Boyle, K. J., ... Boumans, R. M. (2012). Application of non-market valuation to California's coastal policy decisions. *Marine Policy*, 36(5), 1166-1171. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.01.005>
- Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Williams, A. 2015. Coastal erosion problems along the Caribbean Coast of Colombia. *Ocean & Coastal Management*, 114: 120-144.
- Reguero, B. G., Beck, M. W., Bresch, D. N., Calil, J., & Meliane, I. (2018). Comparing the cost effectiveness of nature-based and coastal adaptation: A case study from the Gulf Coast of the United States. *PLoS one*, 13(4), e0192132.
- Sierra, J. P., & Casas-Prat, M. (2014). Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions. *Climatic change*, 124(4), 861-876.
- Stive MJF, Aarninkhof SGJ, Hamm L, Hanson H, Larson M, Wijnberg KM, Nicholls RJ, Capobianco M (2002). Variability of shore and shoreline evolution. *Coast Eng* 47:211-235
- Tavares, C. 2002. Eficiencia de la *ammophila arenaria* en atrapar sedimentos transportados por el Viento. *Ecología Aplicada*, 1(1): 13-17.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ayhan, E. 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. \*current version 4.3.
- Whitehead, J. C., Dumas, C. F., Herstine, J., Hill, J., & Buerger, B. (2008). Valuing Beach Access and Width with Revealed and Stated Preference Data. *Marine Resource Economics*. The University of Chicago Press. <https://doi.org/10.2307/42629607>
- Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J.F. & Molina, M. (2017) El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research (LAJAR)*, 45(4): 622 – 648. DOI: 10.3856/vol45-issue4-fulltext-1.

Winckler, P., Contreras-López, M., Castilla, J. C. (2019a). El cambio climático en el océano y en la zona costera y el océano de Chile. En "El cambio climático en Chile". Eds. Vicuña et al. Ediciones UC.

Winckler, P., Esparza, C., Agredano, R. y Ibaceta, R. (2019b). Nuevas metodologías para el estudio de marejadas en Chile. GEOLIBRO N° 29. "La zona costera en Chile: adaptación y planificación para la resiliencia". Eds. Hidalgo et al. Ediciones UC.

Yáñez-Arancibia, Day, A.J. 2012. Manejo ecosistémico costero: interdisciplina frente al cambio climático, p. 45-58. In: V. Fernández, L. Repetto, B. Vianni, C. von Sanden (Eds.), Procesos, Contexto y Resultados del Trabajo Interdisciplinario. Seminario En\_Clave Inter Oct. 2012. Universidad de la República, Uruguay. 184 pp.

Yáñez-Arancibia, A. (Ed.). 2013. Cambio Climático, Dimensión Ecológica y Socioeconómica. Instituto de Ecología A. C., INECC-SEMARNAT, AGT Editorial, México DF. 300 pp.

Zhang, H., Sheng, J., 2015. Examination of extreme sea levels due to storm surges and tides over the northwest Pacific Ocean. *Continental Shelf Research* 93, 81-97.

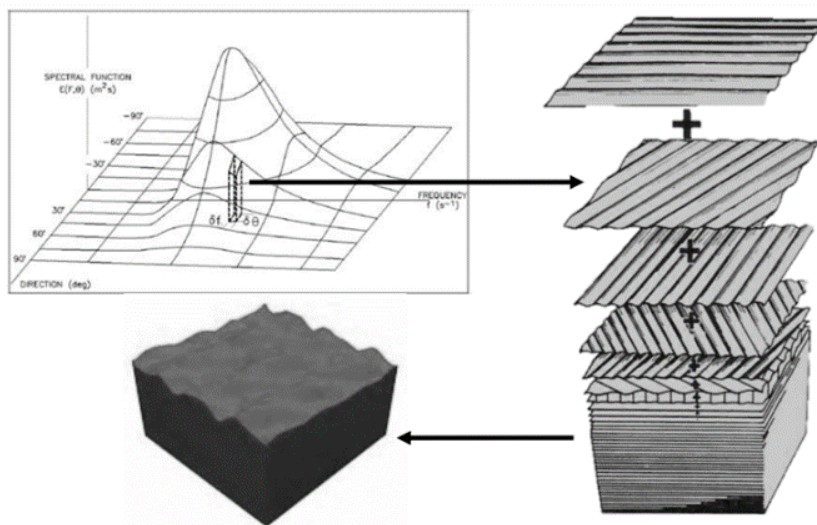
## 7 ANEXOS

### 7.1 METODOLOGÍA DE TRASFORMACIÓN DE OLAJE

Para estudiar el oleaje en las playas, se transfirieron las series de tiempo de los estados de mar desde aguas profundas para el período histórico y la proyección. Las series corresponden a espectros bidimensionales, cada 3 horas, de 1 hindcast forzado con vientos CFSR y los 6 GCM simulados en este estudio. Se utilizó el modelo numérico SWAN (Massey et al. 2011), el cual utiliza como dato de entrada los espectros irregulares de oleaje en aguas profundas sin necesidad de utilizar parametrizaciones en su distribución de frecuencias o direcciones. Dado el volumen de los datos de oleaje de aguas profundas<sup>19</sup>, se optó por aplicar una técnica desarrollada por Massel (1989) e implementada y validada por Nicolau del Roure (2010) y Puelma (2015). Esta técnica consiste en la transformación de una serie de espectros sintéticos de altura unitaria ( $H_{m0} = 1$  m)<sup>20</sup> cuyas características principales (periodo pico y dirección de incidencia en aguas profundas) abarcan el 100% de las componentes activas de los espectros de oleaje (Figura 69).

Como resultado del proceso de transferencia del oleaje, se obtiene una serie de tiempo en cada playa, en la forma de espectros bidimensionales de oleaje. A partir de estos espectros se pueden calcular alturas espectrales  $H_{m0}$ , periodos y direcciones medias  $T_m$  del oleaje frente a los puertos. Esta técnica, denominada “transformación pseudo-espectral”, se detalla a continuación.

Figura 69: Espectro bidimensional de oleaje. Fuente: Puelma (2015).



El método pseudo-espectral se basa en el supuesto de que la altura significativa espectral en la bocana de entrada de una dársena portuaria  $H_{local}$  se representa como la altura significativa en

<sup>19</sup> La cantidad de datos es del orden de cientos de miles de estados de mar.

<sup>20</sup> Esta condición permite que el oleaje sea lineal en aguas profundas y mantenga su linealidad al ser propagado al sitio de estudio.

aguas profundas  $H_{ap}$  multiplicada por un coeficiente de agitación  $K_a(T, \theta)$ , el cual es dependiente del periodo  $T$  y la dirección de incidencia del oleaje  $\theta$ .

$$H_{local} = H_{ap} \times K_a$$

Dicho supuesto es válido siempre y cuando el oleaje es lineal (Massel et al., 1989). De la definición de altura significativa espectral dada en la literatura (ej. Hothuijsen, 2007) la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$4\sqrt{m_0}_{local} = 4\sqrt{m_0}_{ap} \times K_a$$

Donde  $m_0$  es el momento de orden cero del espectro bidimensional  $S(f, \theta)$ , definido en términos de la frecuencia  $f$  y la dirección  $\theta$ , el cual se define como:

$$m_0 = \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta$$

Por lo cual la ecuación (1), puede reescribirse como:

$$\sqrt{\int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta}_{local} = \sqrt{\int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta}_{ap} \times K_a$$

o

$$\left\{ \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta \right\}_{local} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f, \theta) df d\theta \right\}_{ap} \times K_a^2$$

La ecuación anterior se puede reescribir en términos diferenciales:

$$\{S(f, \theta)d\theta\}_{local} = \{S(f, \theta)d\theta\}_{ap} \times K_a^2$$

Finalmente, la expresión anterior se puede reescribir en términos diferenciales:

$$S(f, \theta) = K_a^2 * S(f, \theta) \frac{d\theta_{ap}}{d\theta_{local}}$$

El coeficiente  $K_a(T, \theta)$  representa físicamente la variación porcentual del bin de energía que arriba al sector de interés, y el término

$$\frac{d\theta_{ap}}{d\theta_{local}}$$

representa la variación direccional del bin de energía local respecto al bin de energía del mismo espectro en aguas profundas.

El coeficiente de agitación  $K_a(T, \theta)$  se puede generar por medio de funciones de transferencia lineales, a partir de la propagación de un conjunto de espectros sintéticos unitarios ( $H_{m0} = 1 m$ ) representativos de las componentes energéticas activas del espectro de oleaje offshore que potencialmente pueden arribar al interior de los puntos de interés.

Para discretizar el espectro y generar la transformación de cada una de sus componentes, en este trabajo se utilizan un total de 96 espectros sintéticos unitarios del tipo JONSWAP (Hasselmann et al. 1973), abarcando periodos desde los 4 s hasta los 26 s discretizados cada 2 s y direcciones entre la  $202.5^\circ$  hasta la  $360^\circ$  discretizadas cada  $22.5^\circ$ .

## 7.2 RETROCESO PROYECTADO A 2026-2045 EN PLAYAS ANALIZADAS EN DETALLE

En los casos en que no se tenga el dato del tamaño de sedimento de las playas, el retroceso se mostrará para las posibilidades de menor y mayor retroceso de la línea litoral.

Figura A7.2.1: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Hornitos (sector norte)

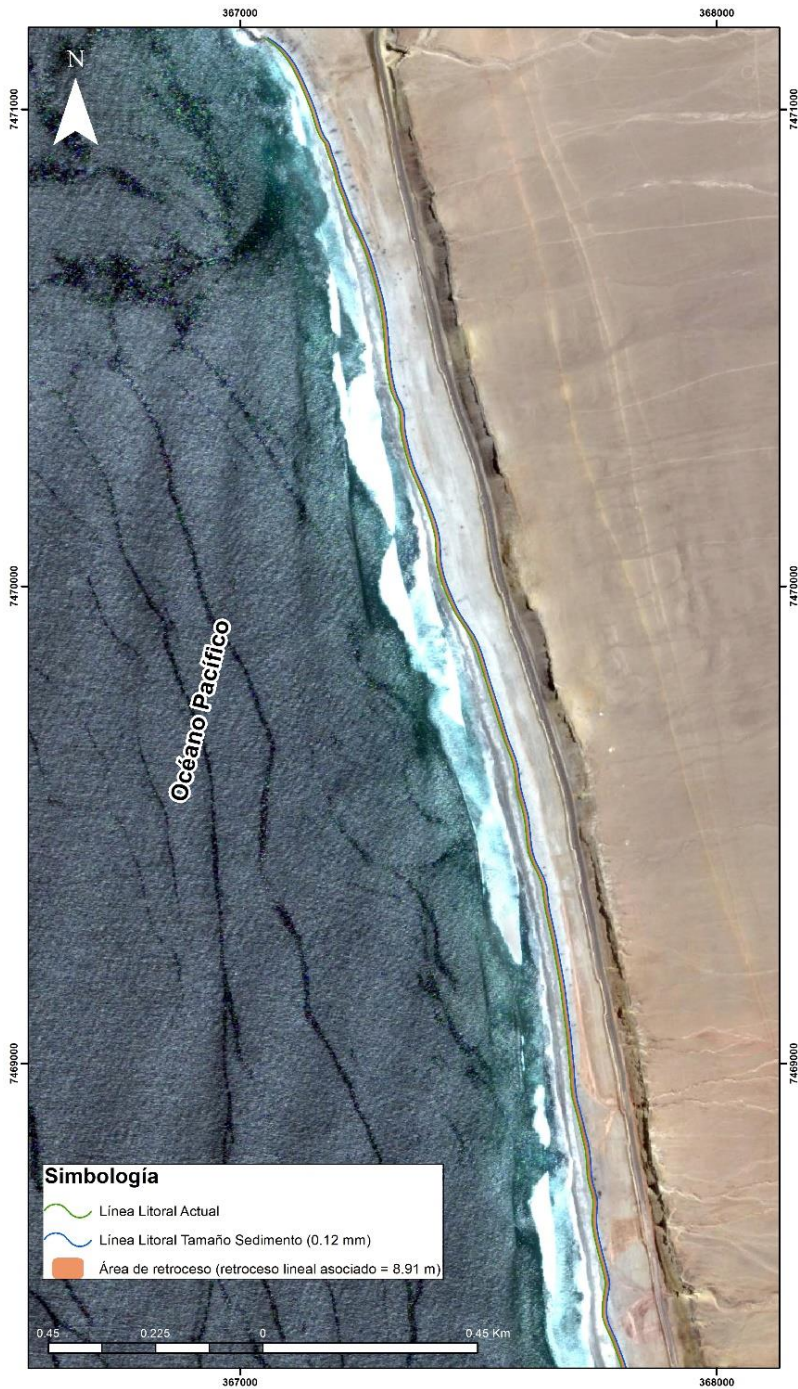


Figura A7.2.2: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Hornitos (sector centro-norte)





Figura A7.2.3: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Hornitos (sector centro-sur)

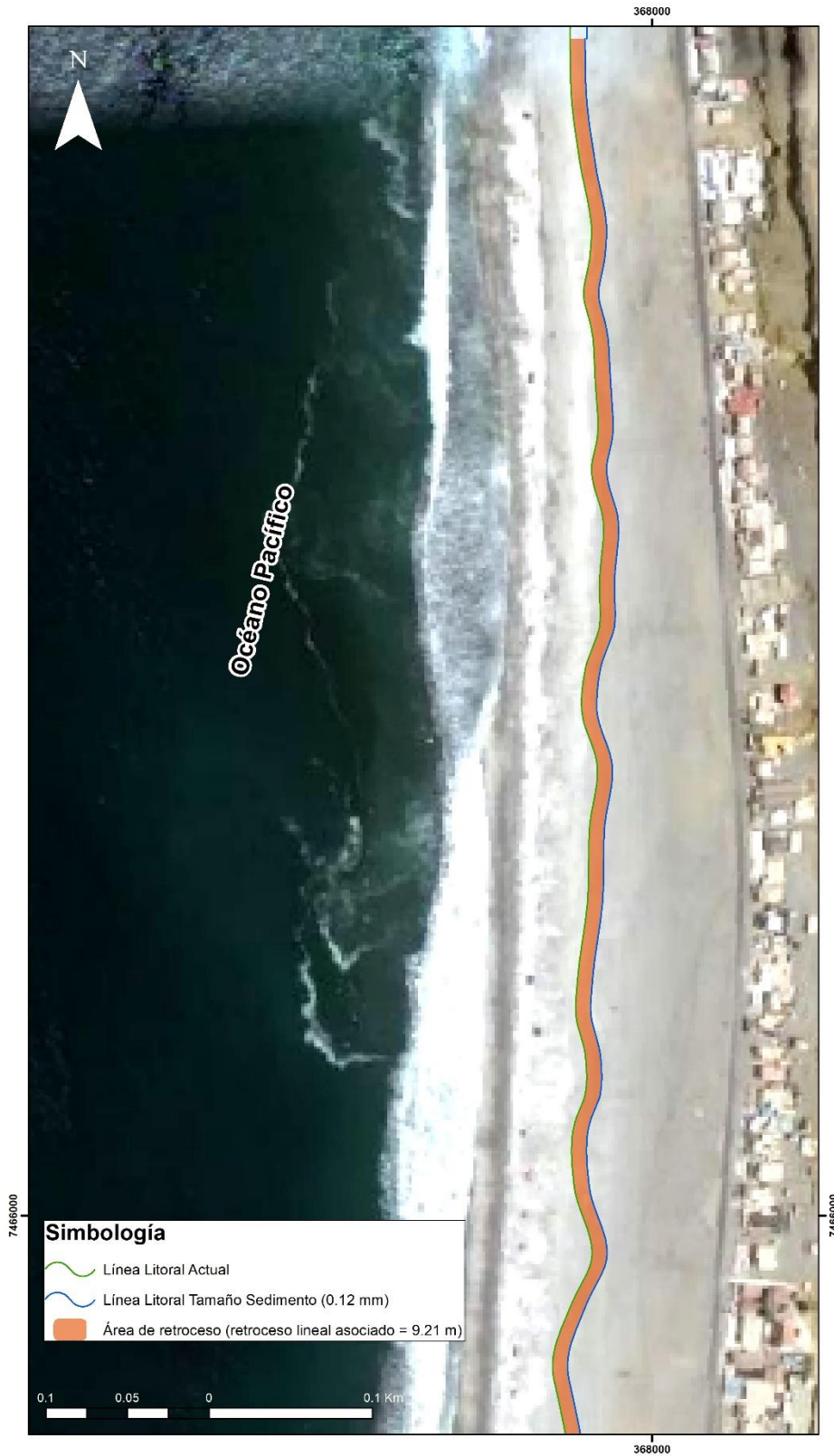


Figura A7.2.4: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Hornitos (sector sur)

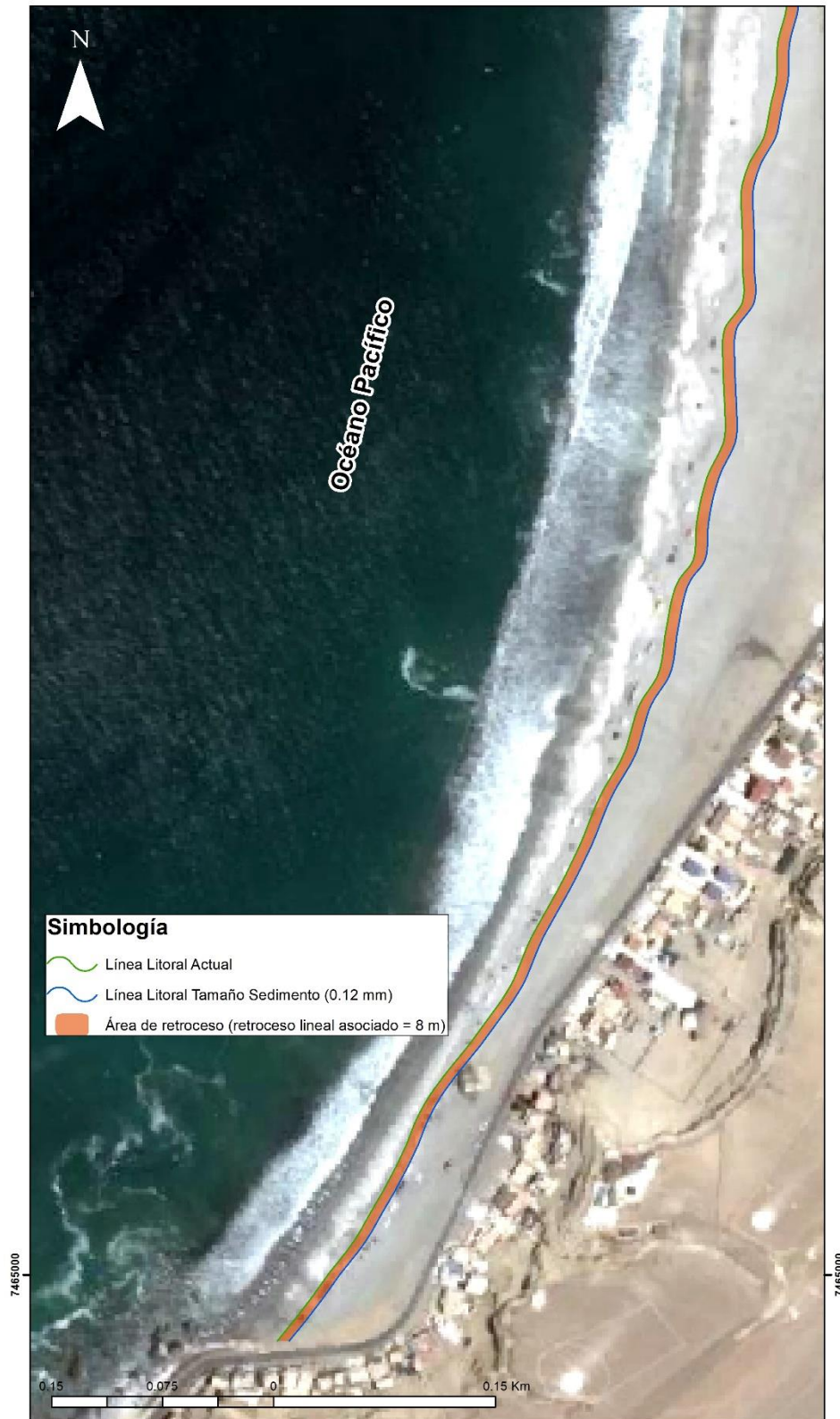


Figura A7.2.5: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Cochoa

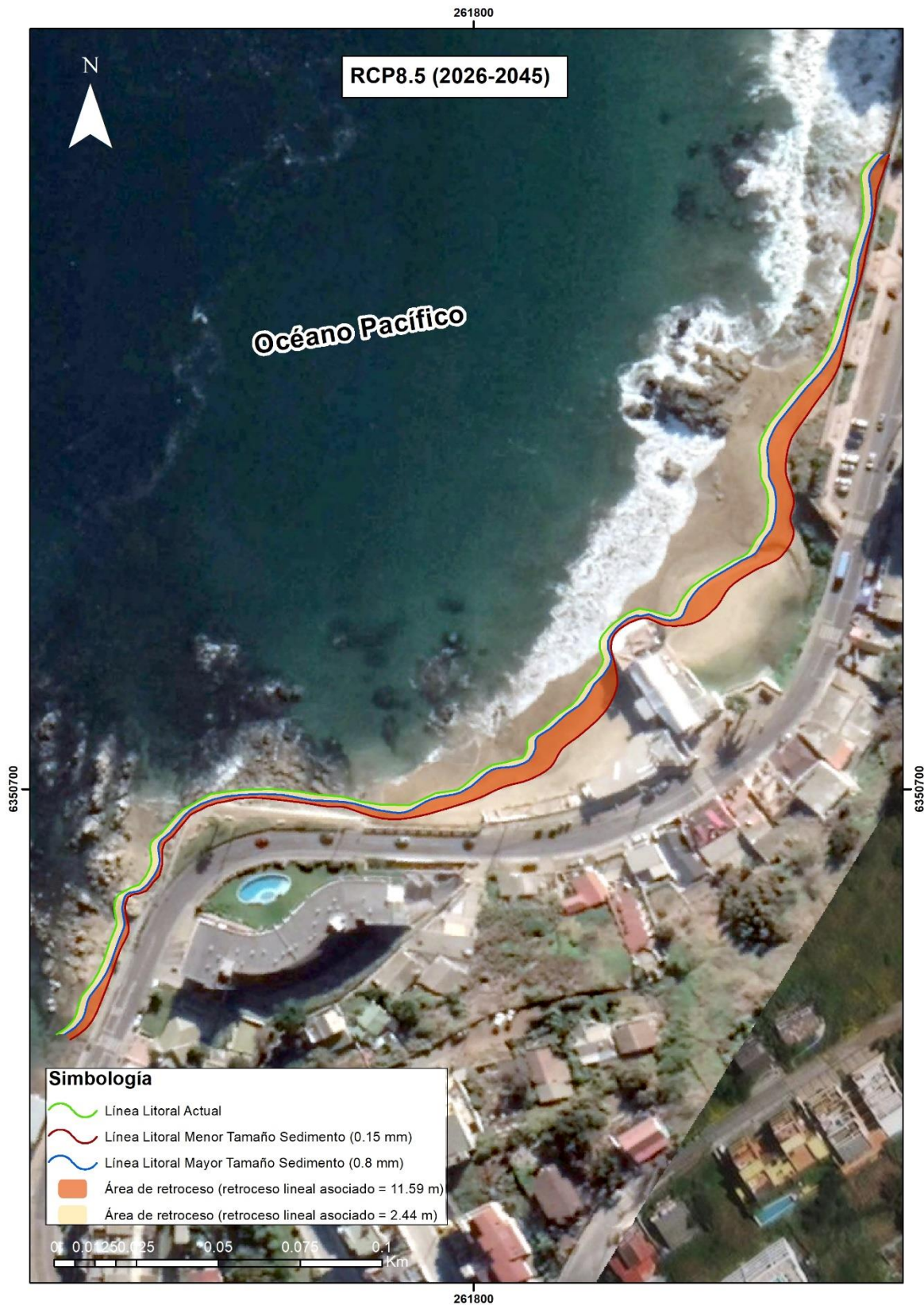


Figura A7.2.6: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Reñaca



Figura A7.2.7: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Las Cañitas



Figura A7.2.8: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para Las Salinas

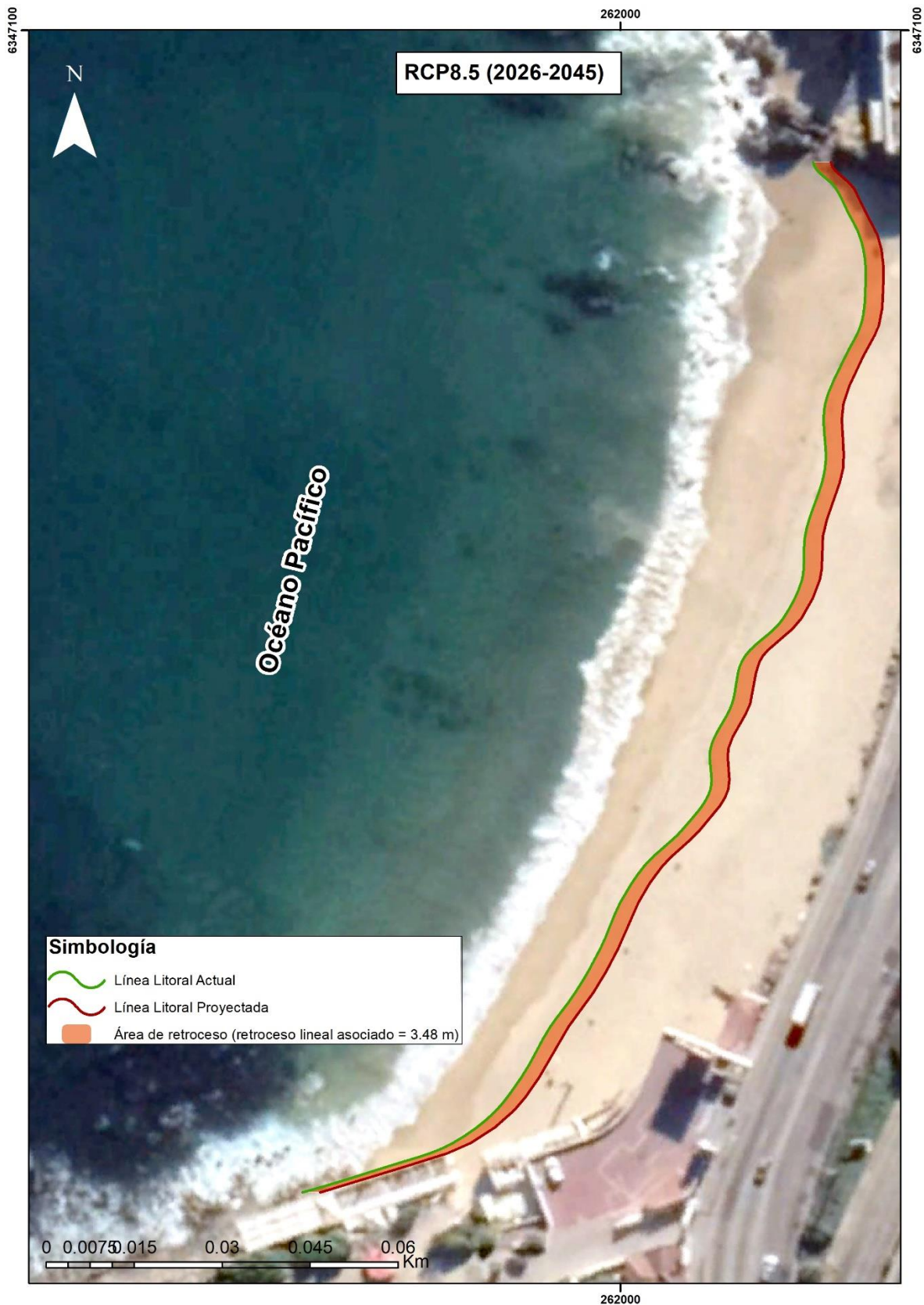


Figura A7.2.9: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Marineros (norte)

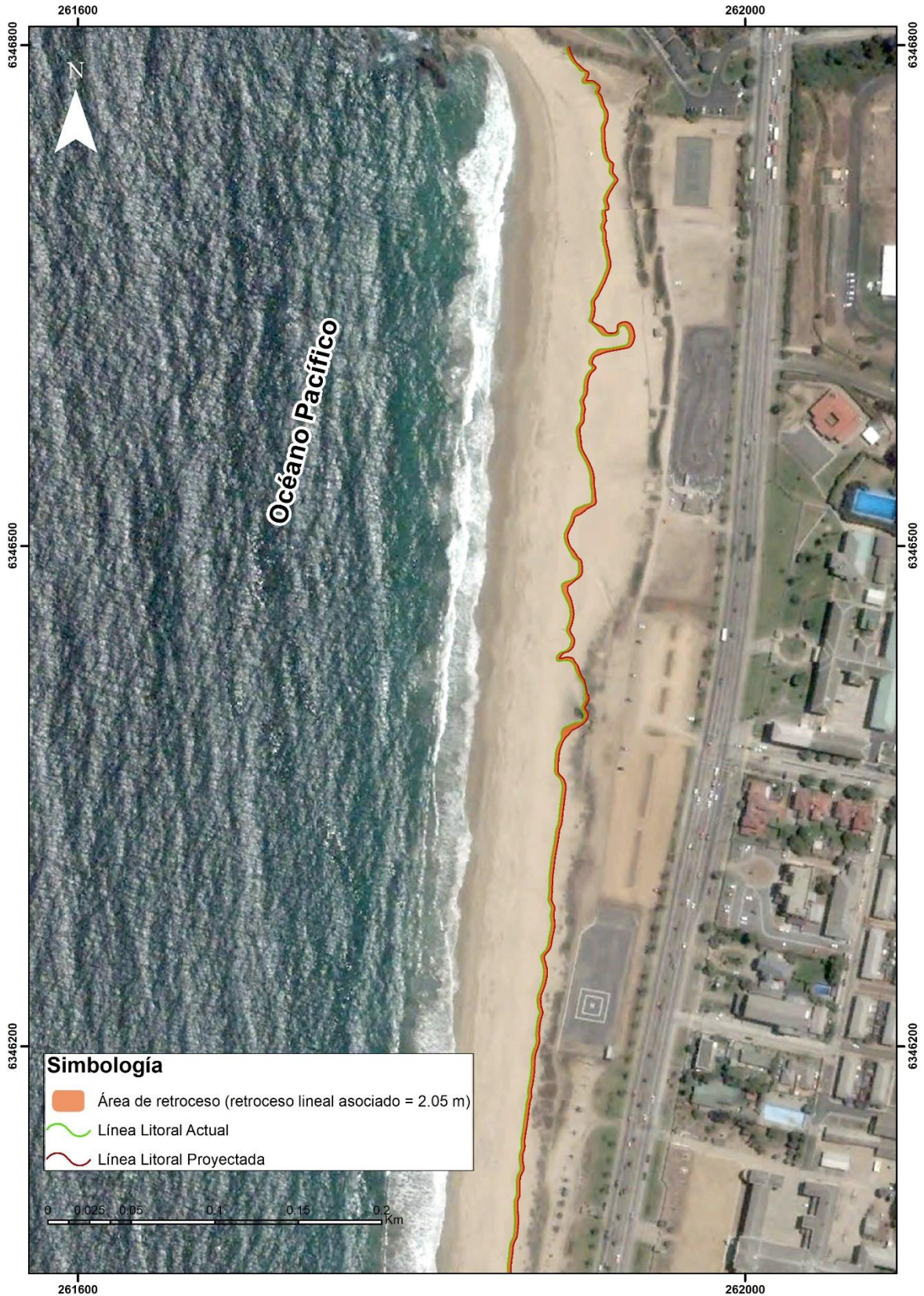


Figura A7.2.10: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Marineros (centro)

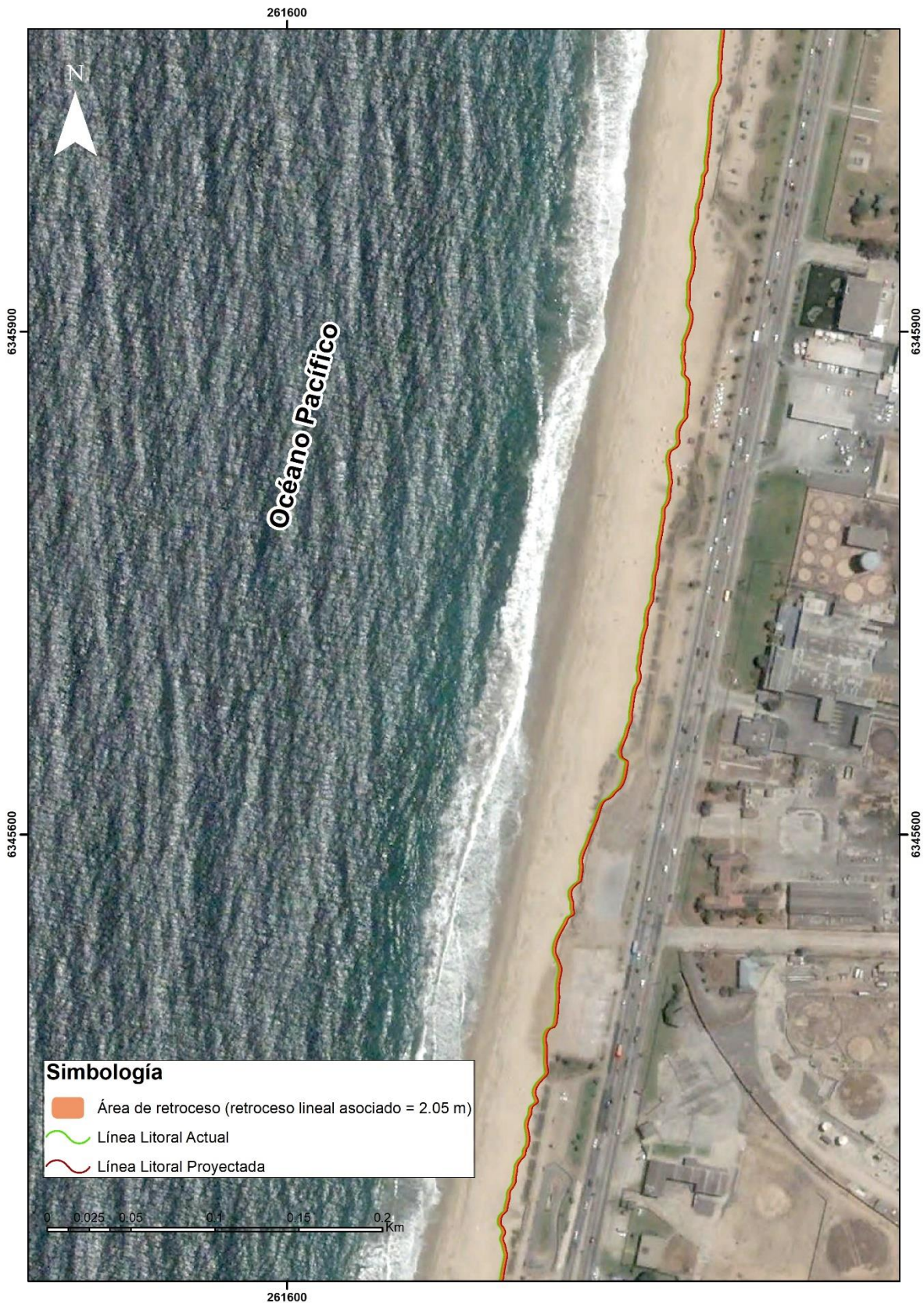




Figura A7.2.11: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Marineros (sur)

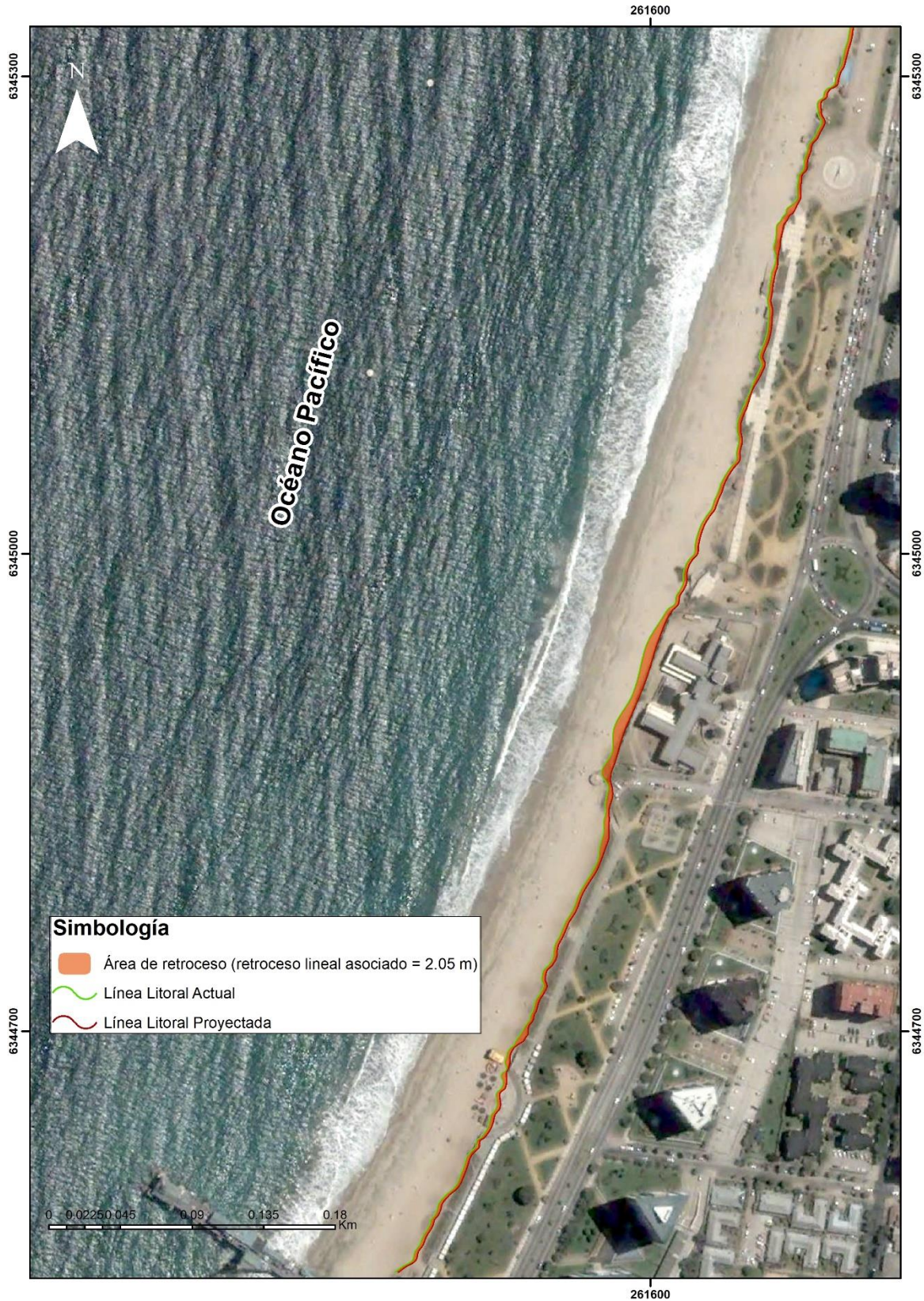


Figura A7.2.12: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Miramar



Figura A7.2.13: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para Caleta Portales



Figura A7.2.14: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa San Mateo

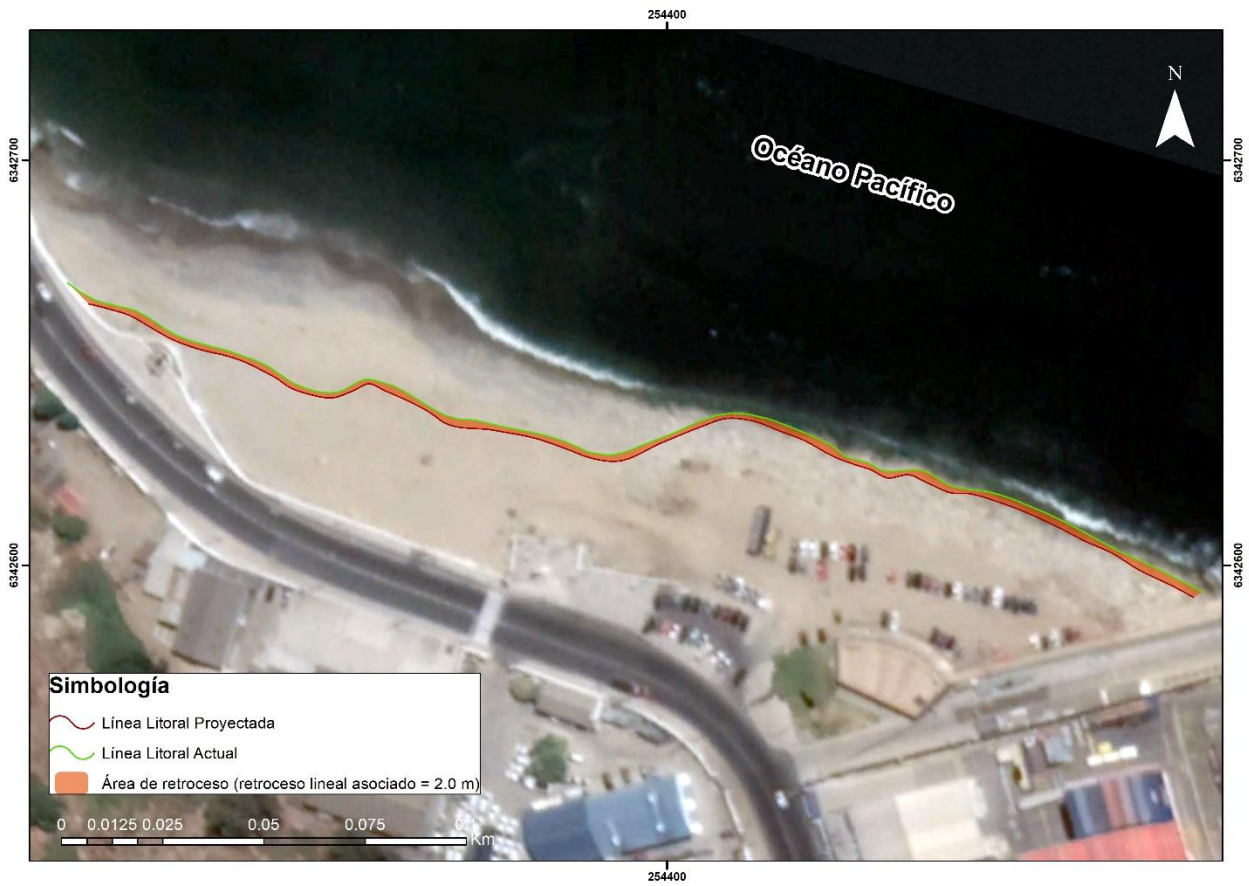


Figura A7.2.15: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para playa Las Torpederas



Figura A7.2.16: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para Pichilemu (norte)

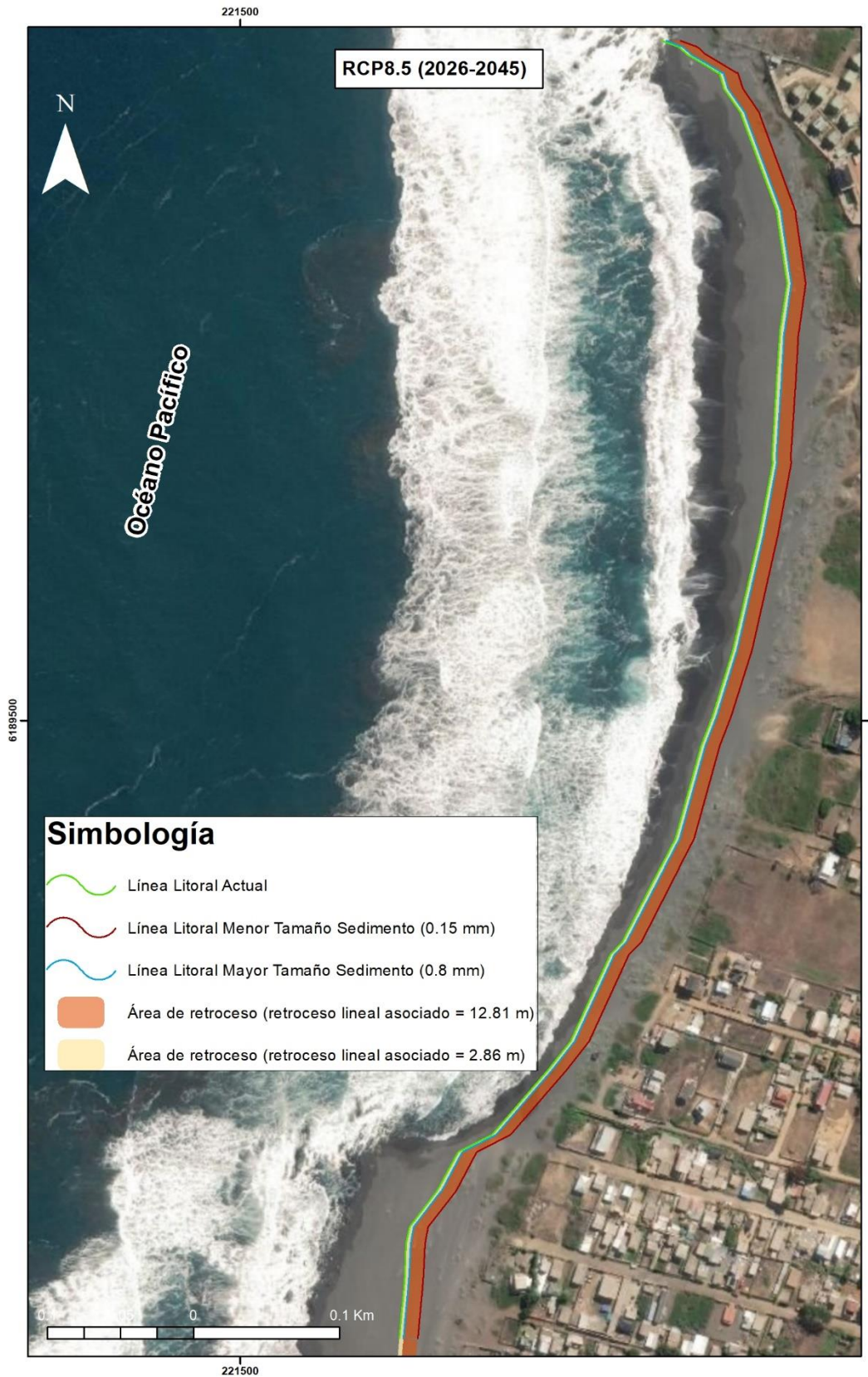


Figura A7.2.17: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para Pichilemu (sector centro-norte)



Figura A7.2.18: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para Pichilemu (sector centro-sur)





Figura A7.2.19: Erosión proyectada según escenario RCP8.5 (2026-2045) para Pichilemu (sur)



