

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

Volumen 6: Vulnerabilidad en humedales costeros  
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)
- Nickolas Bassi (UPLA)
- Nicolás Bambach (PUC)
- Oscar Melo (PUC)
- Patricio Winckler (UV)
- Roberto Agredano (UCM)
- Sebastián Vicuña (PUC)
- Stefan Gelcich (PUC)

### **Equipo consultor volumen 6: Vulnerabilidad en humedales**

- José Miguel Fariña (PUC)
- Manuel Contreras-López (UPLA)
- Cristián Larraguibel (PUCV)
- Patricio Winckler (UV)
- César Esparza (UV)
- David Morales (PUC)
- Nickolas Bassi (UPLA)
- Sebastián Vicuña (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 6: Vulnerabilidad en humedales, 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>10</b> |
| 1.1 OBJETIVOS   | 10        |
| 1.2 ESTRUCTURA DEL INFORME  | 11        |
| 1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO                                     | 11        |
| 1.4 EQUIPO DE TRABAJO   | 13        |
| 1.5 AGRADECIMIENTOS   | 14        |
| 1.6 GLOSARIO  | 15        |
| <b>2 MARCO DE REFERENCIA</b>  | <b>17</b> |
| <b>3 METODOLOGÍA</b>  | <b>24</b> |
| 3.1 INVENTARIO DE HUMEDALES   | 24        |
| 3.2 CAMBIOS EN LOS ESPEJOS DE AGUA  | 24        |
| 3.3 ANÁLISIS DE CAUDALES  | 25        |
| 3.4 ANÁLISIS DE MAREJADAS, NIVEL DEL MAR Y COTA DE INUNDACIÓN             | 26        |
| 3.4.1 Marejadas   | 26        |
| 3.4.2 Nivel medio del Mar   | 27        |
| 3.4.3 Cota de inundación  | 28        |
| 3.5 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO   | 31        |
| 3.6 ANÁLISIS DE COMUNIDADES DE PLANTAS                                    | 38        |
| 3.6.1 Identificación de cuerpos de agua                                   | 38        |
| 3.6.2 Perturbaciones en las comunidades de plantas                        | 38        |
| 3.6.3 Uso de teledetección satelital para identificar cubierta vegetativa | 39        |
| 3.6.4 Levantamientos en terreno   | 40        |
| <b>4 RESULTADOS</b>   | <b>42</b> |
| 4.1 INVENTARIO DE HUMEDALES   | 42        |
| 4.2 CAMBIO EN LOS ESPEJOS DE AGUA   | 45        |
| 4.3 ANÁLISIS DE CAUDALES  | 46        |
| 4.4 ANÁLISIS DE MAREJADAS, NIVEL DEL MAR Y COTA DE INUNDACIÓN             | 46        |
| 4.4.1 Marejadas   | 46        |
| 4.4.2 Nivel medio del Mar   | 50        |
| 4.4.3 Cota de inundación  | 52        |
| 4.5 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO   | 55        |
| 4.6 ANÁLISIS DE COMUNIDADES DE PLANTAS                                    | 56        |
| 4.6.1 Desembocadura Estero Copiapó (Salinas Copiapó Sur)                  | 57        |
| 4.6.2 Punta Teatinos  | 60        |
| 4.6.3 Humedal Tongoy  | 64        |
| 4.6.4 Salinas Grande  | 67        |
| 4.6.5 La Cebada   | 71        |
| 4.6.6 Conchalí  | 74        |
| 4.6.7 Mantagua  | 78        |
| 4.6.8 San Alfonso   | 82        |
| 4.6.9 El Yali   | 85        |
| 4.6.10 Pocillas   | 88        |
| 4.6.11 Análisis de comunidades de plantas                                 | 92        |



|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>            | <b>95</b>  |
| 5.1      | SOBRE LOS RESULTADOS DE ESTE ESTUDIO.....              | 95         |
| 5.2      | CONSERVACIÓN DE LOS HUMEDALES COSTEROS .....           | 96         |
| 5.2.1    | Generalidades.....                                     | 96         |
| 5.2.2    | Iniciativas a nivel internacional.....                 | 97         |
| 5.2.3    | Iniciativas a nivel nacional.....                      | 97         |
| 5.3      | CONSERVACIÓN DE AVES MIGRATORIAS.....                  | 99         |
| <b>6</b> | <b>REFERENCIAS.....</b>                                | <b>102</b> |
| <b>7</b> | <b>ANEXOS.....</b>                                     | <b>105</b> |
| 7.1      | HUMEDALES SIN INFORMACIÓN DE CUBIERTA VEGETATIVA ..... | 105        |
| 7.1.1    | Salinas de Copiapó (Norte).....                        | 106        |
| 7.1.2    | Carrizal Bajo.....                                     | 108        |
| 7.1.3    | Huasco .....   | 109        |
| 7.1.4    | Choros Bajos.....                                      | 110        |
| 7.1.5    | El Culebrón .....                                      | 113        |
| 7.1.6    | Salinas Chica.....                                     | 114        |
| 7.1.7    | Pachingo .....   | 117        |
| 7.1.8    | El Limarí.....   | 118        |
| 7.1.9    | Huentelauquén.....                                     | 120        |
| 7.1.10   | Quilimarí.....   | 122        |
| 7.1.11   | Pichicuy.....  | 123        |
| 7.1.12   | Humedal Cartagena .....                                | 124        |
| 7.1.13   | Desembocadura Maipo .....                              | 126        |
| 7.1.14   | Pichilemu - Laguna Bajel.....                          | 127        |
| 7.1.15   | Vegas del Itata .....                                  | 129        |
| 7.1.16   | Merquiche .....  | 131        |
| 7.1.17   | Vegas de Coliumo .....                                 | 133        |
| 7.1.18   | Lenga .....  | 135        |
| 7.1.19   | Vegas de Carampangue .....                             | 136        |
| 7.1.20   | Tubul .....  | 138        |
| 7.1.21   | Chaihuín.....  | 139        |
| 7.1.22   | Cucao .....  | 141        |

# 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 5 cubre la vulnerabilidad en humedales.

## 1.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

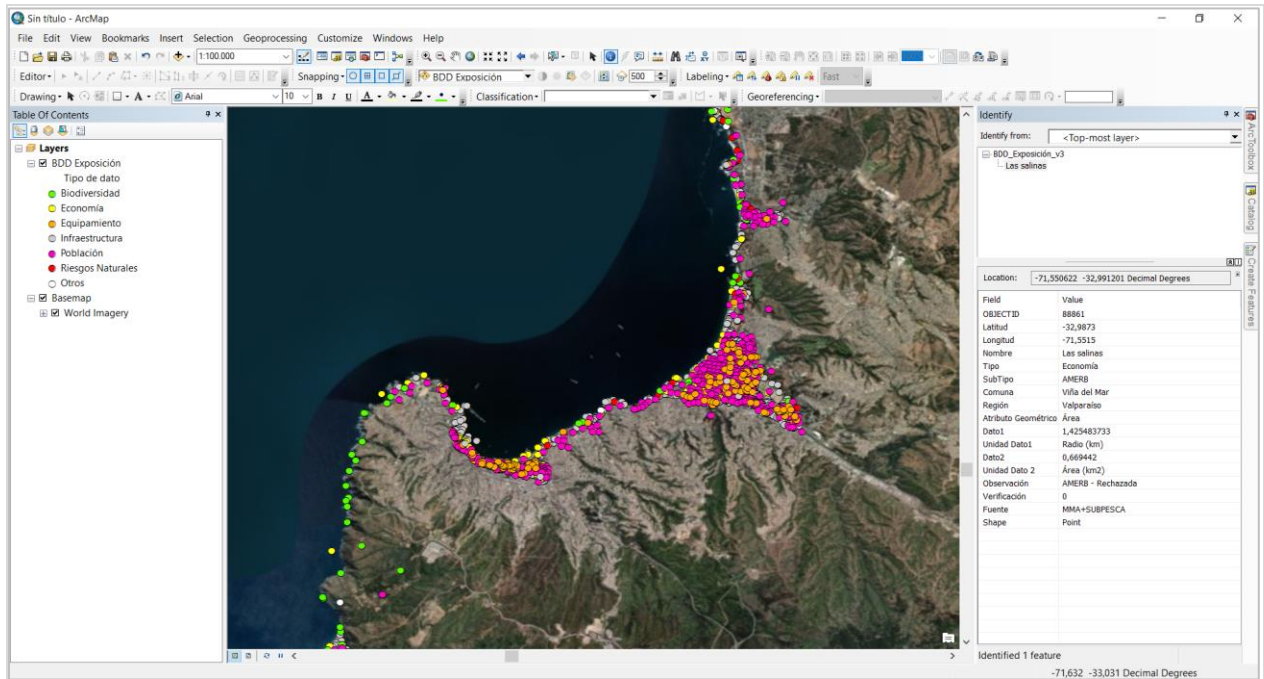
La información generada en el estudio fue proporcionada al Ministerio de Medio Ambiente en forma de un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante la elaboración de una Geodatabase<sup>1</sup> (GDB). Esta base de datos, compatible con el software ArcGis 10 o superior, se utilizó para elaborar sets 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. 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, Cucao, 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 muestra la metodología y resultados cualitativos y semi - cuantitativos para analizar el impacto y vulnerabilidad del cambio climático en 44 humedales costeros que corresponden a una muestra representativa del gradiente latitudinal presente entre los 1692 humedales identificados (una muestra de 2,6% de tamaño). La idea central de esta evaluación es comprender el efecto que pueden tener cambios en las condiciones de ingreso de agua salada desde el océano (marejadas) y agua dulce desde las cuencas continentales sobre el espejo de agua. Estas variables están condicionadas por el cambio climático a través de posibles cambios en patrones de precipitación (caudales) y vientos (marejadas). Se espera que la cantidad (y calidad) de agua en el humedal y por ende la ocurrencia de efectos ecológicos dependa de las cantidades relativas de agua que llegan a un humedal.

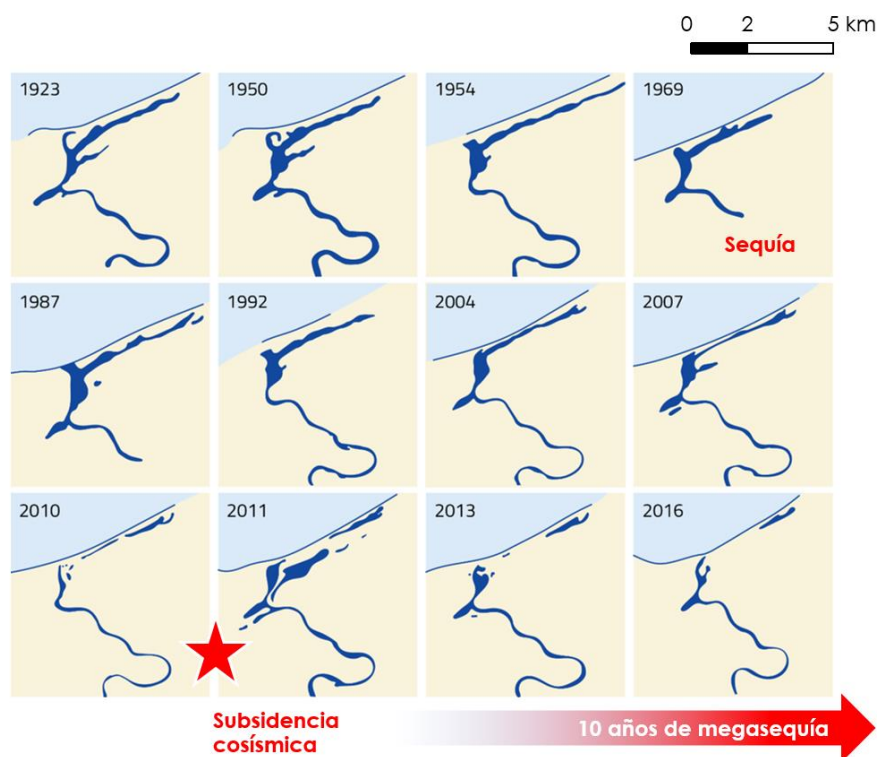
El cambio climático contemporáneo ha reducido significativamente la cantidad y distribución de los humedales en todo el mundo, así como la estacionalidad del agua que fluye hacia los humedales (Box et al. 2008, Barnett et al. 2016, Bradley & Yanega 2018). Esto ha tenido como consecuencia, cambios notables en la composición de las especies de aves acuáticas, peces e invertebrados en un período relativamente corto (Sada et al. 2005, Moore 2016, Senner et al. 2018), además de reducir la disponibilidad de sitios de agua dulce para las aves acuáticas y otras especies dependientes de los humedales. El cambio climático antropogénico aumenta los riesgos de desajustes entre la fenología de las especies y las condiciones ambientales, lo que resulta en el deterioro de las principales rutas migratorias (Koenig 2002, Iknayan & Beissinger 2018). La desaparición de las salinas en la región mediterránea implica que las aves acuáticas migratorias y otras especies están sufriendo una disminución significativa de sus poblaciones debido a los cambios de hábitat a gran escala inducidos por el clima (Steen et al. 2016, Iknayan & Beissinger 2018). Un factor importante a considerar es la salinización creciente de los humedales por efecto de marejadas y aumento de las tasas de evaporación (Steen et al. 2016), con la concomitante disminución del número de cuerpos de agua dulce, fenómenos directa o indirectamente atribuibles al cambio climático.

Los humedales costeros juegan un rol fundamental en los ciclos reproductivos de algunos animales, el crecimiento de las plantas y la subsistencia de comunidades. Son, asimismo, parte de un sistema interconectado de cuerpos de agua que forma un verdadero corredor ecológico. En Chile central existe un complejo corredor ecológico fragmentado, que se compone por cientos de cuerpos de agua someros (Marquet et al., 2012). Estos humedales son ambientes extremadamente dinámicos y frágiles, cuya existencia se encuentra condicionada por una gran variedad de factores naturales y antrópicos, entre los que se cuentan la variabilidad hidrológica, el alto contenido energético litoral, la variabilidad en la disposición de sedimentos y los procesos tectónicos que generan cambios morfológicos mayores en los sectores costeros. De esta forma es esperable que el sistema de humedales costeros de Chile reaccione a cambios en el régimen de precipitaciones, temperatura ambiente, oleaje y nivel del mar, entre otros.

Fariña et al. (2012) establecen cómo el cambio en el régimen de precipitaciones puede alterar la dinámica del humedal, facilitando las conexiones con el mar cuando existe aporte de precipitaciones y disminuyendo su espejo de agua en períodos de sequía. Contreras-López et al.

(2017), por su parte, muestran cómo 57 humedales costeros, ubicados entre la región de Valparaíso y Coquimbo, redujeron en un 40% sus espejos de agua durante la prolongada sequía desde el año 2007 a 2016. Los regímenes estacionales de estos cuerpos de agua típicos de la región de Coquimbo hacia el sur se transformaron de lagunas permanentes en lagunas estacionales. En la Figura 3 se ilustran, a modo de ejemplo, los drásticos cambios que ha experimentado la laguna costera de El Yali, en Santo Domingo, como consecuencia de los efectos del terremoto y tsunami del año 2010 y una prolongada sequía.

**Figura 3: Evolución morfológica de la laguna costera El Yali, Santo Domingo (sitio Ramsar N°878), entre 1923 y 2016. En negrita se muestra el cuerpo de agua y en blanco la parte terrestre. La línea superior izquierda corresponde a la línea de costa. Fuente: Adaptado de Winckler et al. (2019).**



Al observar el tipo de sedimentos que conforman las playas y barras que separan a los humedales costeros del mar, su orientación y grado de exposición, es posible deducir algunos de los procesos asociados al oleaje que los afectan. La Figura 4 ilustra cómo dichos procesos afectan al humedal Salinas Chica, ubicado en la cabeza de la Bahía de Tongoy, en tanto que la Figura 5 muestra al Humedal El Teniente, emplazado al sur del Punta Lengua de Vaca.

**Humedal expuesto al oleaje:** El humedal Salinas Chica se encuentra protegido del oleaje del suroeste por Punta Lengua de Vaca y del noreste por la península de Tongoy, lo que permite la acumulación de grandes volúmenes de arena que conforman la denominada playa grande Tongoy. Esta playa se extiende por 14 [km] entre Puerto Aldea y Tongoy y en ella se distribuyen 3 humedales: Al oeste el humedal Pachingo, al centro las Salinas Grande o Los Litres y al este Salinas

Chica. Estos tres cuerpos de agua han sido recientemente designados como el sitio Ramsar N°2361 "Humedales Costeros de la Bahía de Tongoy". La barra de arena que separa al humedal del mar presenta claros signos de sobrepaso y erosión. Además, en la ribera del humedal es posible encontrar diversos residuos sólidos con signos de ser depositados por acción del oleaje en condiciones de pleamar. Es muy probable que una marejada intensa tenga la capacidad de erosionar la barra de arena (Martínez et al. 2017), uniendo el humedal con el mar en forma permanente, modificando los parámetros de la columna de agua del humedal y eventualmente excluyendo especies que no toleren salinidad.

**Figura 4: Arriba: Vista área del humedal Salinas Chica en la Bahía de Tongoy. Se resaltan los lugares donde la falta de duna explica los sobrepasos por marejadas que experimenta este humedal. Abajo: Se destaca la acumulación de residuos sólidos y marcas de erosión por oleaje en la ribera oriental de la laguna. La ribera occidental en la barra de arena presenta también claros signos de erosión y sobrepaso por oleaje. Fotografías tomadas en agosto 2017. Fuente: Zuleta & Contreras-López (2019).**



**Humedal protegido del oleaje:** El Humedal El Teniente se encuentra completamente expuesto a un energético oleaje del suroeste que impide la acumulación de sedimentos livianos, conformando entonces una característica playa y barra de piedras y bolones. Esta barra seguramente tiene la capacidad de resistir marejadas más energéticas que una de arena, sin embargo, también muestra signos de erosión y sobrepaso, indicando que ha sufrido el embate de grandes marejadas en el último tiempo.

**Figura 5:** Arriba: Vista área humedal el teniente, Se aprecia la barra de clastos y no de arena, que separa el mar del humedal. Abajo: Se aprecia una barra de bolones que responde a la exposición al oleaje impidiendo la acumulación de arena. Se destaca el sector sur que muestra claros signos de erosión y sobrepaso. Fotografías tomadas en agosto 2017. Fuente: Zuleta & Contreras-López (2019).



Los humedales costeros de Chile, al igual que en el resto del mundo, sufren también severas presiones por la intervención humana. El Humedal El Culebrón, en Coquimbo, es un ejemplo de cómo la intervención antrópica sobre un humedal puede hacerlos vulnerables. En la Figura 6 se ilustran intervenciones realizadas desde el año 2005 al 2017 en dicho humedal. Estas intervenciones son construcciones emplazadas en lo que sería su espejo de agua, el cual ha sido paulatinamente rellenado. El año 2005, el humedal presentaba tres edificaciones en su ribera. Ya estaba completamente rodeado por una línea ferroviaria, calles y avenidas que rigidizaban las

fronteras del humedal. El año 2014 ya se aprecia la construcción de un edificio sobre un terreno que fue rellenado. En julio de 2015, el humedal presentaba el doble de intervenciones que, en agosto del año 2005, es decir, en una década se duplicaron las intervenciones antrópicas. Todas, salvo el edificio construido, fueron arrasadas con el tsunami de septiembre de 2015 (Contreras-López et al. 2016), pero en diciembre de 2015, ya aparecen nuevas edificaciones. Durante el año 2017, se aprecia el triple de estructuras que las que se encontraban en el año 2005, muchas de las cuales se encuentran emplazadas al interior del humedal.

**Figura 6: Evolución de las intervenciones antrópicas en el humedal El Culebrón. Las edificaciones al interior del álveo son señaladas con los recuadros rojos. Fuente: Zuleta & Contreras-López (2019).**



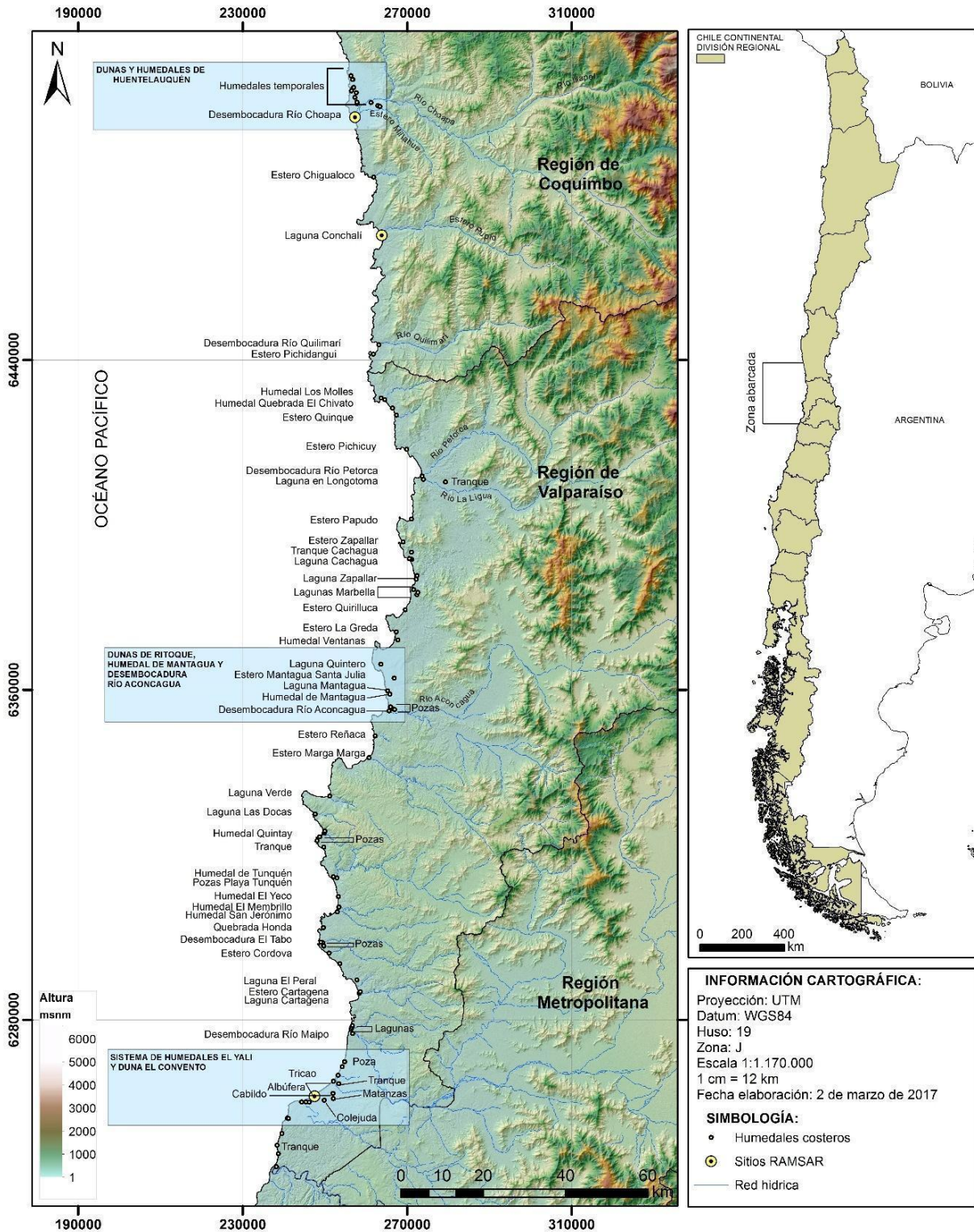
Figura 5 (cont): Evolución de las intervenciones antrópicas en el humedal El Culebrón. Las edificaciones al interior del álveo son señaladas con los recuadros rojos. Fuente: Zuleta & Contreras-López (2019).



Tal como fue explicado en el volumen de exposición, durante el presente estudio se verificó la existencia de humedales costeros por comuna, a partir del Inventario Nacional de Humedales<sup>7</sup> confrontando éste con imágenes satelitales en Google Earth, dentro del área expuesta bajo los 10 [msnm]. La existencia de muchos de estos humedales ya había sido confirmada en terreno por el equipo consultor, como es el caso de los humedales presentes en las regiones de Coquimbo y Valparaíso (Figura 7). Además, durante las visitas realizadas a los 44 humedales seleccionados durante el presente estudio, se confirmó o descartó aquellos cuerpos de agua que ofrecían dudas, entre las regiones de Antofagasta y Los Lagos. De esta forma, se contabilizó un total de 1682 humedales costeros, los que han sido organizados por comuna.

<sup>7</sup> <https://humedaleschile.mma.gob.cl/inventario-humadales/>

Figura 7: Inventario de humedales costeros emplazados en el litoral de la región de Valparaíso y el sur de la región de Coquimbo, Chile central. Se destacan en amarillo los sitios Ramsar.



### 3 METODOLOGÍA

En este volumen se estudian los cambios de los espejos de agua de los humedales costeros de Chile central, los que se relacionan con variables climáticas, geomorfológicas y edáficas. El objetivo es calcular series de tiempo del área en los cuerpos de agua con el fin de evidenciar la variabilidad que estos han tenido en la superficie inundada. Para esto, se estudian un total de 44 cuerpos de agua, entre humedales y lagunas costeras, en un rango temporal de 22 años, utilizando 457 imágenes satelitales del programa Landsat (para el período histórico). Para efectos de este estudio, se contemplan las siguientes definiciones:

- Un humedal es una superficie temporal o constantemente inundada, que está interrelacionada con los seres vivos que habitan en ella y se encuentra regulada por las condiciones climáticas. Los pantanos, manglares, esteros, turberas, marismas y ciénagas son humedales.
- Una laguna costera es un cuerpo de aguas poco profundas que está separado de océano por una barra o flecha, bien sea una isla barrera, un cordón litoral, un banco de arena de origen marino, un arrecife coralino o algún accidente similar.

#### 3.1 INVENTARIO DE HUMEDALES

El análisis se basa en una simple agrupación a nivel comunal de los humedales identificados en el estudio de exposición (Volumen 2). Para elaborar este inventario, se cruzó en primera instancia el Inventario Nacional de Humedales del año 2015 con el área expuesta y se recortaron aquellas áreas que se encuentran en su interior.

Cabe destacar que el inventario considera todos los cuerpos de agua como humedales, por lo que la base de datos resultante debió filtrarse eliminando registros de piscinas, lagos, lagunas, tranques, entre otros. Luego se calculó el centroide de los polígonos resultantes [latitud, longitud] y se verificó de forma manual su ubicación en Google Earth. Además, en el mismo Google Earth se recorrió la costa de Chile a escala 1:5.000 [o menos] con objeto de complementar el catastro de humedales. La base de datos resultante se sistematizó según el formato general establecido. Estas entidades fueron consideradas como puntos.

#### 3.2 CAMBIOS EN LOS ESPEJOS DE AGUA

La metodología para la discriminación de cuerpos de agua se divide en tres grandes fases:

- Fase 1: Descarga de imágenes y preprocesamiento
- Fase 2: Cálculo de índice de agua
- Fase 3: Cálculo series de tiempo



En la Fase 1 se evalúan los cambios históricos en los espejos de agua a partir de imágenes satelitales desde el portal Earth Explorer del USGS (United States Geological Survey). Las imágenes están disponibles en el programa Landsat<sup>8</sup> en un rango temporal de 22 años (1985-2017). Estas corresponden al producto Landsat Surface Reflectance C1 Higher-Level, imágenes que están en reflectancia superficial, sin distorsión atmosférica, lo que aumenta la consistencia y comparabilidad entre imágenes tomadas en diferentes momentos (USGS, 2015). Esta fase incluye el preprocesamiento de las imágenes re proyectando estas al Datum WGS 84, además de la individualización de los cuerpos de agua y digitalización de estos en el software de código libre QGIS. Se digitalizan un total de 44 cuerpos de agua.

La Fase 2 incorpora la aplicación del índice de aguas *ICEDEX*. Este índice es utilizado por el Instituto Ambiental Español (CEDEX) para mapear aguas continentales, presentando valores más estables que otros índices, ya que es menos sensible a la influencia de vegetación o el material en suspensión (sedimentos y algas). Además, discrimina de mejor manera el suelo húmedo de las áreas inundadas. El índice se calcula a partir de las relaciones entre las bandas del rojo, del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio, siendo el valor de referencia para discriminar la superficie inundada el 0. Valores por encima de este valor son considerados agua. El cálculo del índice se realiza a través de la siguiente fórmula (Bustamante, 2005)

$$ICEDEX = (NIR/R) - (NIR/SWIR)$$

Dónde, *R* es la banda roja, *NIR* es la banda del infrarrojo cercano y *SWIR* es la banda del infrarrojo medio. Con el índice calculado, se analiza la variabilidad de los píxeles de los cuerpos de agua para determinar el rango óptimo de lo que es agua, suelo húmedo y suelo. Se seleccionan tres lagunas por Path y Row (una por cada sensor utilizado), y a partir del análisis de boxplot se define el rango óptimo único para todas las lagunas y humedales de la zona en estudio.

La Fase 3 consiste en el cálculo de series de tiempo. Para ello, se reclasifican los valores de los píxeles de manera binaria, es decir 1 y 0, dónde todos los píxeles con valores entre 0.3 y -3 tienen un valor de píxel de salida 1, correspondiente a las áreas inundadas. Los píxeles que se ubican fuera de este rango tienen un valor de píxel de salida 0. De esta forma, la cantidad de píxeles con valor 1 representan el área del cuerpo de agua, lo que multiplicado por el área de un píxel Landsat (30 m x 30 m) da como resultado la superficie para esa fecha. De esta manera se construye la serie de tiempo para cada laguna o humedal.

### 3.3 ANÁLISIS DE CAUDALES

El caudal de cabecera constituye una variable fundamental en la supervivencia de un humedal costero. Lamentablemente, la información fluviométrica está disponible en muy pocos cursos de agua que contienen humedales costeros. Por esta razón, el análisis de caudales se basó en estimar las tendencias a partir de los únicos 6 registros horarios de una duración suficientemente larga (1980 – 2015) como para eliminar aquella variabilidad climática con período inferior a 35 años.

---

<sup>8</sup> Landsat 4-5 TM (308 imágenes), Landsat 7 ETM+ (61 imágenes) y Landsat 8 OLI/TIRS (88 imágenes).

La única data disponible al momento de ejecutar este estudio corresponde a las siguientes subcuencas costeras asociadas a humedales estudiados:

- Estero\_Culebron\_En\_EL\_Sifon : Costeras entre Río Elqui y Quebrada Tongoy
- Estero\_Nilahue\_En\_Santa\_Teresa : Estero Nilahue
- Estero\_Pupio\_En\_EL\_Romero : Estero Pupio
- Estero\_Quintero\_En\_Valle\_Alegre : Estero Maquis
- Rio\_Elqui\_En\_La\_Serena : Costeras entre Río Elqui y Quebrada Tongoy
- Rio\_Ligua\_En\_Quinquimo : Estero Catapilco

En forma adicional, se hicieron esfuerzos en vano para efectuar extraer los caudales históricos y proyectados del balance hídrico nacional<sup>9</sup> en cada uno de los humedales analizados en detalle. Resultados preliminares hicieron desistir a este equipo el incluirlos. Se recomienda, no obstante, que en futuros estudios se considere esta tarea como esencial para comprender la evolución histórica y futura de estos cuerpos de agua.

Debido a la escasez de información disponible para los humedales seleccionados, no se efectuaron correlaciones cuantitativas entre el caudal y el área del espejo de agua de estos. El análisis, por ende, se reduce a evaluar si la tendencia en los caudales explica la tendencia en el área del espejo de agua. Este tipo de análisis, no obstante, contribuiría también a la comprensión de estos sistemas.

### **3.4 ANÁLISIS DE MAREJADAS, NIVEL DEL MAR Y COTA DE INUNDACIÓN**

El análisis busca evaluar si las marejadas han experimentado un incremento en la frecuencia e intensidad en el período tanto en el período histórico como en la proyección. Asimismo, se busca evaluar a nivel histórico (mareógrafos) y en la proyección (modelos) cómo se comportará el nivel medio del mar. Estas variables en conjunto definen la cota de inundación, que puede utilizarse como proxy para evaluar el caudal de sobrepaso de agua de mar a los humedales, la rotura de las barras que los separan del mar, las alteraciones en la salinidad de estos cuerpos de agua y los eventuales cambios en las comunidades de plantas.

Al igual que para caudales, debido a la escasez de información, no se efectúan correlaciones cuantitativas entre las variables oceanográficas y el área del espejo de agua de los humedales costeros. El análisis, por ende, se reduce a evaluar si la tendencia en estas variables explica la tendencia en el área del espejo de agua. A continuación, se resume la metodología para calcular estas variables, explicada en forma detallada en el estudio de amenaza (Volumen 1).

#### **3.4.1 Marejadas**

---

<sup>9</sup> Proyecto denominado Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro (DGA, 2019), en el que se realiza un balance hídrico utilizando la metodología desarrollada en el proyecto de Actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2017).

### 3.4.1.1 Análisis histórico

El análisis se basa en el cálculo de tendencias anuales históricas a largo plazo de datos que cubren entre 18° y 55° en el territorio continental de Chile. Para evaluar la variabilidad espacial a lo largo de 4200 [km] de costas, se analizan hindcasts de oleaje<sup>10</sup> cada 2° de latitud. El análisis ignora la variabilidad climática asociada a, por ejemplo, ENSO. Las tendencias lineales se calcularon mediante el estimador no paramétrico propuesto por Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968), con una banda de confianza del 95% para cuantificar la incertidumbre. Este es un método basado en la mediana que, a diferencia del método de mínimos cuadrados, es estable ante la presencia de valores extremos o outliers (Sen, 1968). El error estándar para cada estación  $j$  se calculó como

$$SE_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{i,j} - \hat{y}_{i,j})^2}{(N-2) \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}}, \quad (1)$$

donde  $y_{i,j}$  son los datos y  $\hat{y}_{i,j}$  los valores estimados obtenidos del ajuste lineal de Thiel-Sen durante un período de  $N$  años. Para configurar la incertidumbre, el intervalo del 95% se obtuvo mediante la expresión

$$U_j = SE_j \times CV, \quad (2)$$

donde el valor crítico  $CV$  se obtuvo de la distribución t-Student con  $N - 2$  grados de libertad, donde  $N$  es el número de años con observaciones.

El método del peak sobre el umbral se usa para estimar la cantidad de eventos de oleaje extremos por año (Silva, 2005). El umbral se establece en un valor en el que la altura significativa superó el doble de la desviación estándar de la media aritmética por año, para evitar el sesgo asociado a las tendencias interanuales (Martínez et al., 2018). El método de mínimos cuadrados se utiliza para calcular la tendencia y la incertidumbre de la pendiente se calcula con un 95% de confianza.

### 3.4.1.2 Proyección

Para analizar el comportamiento futuro del clima de oleaje extremo (marejadas), en los estudios de amenaza (Volumen 1) y puertos (Volumen 5), se efectúa un análisis de valores extremos frente a 9 puertos tanto para el período histórico (1985-2004) y para la proyección (2026-2045). Los resultados de dicho análisis son extrapolables, aunque no directamente, a los humedales, pues en rigor son representativos de los puntos donde se analizó. Los resultados (que demuestran que ha existido y seguirá existiendo un aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas), por ende, deben leerse como tendencias y no como valores absolutos.

## 3.4.2 Nivel medio del Mar

---

<sup>10</sup> Un hindcast es una reconstrucción histórica de la estadística de oleaje obtenida del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016, 2017), disponible en [www.oleaje.uv.cl](http://www.oleaje.uv.cl).

### 3.4.2.1 Análisis histórico

Al igual que para los eventos extremos de oleaje, las tendencias lineales para las series de tiempo del nivel medio mensual obtenidas a partir de los mareógrafos con registros mayores a 30 años, se calcularon mediante el estimador no paramétrico propuesto por Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968). Los resultados de este análisis son extrapolables, aunque no directamente, a los humedales, pues en rigor son representativos de los mareógrafos donde se efectuó el registro.

### 3.4.2.2 Proyección

En este estudio se utilizaron los resultados correspondientes al análisis de 21 modelos procesados para la preparación del AR5 (Church et al., 2013a, 2013b). Estos modelos simulan el ascenso medio del nivel del mar asociado a expansión térmica, junto con resultados del periodo preindustrial; este último, necesario para remover la expansión térmica causada por la deriva climática en las temperaturas del océano profundo. Esta deriva fue sustraída a través de un ajuste polinomial como función del tiempo, aplicado a las series de tiempo control de la expansión térmica (Church et al., 2013b). Los datos corresponden a altura relativa del nivel del mar (*sea surface height*, SSH), los cuales fueron usados para la construcción de las figuras del IPCC-AR5. Estos resultados representan el efecto de 10 forzantes geofísicos que influyen en los cambios a largo plazo de la altura relativa del nivel del mar:

- 5 componentes de hielo
  - Dinámica del hielo en Groenlandia
  - Balance superficial de hielo en Groenlandia
  - Dinámica del hielo en Antártica
  - Balance superficial de hielo en Antártica
  - Glaciares
- 3 componentes oceánicos
  - Altura relativa del nivel del mar
  - Anomalía global de la altura termostérica del nivel del mar
  - Efecto de barómetro invertido
- Almacenamiento de agua en tierra
- Ajuste isostático glacial (cambio del nivel del mar respecto a la tierra)

La presentación de los datos corresponde a una grilla de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , en un dominio espacial de  $-90^{\circ}\text{N}$  a  $90^{\circ}\text{N}$  y  $0^{\circ}\text{E}$  to  $360^{\circ}\text{E}$ . El periodo de tiempo abarcado 94 años entre 2007 y 2100, con periodicidad anual<sup>11</sup>.

### 3.4.3 Cota de inundación

---

<sup>11</sup> [ftp://ftp-icdc.cen.uni-hamburg.de/ar5\\_sea\\_level\\_rise/](ftp://ftp-icdc.cen.uni-hamburg.de/ar5_sea_level_rise/)

La cota de inundación puede utilizarse como proxy para evaluar el caudal de sobrepaso de agua de mar a los humedales, la rotura de las barras que los separan del mar, las alteraciones en la salinidad de estos cuerpos de agua y los cambios en las comunidades de plantas. La cota de inundación se puede descomponer como la contribución de diferentes dinámicas como los cambios del nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica, el setup y runup de oleaje, las ondas infragravitatorias, los tsunamis, los cambios verticales del terreno y el efecto de los caudales efluentes en ríos, entre otros. En este estudio, la cota de inundación histórica ( $C$ ) respecto al Nivel de Reducción de Sondas<sup>12</sup> ( $NRS$ ) se define como

$$C = Z_A + Z_M + Z_W + R_W \quad |_{1985-2004}$$

Donde todos los términos de la derecha se calculan para el período histórico (Figura 8, arriba). La cota de inundación futura (Figura 8, abajo), se calcula con la expresión:

$$C = \Delta Z_{NMM} + Z_A + Z_M + Z_W + R_W \quad |_{2026-2045}$$

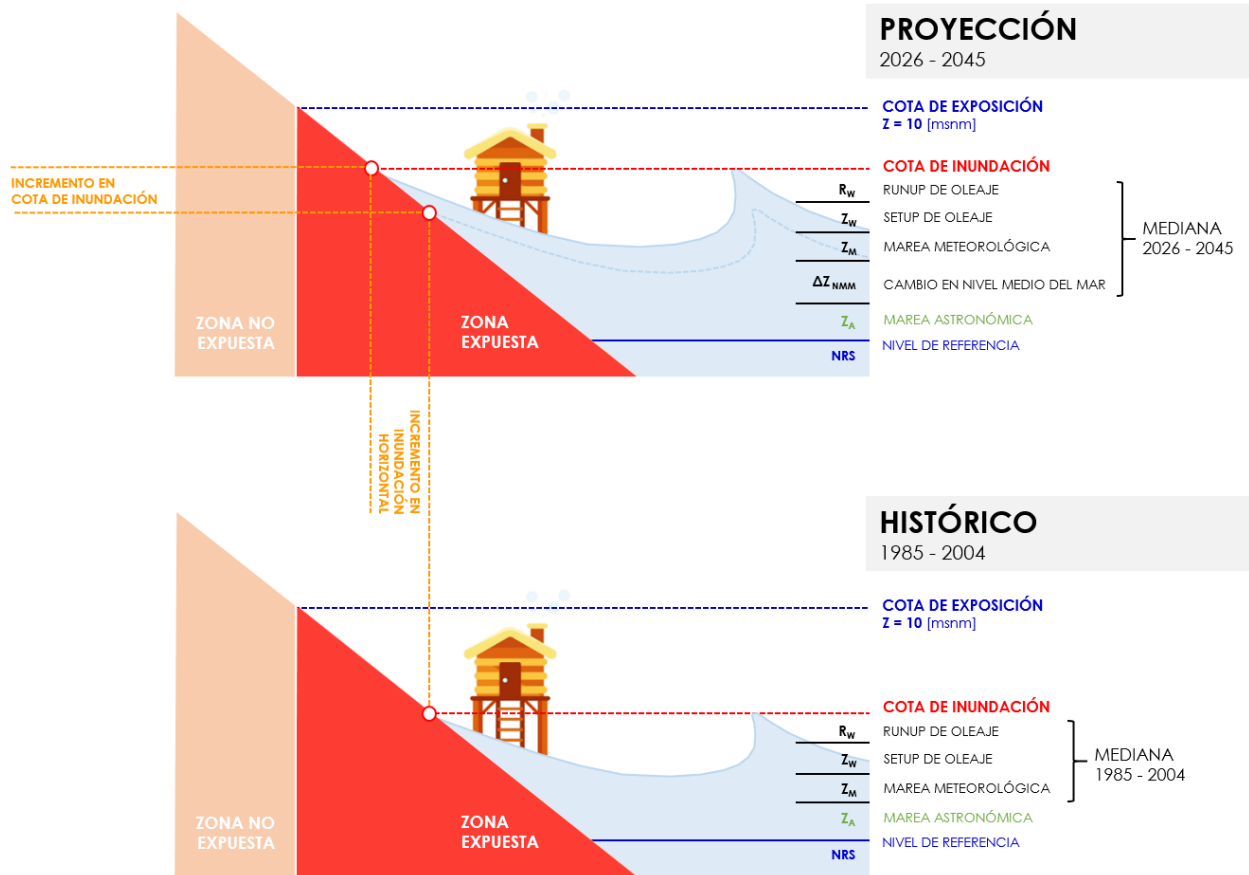
Donde:

- $\Delta Z_{NMM}$  Diferencia entre el Nivel Medio del Mar para la proyección ( $Z_{NMM\ 2026-2045}$ ) y el período histórico ( $Z_{NMM\ 1985-2004}$ ), calculada latitudinalmente cada 5 [km].
- $Z_A$  Semiamplitud de la marea astronómica (máximo valor para cada puerto patrón).
- $Z_M$  Marea meteorológica producto de la acción combinada de cambios en la presión atmosférica y el viento. Esta variable fue obtenida de CEPAL (2015).
- $Z_W$  Sobreelevación producto de los cambios espaciales de momentum que experimenta el oleaje en las inmediaciones de la rotura. A diferencia del runup y por definición, esta es una magnitud promediada en el período.
- $R_W$  Runup producto del ascenso instantáneo del oleaje en la costa. En este estudio se usa el  $R_W^{2\%}$ , que corresponde al valor que es excedido el 2% del tiempo en un estado de mar (intervalo durante el cual se asume que el oleaje es estadísticamente estacionario).

---

<sup>12</sup> El Nivel de Reducción de Sondas ( $NRS$ ) se define en Chile como el nivel más bajo que alcanza la marea estando la luna en perigeo, durante una sicigia.

Figura 8: Definición de componentes utilizadas para el cálculo de la cota de inundación.



El runup y el setup se calculan a partir de los datos de oleaje en aguas profundas, propagados cada 5 [km] a la costa considerando sólo los efectos de refracción y asomeramiento<sup>13</sup> mediante la Teoría Lineal del Oleaje y la Ley de Snell. La propagación se efectúa para la altura significativa asociada al percentil 99%, y coeficientes de agitación generados con el período medio y dirección media asociados al percentil 50%. Estos resultados representan una aproximación de gran cobertura. Resultados más específicos como los presentados para los puertos (Volumen 5) requieren del análisis local que considera procesos físicos adicionales a la refracción y el asomeramiento, como la reflexión o la difracción, que ocurren en las dársenas y costas de alta pendiente.

En este estudio no se efectúa un cruce a nivel local entre la cota de inundación y el área del espejo de agua de los humedales. El análisis se restringe a constatar que se espera un aumento

<sup>13</sup> La **refracción** es el proceso por el cual el oleaje cambia su altura y dirección producto de cambios en la batimetría. El **asomeramiento** es el proceso por el cual el oleaje aumenta la altura y reduce su celeridad debido a la reducción de la profundidad en las cercanías de la costa. El asomeramiento es responsable, en última instancia, de la rotura del oleaje. La **difracción** es el proceso por el cual el oleaje reduce su altura y cambia la dirección debido a la presencia de obstáculos (como los rompeolas utilizados en los puertos). La **reflexión** es el proceso por el cual el oleaje cambia bruscamente de dirección por la presencia de obstáculos.

en la cota de inundación en la proyección (2026-2045) respecto del período histórico (1985-2004) y que esta podría promover algunas consecuencias sobre los humedales (sólo a modo de hipótesis), como el aumento del caudal de sobrepaso de agua de mar y la rotura más frecuente de las barras que los separan del mar, que en conjunto podrían incrementar la salinidad y los cambios en las comunidades de plantas de los humedales costeros.

### 3.5 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Junto a las campañas de terreno para tomar muestras de comunidades de plantas (sección 3.6.4), se realizaron levantamientos topográficos mediante nivel y dron en las inmediaciones de los humedales. El objetivo primordial del levantamiento fue evaluar la forma (y cota) de las barras que separan el humedal costero del mar. Aun cuando las barras no son estables pues dependen de múltiples factores para su acreción y/o erosión, su geometría se utiliza como proxy para estimar la vulnerabilidad de los humedales costeros ante cambios en la salinidad producidos por las marejadas (mediante el sobrepaso o la rotura de las mismas).

Los perfiles se realizaron con una mira y niveles topográficos, posicionando las estaciones mediante GPS, con error de 1 [m] en la horizontal. Los perfiles se levantaron desde el nivel instantáneo del mar hasta el espejo de agua del humedal. Posteriormente se realizaron correcciones de marea y los valores fueron llevados al Nivel de Reducción de Sonda (NRS) definido por el SHOA (Tabla 2). Cuando las condiciones climáticas lo permitieron, el perfil topográfico fue extendido espacialmente con la ayuda de un dron.

Estas campañas se realizaron entre noviembre 2018 y marzo 2019. En total se visitaron 32 humedales costeros que comprenden desde la región de Atacama hasta la región de Los Lagos. En 19 de estos humedales se realizó levantamiento de información topográfica con dron<sup>14</sup>, mientras que en los otros humedales se tomaron fotografías aéreas oblicuas, muestras de vegetación y se realizó topografía referencial. El detalle de los productos para cada humedal visitado se encuentra en la Tabla 1.

Se realizaron vuelos de dron programados mediante polígonos que cubrieran toda el área de interés a 100 y 150 [m] de altura, capturando fotogramas que tuviesen un 80% de superposición frontal y 70% de superposición lateral. Todos los fotogramas se tomaron con 90° de inclinación de la cámara. Una vez realizado el vuelo, los fotogramas fueron procesados en el software Agisoft Photoscan, desde donde se obtuvo la nube de puntos [xyz], un modelo de elevación digital, ortomosaico (que son mostrados en anexos) y curvas de nivel para cada humedal<sup>15</sup>.

Como primer paso, se georreferenciaron los fotogramas en Agisoft Photoscan con objeto de alinearlos entre sí, para lo cual se consideraron 40.000 puntos de reconocimiento común entre fotogramas. Una vez alineados entre sí, se aplicó una corrección de parámetros simple que

---

<sup>14</sup> Dron compacto Mavic Air de DJI.

<sup>15</sup> Cabe notar que la información (ortomosaicos) obtenida de los vuelos en dron es de alta calidad y no fue utilizada en todo su potencial en este estudio.

considera el reconocimiento y eliminación de puntos [xyz] que presenten algún grado de error (por ejemplo, que no presenten coherencia con los puntos que se encuentran alrededor). Una vez corregida la alineación de puntos, se generó una nube de puntos dispersa que corresponde a la primera aproximación al modelo tridimensional final. Con esta nube de puntos es posible identificar aquellos puntos que se encuentran lejanos de aquellos que se encuentran a su alrededor, pero de manera gráfica, por lo que son más fáciles de identificar y eliminar. La Figura 9 muestra un ejemplo de este proceso en el humedal Cartagena.

**Figura 9: Nube de puntos dispersa generada en el flujo de procesamiento del humedal Cartagena.**





Tabla 1. Humedales visitados en este estudio y productos obtenidos. En negrita se encuentran destacados aquellos humedales donde se realizó levantamiento de información topográfica con drone mediante vuelo programado.

| Nombre                                    | Latitud  | Longitud | Comuna        | Región     | Fecha visita | Fotografías o videos | DEM | Ortomosaico | Muestras en terreno | Topografía | Área espejo de agua [m <sup>2</sup> ] |
|---|----------|----------|---------------|------------|--------------|----------------------|-----|-------------|---------------------|------------|---------------------------------------|
| <b>Humedal Salinas de Copiapó [Norte]</b> | -27,2981 | -70,9321 | Caldera       | Atacama    | 2018-11-29   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | No         | 8.111,2                               |
| <b>Humedal Salinas de Copiapó [Sur]</b>   | -27,3121 | -70,9292 | Caldera       | Atacama    | 2018-11-29   | No                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 59.414                                |
| <b>Humedal Huasco</b>                     | -28,4609 | -71,2121 | Huasco        | Atacama    | 2018-11-29   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | No         | 1.141,1                               |
| <b>Humedal La Boca [Los Choros]</b>       | -29,3057 | -71,3633 | La higuera    | Coquimbo   | 2019-01-25   | Sí                   | Sí  | Sí          | No                  | No         | 14.964,2                              |
| <b>Humedal Punta Teatinos</b>             | -29,8226 | -71,2888 | La serena     | Coquimbo   | 2018-11-29   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 23.015,2                              |
| Humedal El Culebrón                       | -29,9622 | -71,3220 | Coquimbo      | Coquimbo   | 2018-11-29   | No                   | No  | No          | Sí                  | No         | N/A                                   |
| <b>Humedal Estero Tongoy</b>              | -30,2563 | -71,4908 | Coquimbo      | Coquimbo   | 2018-11-30   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 27.996,5                              |
| <b>Humedal Salinas Grande</b>             | -30,2817 | -71,5060 | Coquimbo      | Coquimbo   | 2018-11-30   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 25.622,9                              |
| Humedal Pachingo                          | -30,3038 | -71,5718 | Coquimbo      | Coquimbo   | 2018-11-30   | No                   | No  | No          | Sí                  | No         | N/A                                   |
| <b>Humedal Cebada</b>                     | -30,9764 | -71,6486 | Ovalle        | Coquimbo   | 2018-11-30   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 2.114,1                               |
| <b>Humedal Conchalí</b>                   | -31,8790 | -71,4963 | Los vilos     | Coquimbo   | 2018-11-30   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 75.609,6                              |
| Humedal Pichicuy                          | -32,3489 | -71,4438 | La Ligua      | Valparaíso | 2018-11-15   | No                   | No  | No          | Sí                  | No         | N/A                                   |
| <b>Humedal de Mantagua</b>                | -32,8847 | -71,5081 | Quintero      | Valparaíso | 2019-05-28   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 106.190,6                             |
| <b>Humedal San Alfonso [El Membrillo]</b> | -33,3449 | -71,6505 | San Antonio   | Valparaíso | 2018-11-17   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 10.860,4                              |
| <b>Humedal de Cartagena</b>               | -33,5349 | -71,6022 | Cartagena     | Valparaíso | 2018-12-06   | Sí                   | Sí  | Sí          | No                  | Sí         | 50.936                                |
| Humedal El Yali                           | -33,7724 | -71,7492 | Santo domingo | Valparaíso | 2018-11-17   | Sí                   | No  | No          | Sí                  | Sí         | N/A                                   |
| Humedal Pichilemu                         | -34,3840 | -72,0004 | Pichilemu     | Valparaíso | 2018-11-17   | No                   | No  | No          | Sí                  | No         | N/A                                   |
| Humedal Mataquito                         | -35,0227 | -72,1794 | Licantén      | Maule      | 2018-11-08   | Sí                   | No  | No          | No                  | No         | N/A                                   |

| Nombre                          | Latitud  | Longitud | Comuna               | Región    | Fecha visita | Fotografías o videos | DEM | Ortomosaico | Muestras en terreno | Topografía | Área espejo de agua [m²] |
|---------------------------------|----------|----------|----------------------|-----------|--------------|----------------------|-----|-------------|---------------------|------------|--------------------------|
| Humedal Pocillas-Cardonal       | -35,8777 | -72,6697 | Pelluhue             | Maule     | 2018-11-10   | Sí                   | No  | No          | Sí                  | Sí         | N/A                      |
| <b>Humedal Vegas del Itata</b>  | -36,3942 | -72,8677 | Coelemu              | Biobío    | 2019-03-10   | Sí                   | Sí  | Sí          | No                  | No         | 99.397                   |
| Humedal Alto Perales            | -36,4265 | -72,8721 | Coelemu              | Biobío    | 2019-03-10   | Sí                   | No  | No          | No                  | No         | N/A                      |
| <b>Humedal Merquiche</b>        | -36,4845 | -72,9077 | Tomé                 | Biobío    | 2019-03-10   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 575,9                    |
| <b>Humedal Vegas de Coliumo</b> | -36,5611 | -72,9577 | Tomé                 | Biobío    | 2019-01-29   | Sí                   | Sí  | Sí          | No                  | No         | 28.715,4                 |
| Humedal Lengua                  | -36,7695 | -73,1669 | Hualpén              | Biobío    | 2018-11-09   | No                   | No  | No          | Sí                  | No         | N/A                      |
| Humedal Tubul                   | -37,2337 | -73,4387 | Arauco               | Biobío    | 2018-11-10   | Sí                   | No  | No          | Sí                  | Sí         | N/A                      |
| <b>Humedal Carampangue</b>      | -37,2360 | -73,3011 | Arauco               | Biobío    | 2018-11-10   | Sí                   | No  | No          | Sí                  | No         | 223.555,8                |
| <b>Humedal Chaihuín</b>         | -39,9465 | -73,5770 | Corral               | Los ríos  | 2019-01-14   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 419.198,7                |
| <b>Humedal Pucatrihue</b>       | -40,5344 | -73,7104 | San Juan de la Costa | Los Lagos | 2019-01-15   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 73.960,9                 |
| Humedal Lenca [Caleta Lenca]    | -41,6052 | -72,6918 | Puerto Montt         | Los Lagos | 2019-02-12   | Sí                   | No  | No          | No                  | No         | N/A                      |
| Humedal Carelmapu               | -41,7441 | -73,7298 | Mauñín               | Los Lagos | 2019-02-11   | Sí                   | No  | No          | No                  | No         | N/A                      |
| Humedal Guabún                  | -41,8101 | -74,0358 | Ancud                | Los Lagos | 2019-02-12   | Sí                   | No  | No          | No                  | No         | N/A                      |
| <b>Humedal Cucao</b>            | -42,6446 | -74,1153 | Chonchi              | Los Lagos | 2019-02-13   | Sí                   | Sí  | Sí          | Sí                  | Sí         | 274.225                  |

Una vez filtrada la nube de puntos dispersa, se genera una nube de puntos densa [xyz] que representa de forma tridimensional el terreno. En esta nube de puntos se incorporan puntos de control [xyz] que permiten corregir los errores que se generan en el procesamiento, como la sobre o subestimación de los valores calculados. Una vez incorporados los puntos de control, se recalcula la nube de puntos densa, corrigiendo los valores, y se genera el modelo de elevación digital del área levantada. Con el modelo de elevación digital generado, es posible realizar el ortomosaico del terreno. Cabe destacar que, para los humedales levantados, ambos productos poseen un tamaño de pixel que no supera los 10 [cm], lo que genera una resolución óptima para obtener curvas de nivel a escala métrica y centimétrica. La Figura 10 muestra un ejemplo de este proceso y la Figura 11 el ortomosaico en el humedal Cartagena.

**Figura 10: Nube de puntos densa generada en el flujo de procesamiento del humedal Cartagena.**



El modelo de elevación digital y el ortomosaico obtenidos fueron exportados como imagen en formato ráster para integrarlo a un ambiente SIG. De esta manera, se corrigió el modelo de elevación digital obtenido tomando como referencia los valores de la marea según el día y la hora de visita al humedal (Tabla 2).

Una vez corregido el modelo de elevación digital, se extrajeron las curvas de nivel cada 1 [m] para el área que se encuentra alrededor de algunos humedales. El proceso de revisión de las curvas obtenidas se realizó de forma manual, donde se eliminaron las curvas que se generaron producto de ruidos en la imagen, así como las que se generaron sobre los cuerpos de agua. La Figura 12 muestra un ejemplo de este proceso para el humedal Cartagena.

Figura 11. Ejemplo de ortomosaico [izquierda] y modelo de elevación digital [derecha] generado para el humedal Cartagena. En este caso, cada producto posee una resolución de 3 centímetros, lo que permite trabajar a escala de 1:150 aproximadamente.



Figura 12. Curvas de nivel cada 1 metro generadas para el humedal de Cartagena.



**Tabla 2. Altura de la marea utilizada para la corrección de los modelos de elevación digital generados a partir de los vuelos de drone realizados sobre 19 de los 32 humedales costeros visitados en este estudio.**

| Humedal                            | Región     | Comuna               | Puerto patrón | Puerto secundario | Fecha      | Hora  | Altura de marea |
|------------------------------------|------------|----------------------|---------------|-------------------|------------|-------|-----------------|
| Humedal San Alfonso [El Membrillo] | Valparaíso | San Antonio          | Valparaíso    | Rada El Algarrobo | 17-11-2018 | 8,87  | 0,94            |
| Salinas de Copiapó Sector Sur      | Atacama    | Caldera              | Caldera       |                   | 29-11-2018 | 9,23  | 0,32            |
| Salinas de Copiapó Sector Norte    | Atacama    | Caldera              | Caldera       |                   | 29-11-2018 | 10,03 | 0,35            |
| Humedal Huasco                     | Atacama    | Huasco               | Antofagasta   | Puerto Huasco     | 29-11-2018 | 14,38 | 0,86            |
| Punta Teatinos                     | Coquimbo   | La Serena            | Coquimbo      |                   | 29-11-2018 | 17,83 | 0,93            |
| Estero Tongoy                      | Coquimbo   | Coquimbo             | Valparaíso    | Bahía Tongoy      | 30-11-2018 | 8,83  | 0,26            |
| Humedal Salinas Grande             | Coquimbo   | Coquimbo             | Valparaíso    | Bahía Tongoy      | 30-11-2018 | 11,05 | 0,07            |
| Humedal Cebada                     | Coquimbo   | Ovalle               | Valparaíso    | Caleta Oscuro     | 30-11-2018 | 15,58 | 0,98            |
| Humedal Conchalí                   | Coquimbo   | Los Vilos            | Valparaíso    | Puerto Los Vilos  | 30-11-2018 | 18,17 | 1,16            |
| Humedal de Cartagena               | Valparaíso | Cartagena            | San Antonio   |                   | 06-12-2018 | 13,45 | 0,67            |
| Chaihuín                           | Los Ríos   | Corral               | Corral        |                   | 14-01-2019 | 14,30 | 0,91            |
| Pucatrihue                         | Los Lagos  | San Juan de la Costa | Corral        |                   | 15-01-2019 | 14,37 | 0,92            |
| Humedal La Boca - Los Choros       | Coquimbo   | La Higuera           | Valparaíso    | Caleta Totalillo  | 25-01-2019 | 10,48 | 0,66            |
| Vegas de Coliumo                   | Biobío     | Tomé                 | Valparaíso    | Bahía Coliumo     | 29-01-2019 | 16,87 | 1,18            |
| Humedal Cucao                      | Los Lagos  | Chonchi              | Ancud         |                   | 13-02-2019 | 11,50 | 0,88            |
| Humedal Carampangue - Playa Arauco | Biobío     | Arauco               | Valparaíso    | Bahía de Lota     | 09-03-2019 | 12,82 | 1,28            |
| Humedal Vegas del Itata            | Biobío     | Coelemu              | Valparaíso    | Bahía Coliumo     | 2019-03-10 | 14,45 | 1,15            |
| Humedal Merquiche                  | Biobío     | Tomé                 | Valparaíso    | Bahía Coliumo     | 2019-03-10 | 17,03 | 0,46            |
| Humedal de Mantagua                | Valparaíso | Quintero             | Quintero      |                   | 28-05-2019 | 16,35 | 1,17            |

## 3.6 ANÁLISIS DE COMUNIDADES DE PLANTAS

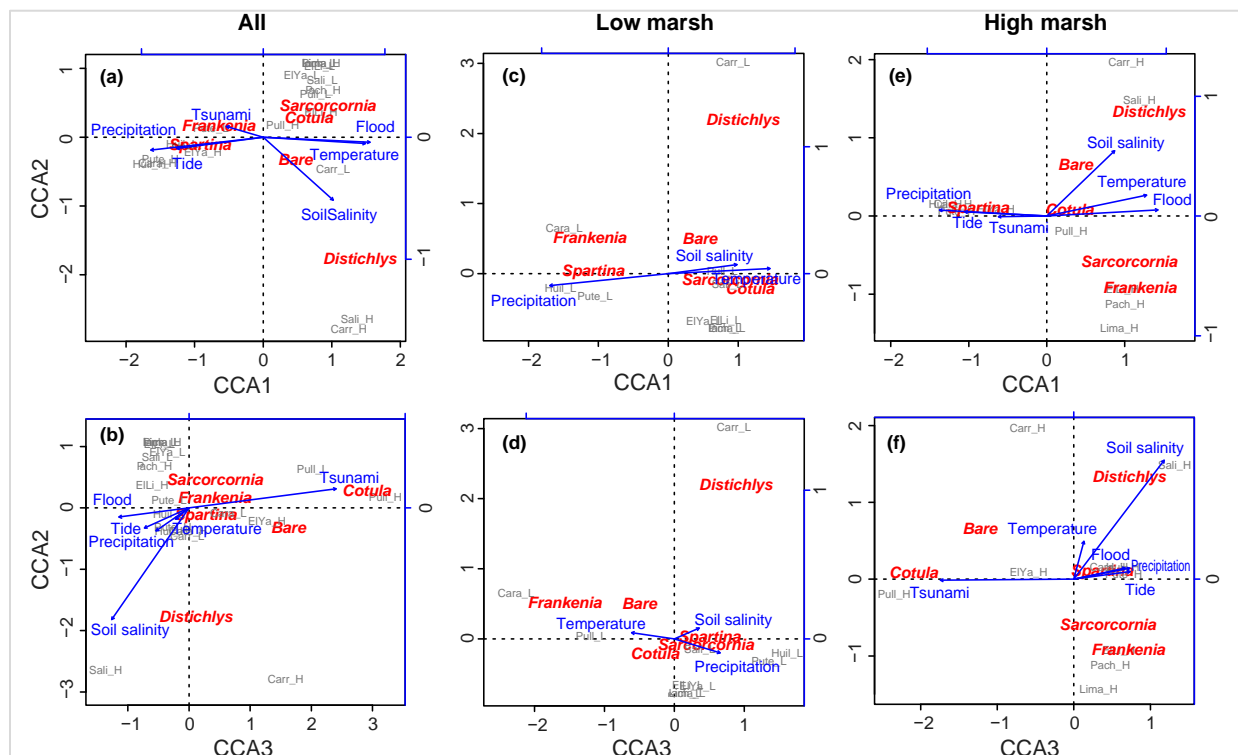
### 3.6.1 Identificación de cuerpos de agua

Esta tarea se detalla en la sección 3.2.

### 3.6.2 Perturbaciones en las comunidades de plantas

Las perturbaciones naturales (marejadas y aluviones) juegan un rol sobre la estructuración de las comunidades de plantas en los humedales costeros de Chile. La Figura 13 (Fariña et al., 2018) ilustra este fenómeno. Por otra parte, para considerar los efectos de la estacionalidad a través del análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se determinan las épocas del año en las cuales se activa y se desactiva el proceso de fotosíntesis de las especies de plantas dominantes en los humedales en relación con los cambios en la temperatura, precipitaciones, la ocurrencia de marejadas, tsunamis y eventos extremos de precipitaciones (Moller, 2018).

**Figura 13: Resultados del análisis de las comunidades de plantas y sus predictores ambientales a lo largo de la costa de Chile (Fariña et al 2018). Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de las comunidades de plantas y los predictores ambientales a lo largo de la costa de Chile. (a) Todos los humedales, (b) zonas bajas de los humedales, (c) zonas altas de los humedales. Se muestran los sitios con los primeros caracteres de su nombre y las zonas bajas y altas se muestran con letras L y H respectivamente. En cada caso se entregan también los nombres de los géneros de las especies de plantas dominantes en cada humedal. Todos los componentes de los CCA mostrados son estadísticamente significativos. ( $p < .05$ ) excepto para los segundos y terceros componentes del CCA en (c) y (d), los cuales son marginalmente significativos.**



La vegetación de los humedales costeros cumple un rol fundamental en la estabilización del sedimento, el control de las marejadas y la resiliencia de estos sistemas a sequías o precipitaciones extremas (Ewanchuk & Bertness 2004, Farina et al 2016). Por dicha razón es necesario analizar cómo los cambios en la cobertura de agua de las lagunas costeras se relacionan con la activación y desactivación natural de este componente ecosistémico, reflejado en el proceso de fotosíntesis de las plantas que los habitan.

Como complemento a la identificación de los cuerpos de agua, se realiza un análisis de los períodos de activación y desactivación de la actividad fotosintética en los humedales costeros y se exploran las relaciones explicativas para dicha dinámica en relación con a los regímenes de precipitación, temperatura e incidencia de perturbaciones naturales en dichos ecosistemas.

### 3.6.3 Uso de teledetección satelital para identificar cubierta vegetativa

El uso de la teledetección satelital ha permitido obtener información sobre el estado de la vegetación y sus características, en grandes y pequeñas escalas geográficas. Durante las últimas 4 décadas se han desarrollado numerosos índices de vegetación, calculados a partir de datos espectrales proporcionados por sensores remotos satelitales (Carvacho & Sánchez, 2010). Un índice de vegetación (IV), calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda, permite extraer la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de otros factores externos, como las propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar, etc. (Gilbert et al., 1997). Estos índices aprovechan el comportamiento radiométrico de la vegetación que se da entre el rojo visible y el infrarrojo cercano (Carvacho & Sánchez, 2010). Según Gilbert et al. (1997), la reflectividad en la vegetación pasa de un mínimo en la longitud de onda en el rango visible (en el rojo), debido a la absorción de la clorofila en esta longitud de onda, a un máximo en el infrarrojo cercano que se produce por la dispersión múltiple de la radiación debido al interior de la estructura celular (Figura 14). Es el contraste entre la longitud de onda en el rojo y en el infrarrojo cercano que se usa para establecer diferencias en la vegetación, sana y vigorosa cuando los contrastes son mayores, y vegetación enferma o de baja densidad cuando estos son reducidos (Carvacho & Sánchez, 2010).

El índice de diferencia normalizada (*NDVI*), utilizado por primera vez por Rouse et al. (1973), es el índice de vegetación más conocido. Su expresión matemática es:

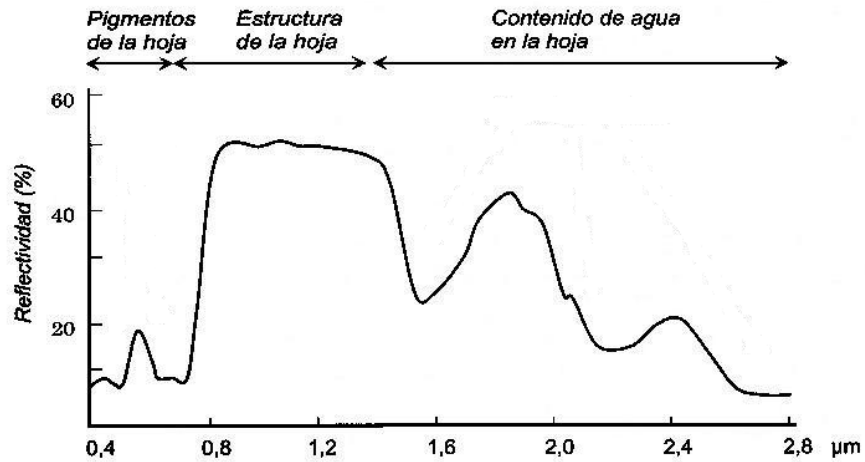
$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde *NIR* es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano y *R* es la reflectividad en la banda del rojo. Muñoz (2015) define las siguientes características del *NDVI*:

- Minimiza efectos topográficos y produce una escala lineal de medición.
- La escala va de -1 a 1, con el valor 0 representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación. Los valores negativos representan superficies sin vegetación.

- La normalización reduce el efecto de la degradación de calibración del sensor y la influencia de los efectos atmosféricos.
- Posee una gran sencillez matemática.

**Figura 14: Firma espectral de la vegetación.**



El uso de la teledetección satelital para estimar índices de vegetación como *NDVI* ha permitido, a su vez, el estudio de la fenología de las plantas en la superficie de la tierra, a través del análisis de la variación estacional de la actividad fotosintética de las plantas (White et al., 2006). De esta manera, el *NDVI*, usado como un proxy de productividad primaria, permite determinar los periodos en los cuales la vegetación se activa y realiza fotosíntesis, o se encuentra inactiva. A través de este análisis es posible determinar las relaciones de la activación y desactivación de la fotosíntesis de las plantas con los factores físicos (temperatura y precipitaciones) e incluso con los regímenes de perturbaciones que afectan a la vegetación de un lugar determinado, en una escala espacio - temporal amplia.

Para el análisis fenológico de las comunidades de plantas presentes en los humedales costeros de Chile, se obtienen series de tiempo del *NDVI* de 4 puntos para cada humedal, extrayendo en cada caso, los parámetros fenológicos (magnitud de la actividad fotosintética, fecha de inicio y término). Las series de tiempo son descompuestas en su tendencia, estacionalidad y ruido, para de esta forma correlacionar la dinámica fotosintética con las variaciones temporales y espaciales de la extensión del espejo de agua y la ocurrencia de perturbaciones naturales.

### 3.6.4 Levantamientos en terreno

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron visitas a los humedales costeros para levantar la diversidad, composición y patrones de zonación de las especies de plantas y su relación con la salinidad del suelo de estos ecosistemas. La salinidad del suelo es una variable edáfica que, como primera aproximación, se relaciona y responde a las variaciones en los patrones de



precipitación, temperatura ambiental y regímenes de inundación de los humedales. Por lo tanto, la salinidad se utiliza como un "proxy" que debiera refrendarse mediante futuros estudios en terreno que contemplen el análisis de variables propias de las plantas y el suelo.

Los levantamientos realizados durante este estudio se efectuaron siguiendo metodologías de identificación botánica y socio-botánica durante la época de primavera tardía y verano temprano, para la correcta identificación de las especies de plantas. Se catastran las especies vegetales presentes en los humedales costeros a través de transectos prospectivos que cruzan la formación vegetal desde la línea más baja (cercana al agua) hasta el límite con el sistema de pradera alledaño. Cada transecto cubre un área de aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, sobre el cual se realiza una caracterización de la zonación de planta por medio de cuadrantes (identificación de las plantas) y medidas de salinidad de la napa freática que alimenta al humedal.

El levantamiento de especies y su zonación permiten conocer el grado de intervención y perturbación antrópica y natural sobre cada humedal, a partir de la composición de especies. Además, servirá de base para estudios posteriores (i.e., medidas de terreno) en los cuales se evalúen en más detalle las forzantes edáficas que están actuando sobre las plantas y su variación intra e interanual.

En resumen, el análisis de fragilidad de humedales y áreas de interés para la biodiversidad se basará en un fuerte análisis histórico. Este estudio no contempla la cuantificación (sólo la identificación) de los posibles cambios a futuro.

## 4 RESULTADOS

De los 1682 humedales costeros identificados en el país, se pudieron estudiar 44 humedales representativos del gradiente latitudinal y climático presente entre Copiapó (región de Atacama) y Cucao (región de los Lagos). De ellos, se pudo realizar en 33 humedales levantamientos topográficos. El detalle de la información de los humedales visitados se presenta en la Tabla 1. Cabe mencionar que la información disponible y/o generada en este proyecto no es homogénea para los humedales analizados, debido a la asimetría de la información disponible para cada caso. Los resultados, por tanto, se presentan siguiendo la siguiente estructura:

- 1692 humedales : Inventario (sección 4.1)
- 21 humedales : Tasas de cambio de espejos de agua (sección 4.2)
- 6 humedales : Análisis de caudales (sección 4.3)
- Todos : Análisis variables oceanográficas (sección n4.4)
- 33 humedales : Cota de las barras (sección 4.5)
- 10 humedales : Análisis de comunidades de plantas (sección 4.6)

### 4.1 INVENTARIO DE HUMEDALES

La Figura 15 muestra la distribución regional de los 1692 humedales en comunas costeras que contienen áreas bajo los 10 [msnm]. Se constata que los humedales costeros se encuentran en todo el país, pero con un número mayor en la zona sur, a excepción de Aysén y Magallanes. Al graficar la distribución regional de humedales, normalizados por el número de sitios por km de línea costera regional, se aprecia que estos presentan un gradiente latitudinal, aumentando su número de norte a sur y alcanzando un máximo en la región de la Araucanía.

A nivel comunal (Figura 16), los humedales son más densos en el centro sur del país, alcanzando un máximo en la comuna de Constitución, con 1.5 humedales por [km] costero. Algunas comunas con grandes urbanizaciones en las regiones de Valparaíso y Biobío (como Valparaíso, Viña del Mar, Talcahuano, Coronel), presentan valores inusualmente bajos en relación a las comunas vecinas, lo que puede ser un indicio del número de humedales desecados por intervención antrópica. Valores extremadamente bajos en comunas con menos densidad poblacional como puerto Saavedra, se explican porque en estas zonas los humedales en número son escasos, pero sus tamaños son considerablemente más grandes que en otros sitios.

Figura 15: Distribución regional de humedales, en número (arriba). Distribución regional de dunas, playas y humedales, normalizados por el número de sitios por km de línea costera regional (abajo).

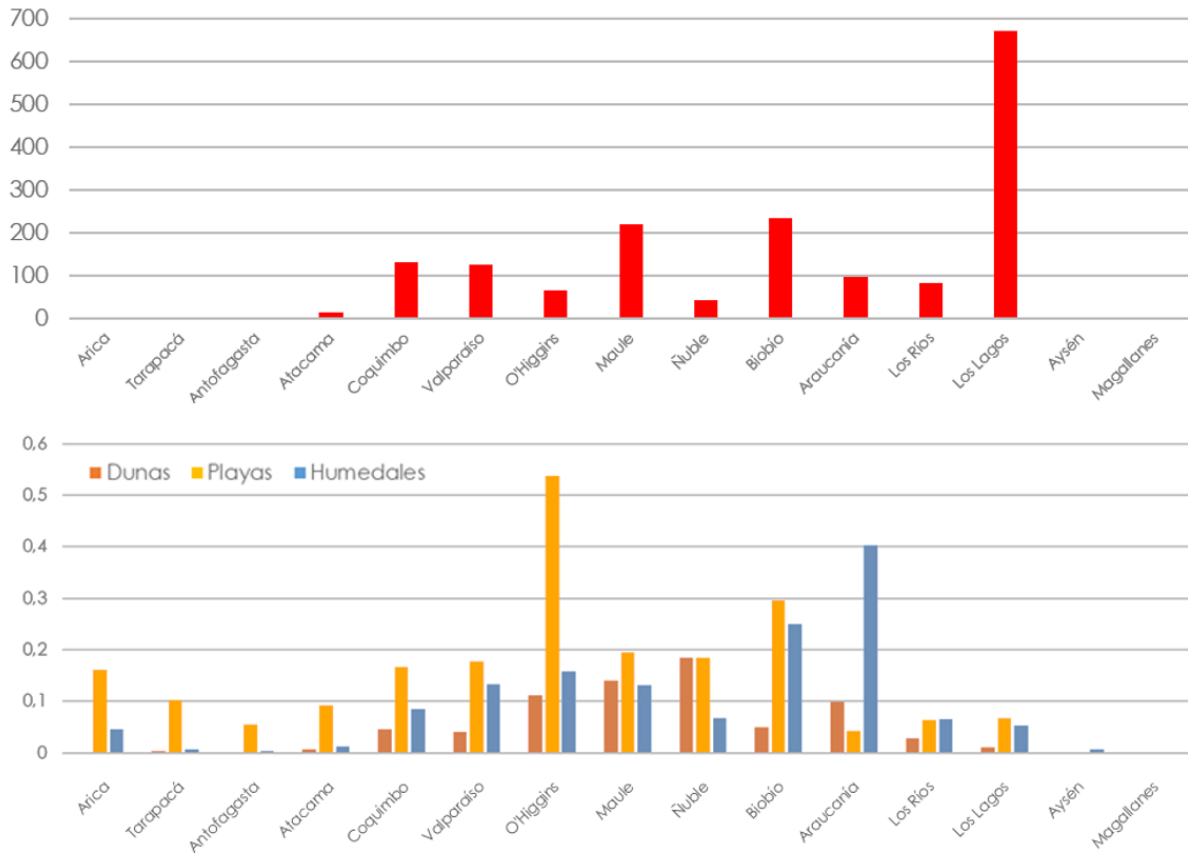


Figura 16: Distribución de humedales, en número, en comunas que contienen áreas bajo los 10 [msnm].



## 4.2 CAMBIO EN LOS ESPEJOS DE AGUA

En la Tabla 3 se muestran las tasas de cambio del área de los espejos de agua con las estimaciones de las tendencias lineales sobre las series mensuales de esta variable. Se observa que, de los 21 humedales analizados 18 presenta una reducción en el área del espejo de agua en el período 1986-2017.

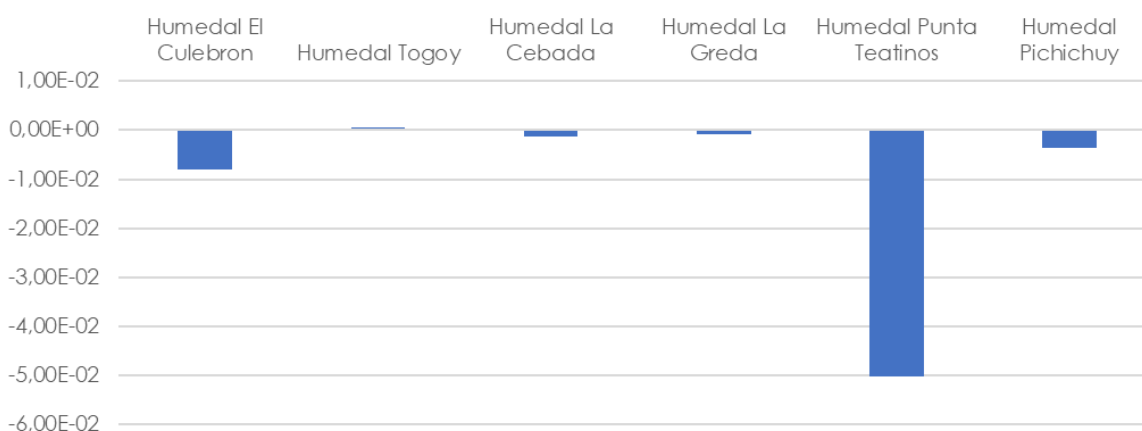
**Tabla 3: Tasas de cambio espejos de agua humedales costeros 1986 – 2017.**

| Número | Nombre              | Tasas de cambio (% / año) |
|--------|---------------------|---------------------------|
| 1      | Laguna Saladita     | -52.63                    |
| 2      | Estuario Río Elqui  | -10.98                    |
| 3      | Estero El Culebrón  | 132.00                    |
| 4      | La Herradura        | -14.29                    |
| 5      | Laguna Adelaida     | -31.71                    |
| 6      | Estero Tongoy       | -26.78                    |
| 7      | Salinas Chica       | 16.67                     |
| 8      | Salinas Grande      | -51.52                    |
| 9      | Humedal Pachingo    | -8.96                     |
| 10     | Pachingo            | 80.00                     |
| 11     | Humedal Río Limarí  | -5.56                     |
| 12     | La Cebada           | -66.67                    |
| 13     | El Teniente         | -61.90                    |
| 14     | Mantos de Hornillo  | -47.27                    |
| 15     | El Totoral          | -77.78                    |
| 16     | Huentelauquen       | -78.95                    |
| 17     | Estuario Río Choapa | -68.47                    |
| 18     | Chigualoco          | -100.00                   |
| 19     | Laguna Conchalí     | -37.70                    |
| 20     | Palo Colorado       | -33.33                    |
| 21     | Quilimarí           | -65.80                    |
|        | Promedio            | -29.13                    |

### 4.3 ANÁLISIS DE CAUDALES

Las 6 cuencas de humedales costeros estudiados entre Copiapó y Maule, presentan pendientes negativas, es decir, los caudales del curso de agua superficial se ha reducido en el período 1980 – 2015. Las cuencas con pendientes más negativas se encuentran en la región de Coquimbo, mientras que en la región de Valparaíso las pendientes, aunque negativas, no son tan severas (Figura 17).

Figura 17: Tasas de cambio (%/año) Pendientes caudales estimadas con tendencias lineales.



### 4.4 ANÁLISIS DE MAREJADAS, NIVEL DEL MAR Y COTA DE INUNDACIÓN

En este análisis se muestra que las marejadas han experimentado un incremento en la frecuencia e intensidad en el período tanto en el período histórico como en la proyección. Asimismo, se constata que a nivel histórico no hay tendencias claras de aumento del nivel medio del mar (relativo) obtenido de mareógrafos, pero que a mediados y fin de siglo habrá un aumento del nivel medio del mar (absoluto) obtenido de modelos. Como consecuencia de ello es posible plantear, en forma de hipótesis, que ha existido (y existirá) i) un aumento en el caudal de sobrepaso de agua de mar a los humedales, ii) una rotura más frecuente de las barras que los separan del mar y como consecuencia de lo anterior, iii) alteraciones en la salinidad de estos cuerpos de agua y iv) eventuales cambios en las comunidades de plantas.

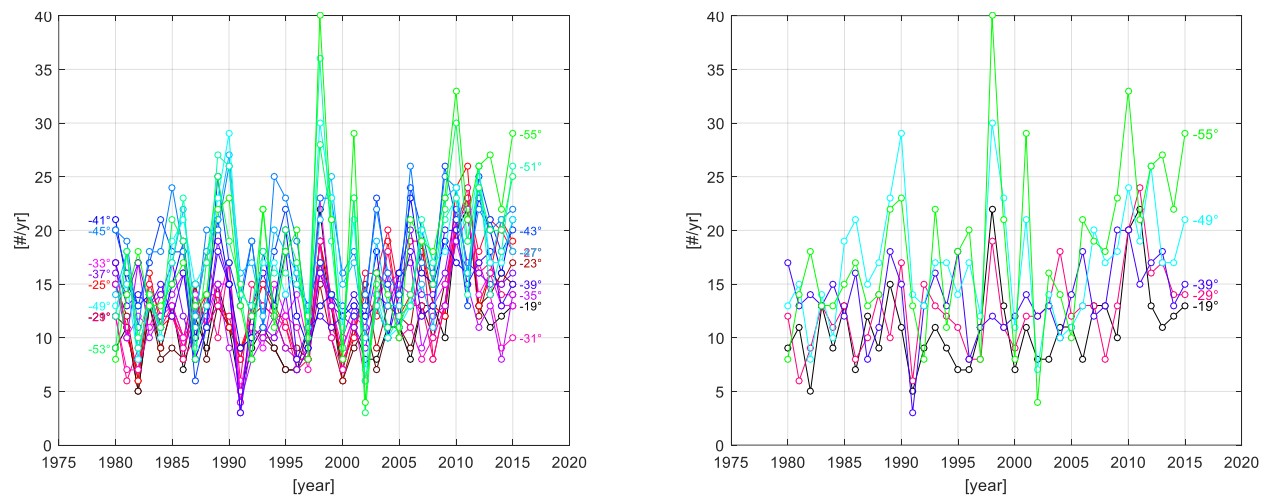
#### 4.4.1 Marejadas

##### 4.4.1.1 Análisis histórico

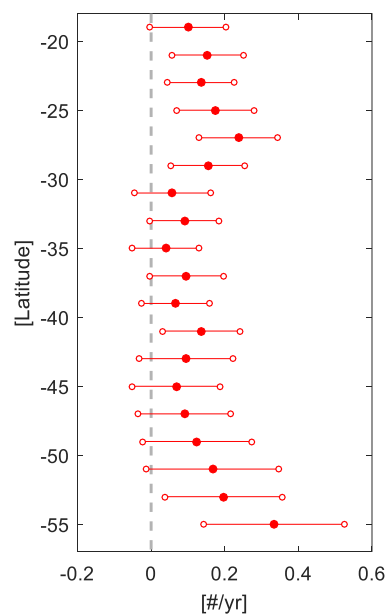
La cantidad de eventos extremos por año en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S entre 1980 y 2015 se muestra en la Figura 18, mientras que la Figura 19 ilustra la tasa anual de cambio de esta cantidad, derivada de la primera. El análisis indica que existe un aumento generalizado en la frecuencia de eventos extremos en todo el país. Las tasas positivas varían entre 0.1 a 0.3

[eventos/año], que son equivalentes a aproximadamente 4 a 12 eventos más en la actualidad en comparación con los años ochenta. El aumento en la frecuencia de eventos extremos es consistente con los escasos estudios disponibles. Martínez et al. (2017) encontraron un incremento de +0.32 (eventos/año) en un conjunto de datos de 58 años que cubre 1958 a 2016 en Valparaíso mientras que el presente estudio muestra un incremento menor de +0.11 (eventos/año) entre 1980-2015. Sin embargo, ambas cifras son estadísticamente significativas. Sus diferencias se explican porque se utilizan diferentes fuentes indirectas para estimar el número de eventos extremos, al no contar con un registro permanente de oleaje de larga data en el litoral nacional.

**Figura 18: Número de eventos extremos en 19 nudos numéricos cada 2° entre 19°S y 55°S (izquierda) y para 19°S, 29°S, 39°S, 49°S y 55°S (derecha), obtenidos de data del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2017).**



**Figura 19: Tasa de variación anual del número de eventos extremos por año. Los puntos rojos representan la media y los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos blancos.**

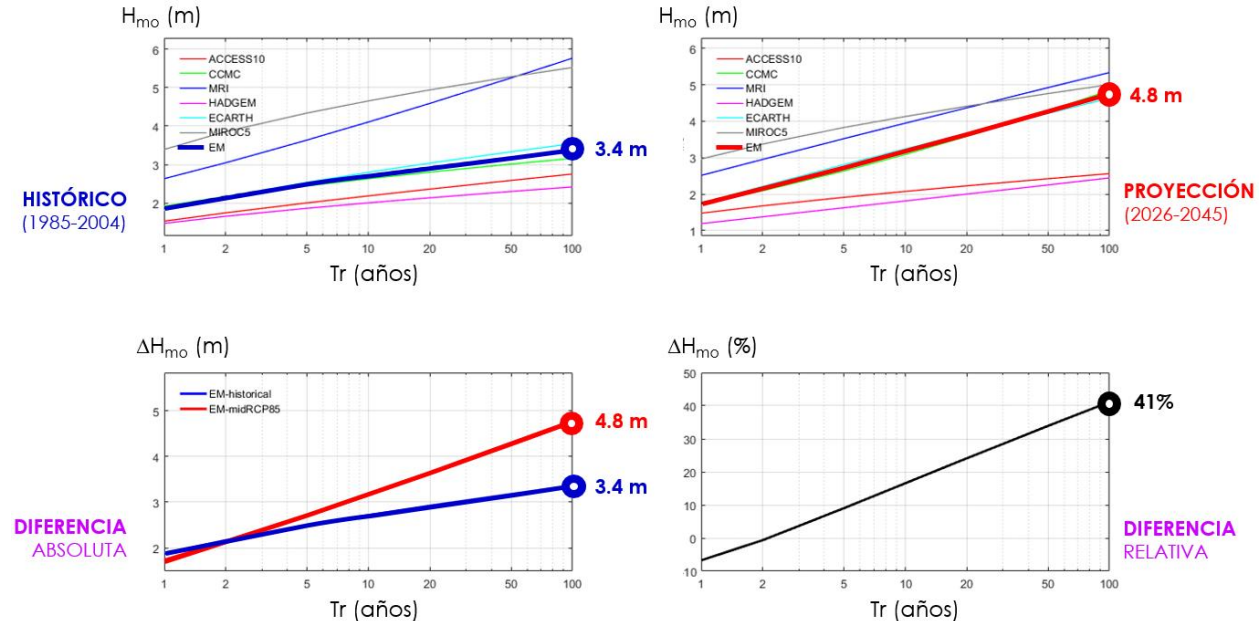


#### 4.4.1.2 Proyección

Con el ánimo de analizar el comportamiento futuro del clima de oleaje extremo (marejadas), en el estudio de puertos (Volumen 5), se efectuó un análisis de valores extremos frente a 9 puertos, cuyos resultados son extrapolables, aunque no directamente, a los humedales. En la Figura 20 se presenta, a modo de ejemplo, un análisis de valores extremos de altura significativa obtenido a partir de seis modelos de oleaje, incluyendo la mediana entre los modelos, en Valparaíso. De la mera inspección de estos resultados, se observa que la altura significativa de los eventos extremos será mayor en la proyección aumentando. Por ejemplo, para un período de retorno de 100 años, el análisis entrega una altura de  $H_{mo} = 3.4$  [m] para el período histórico y  $H_{mo} = 4.8$  [m] para la proyección, lo que representa un aumento de  $\Delta H_{mo} = 1.4$  [m], equivalente a un incremento de 41% en dicha variable.

Este incremento en la frecuencia de las marejadas puede tener consecuencias significativas en los humedales (sólo a modo de hipótesis), como el aumento del caudal de sobrepaso de agua de mar y la rotura más frecuente de las barras que los separan del mar, que en conjunto podrían incrementar la salinidad y los cambios en las comunidades de plantas de los humedales costeros.

**Figura 20: Valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de las curvas de valores extremos obtenidos a partir de seis modelos de oleaje en Valparaíso para el período histórico (1985-2004) y la proyección (2026-2045). Abajo se muestra la diferencia absoluta y la diferencia relativa entre las medianas.**



El caso de Valparaíso, no obstante, es el más crítico de los puertos analizados. En la se presenta el mismo análisis para los puertos de Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, Coquimbo, Quintero, Valparaíso, San Antonio y San Vicente. De la mera inspección de estos resultados, se observa que, para períodos de retorno superiores a 5 años, la altura significativa de los eventos extremos



será mayor en la proyección para los 9 puertos analizados. Por ejemplo, para un período de retorno de 100 años, se espera un incremento porcentual de en 8% en Arica, 41% en Valparaíso y 6% en San Vicente.

La Figura 21 muestra los resultados de altura significativa distribuidos de manera latitudinal para períodos de retorno superiores a 5 años (aquellos eventos cuya magnitud se excede en promedio cada 5 o más años). Se observa que en todos los casos existe un aumento de la altura significativa extrema, pero dicho aumento es mucho más significativo en la zona central (Coquimbo, Quintero, Valparaíso y San Antonio). Hacia el norte y sur, el aumento no es tan importante. Estos resultados están afectos a las condiciones locales de cada puerto y no pueden generalizarse a toda la costa de Chile. No obstante, el hecho de que en la zona central (donde hay numerosos humedales costeros) exista una tendencia generalizada de aumento significativo puede asociarse, a modo de hipótesis con cambios en el sistema climático a gran escala.

**Figura 21: Análisis de valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de seis modelos de oleaje para a) el período histórico (1985-2004) y b) la proyección (2026-2045) frente a los 9 puertos analizados. Líneas más gruesas corresponden al análisis en Valparaíso presentado en la Figura 20. c) presenta la diferencia absoluta y b) la diferencia relativa entre los valores obtenidos para el período histórico y la proyección.**

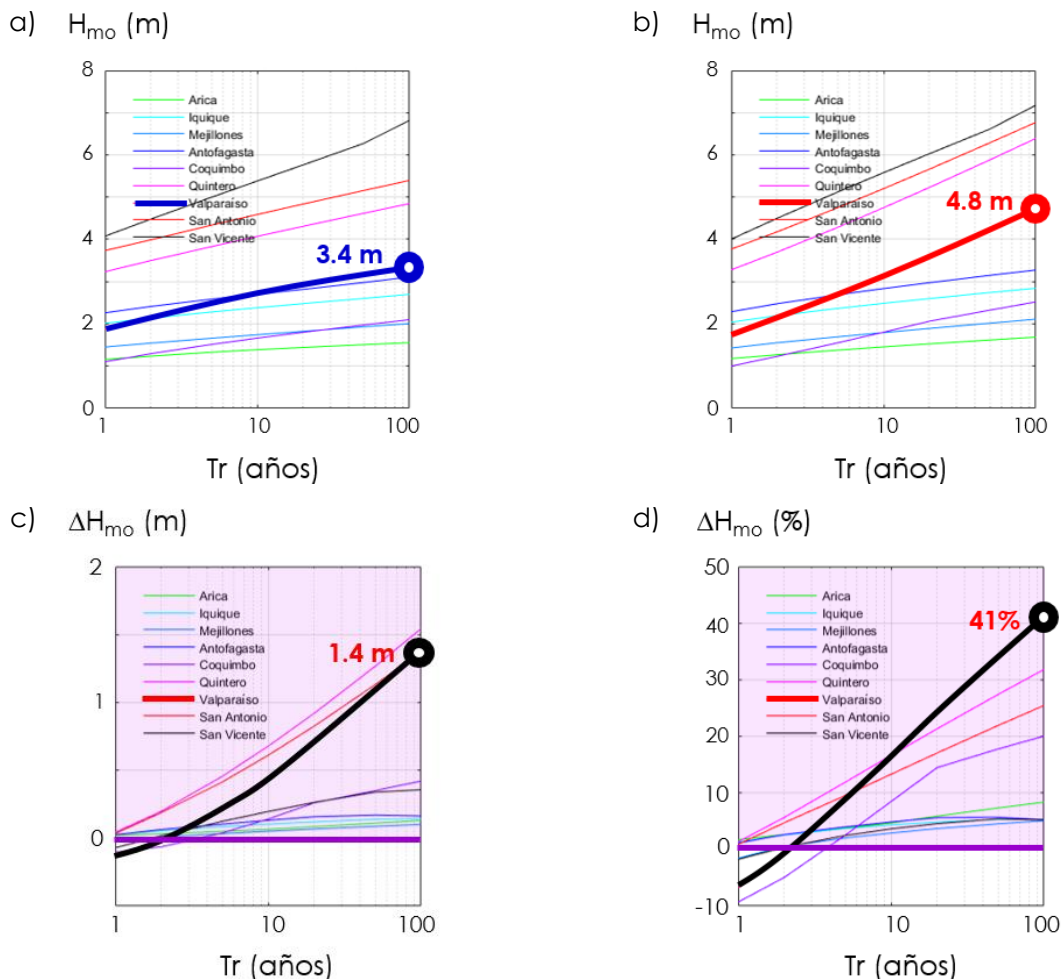
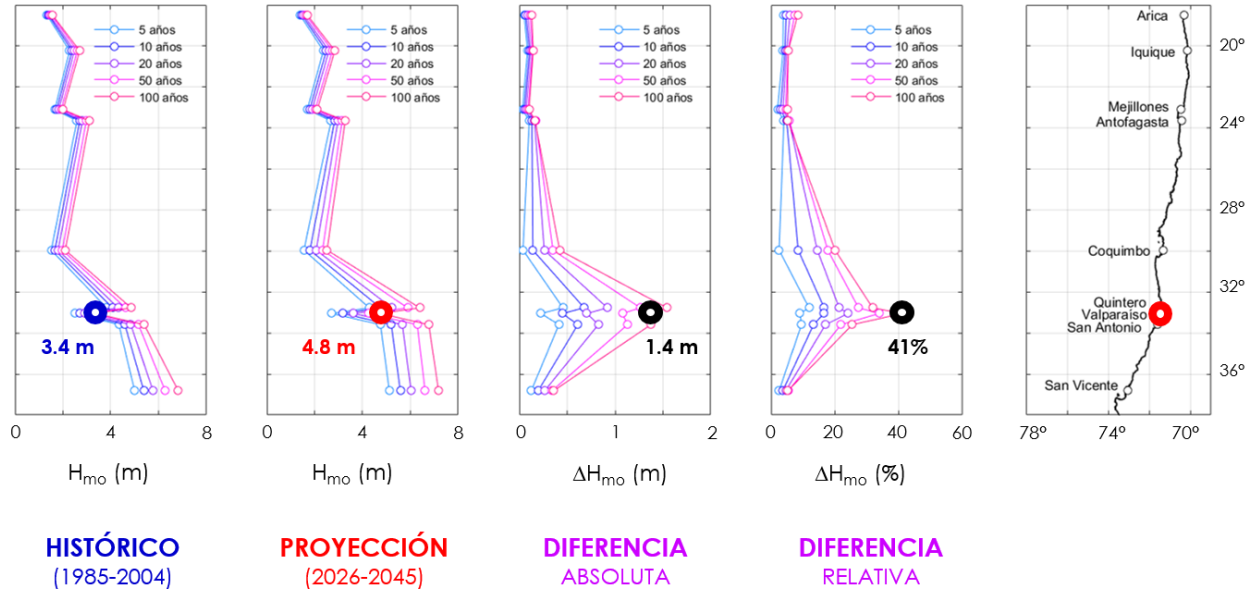


Figura 22: Análisis de valores extremos de altura significativa obtenida como la mediana de seis modelos de oleaje frente a los 9 puertos analizados, expresadas en términos latitudinales. Los círculos gruesos corresponden al análisis en Valparaíso presentado en la Figura 20. Se presenta la altura para el período histórico (1985-2004), la proyección (2026-2045), la diferencia absoluta y la diferencia relativa entre los valores obtenidos para el período histórico y la proyección.



#### 4.4.2 Nivel medio del Mar

##### 4.4.2.1 Análisis histórico

Las tendencias del NMM (relativo al terreno) para 11 mareógrafos (Figura 23) muestran una distribución espacial no homogénea en el margen continental, con estaciones que muestran aumentos de hasta 0,38 [mm/año] en San Antonio (33,6°S) o disminuciones de hasta -0,40 [mm/año] en Puerto Montt (41,5°S). Con excepción de Caldera (27,1°S), las estaciones del norte, que cubren un área de casi 1600 [km<sup>2</sup>], muestran una caída de -0,13 a -0,04 [mm/año]. La porción central del país muestra una tendencia ascendente con valores máximos de 0,36 [mm/año] en San Antonio y 0,11 [mm/año] en Talcahuano (36,7°S). Los grandes cambios en las tendencias entre las estaciones vecinas de Valparaíso y San Antonio pueden atribuirse a los efectos locales. Hacia el sur, Corral (39,9° S) y Puerto Montt muestran las mayores caídas en el nivel del mar en todo el país. En el mar interior chileno (41°S - 47°S) no hay registros a largo plazo del NMM, mientras que, en Puerto Williams, el aumento es relativamente pequeño. La incertidumbre, cuantificada por el intervalo de confianza del 95%, es pequeña debido a la buena longitud de los datos.

El hecho de que no exista una clara tendencia al aumento o descenso del NMM relativo puede atribuirse a las deformaciones verticales que experimenta el terreno debido al ciclo sísmico (las deformaciones pueden ser del orden de metros durante un terremoto mayor). Con ello, no es posible establecer a nivel general si el nivel del mar ha jugado un rol relevante en la dinámica de los humedales. Asimismo, estos resultados son específicos del mareógrafo del cual fueron obtenidos.

Figura 23: Tasa anual de cambio del NMMR en 11 estaciones mareográficas cuya extensión abarca entre 32 y 73 años. En todos los trazados, los puntos rojos representan la media, mientras que los intervalos de confianza del 95% se muestran en barras y círculos horizontales.

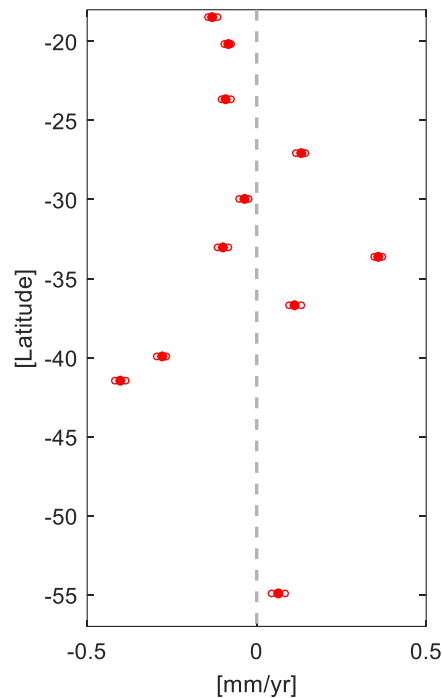
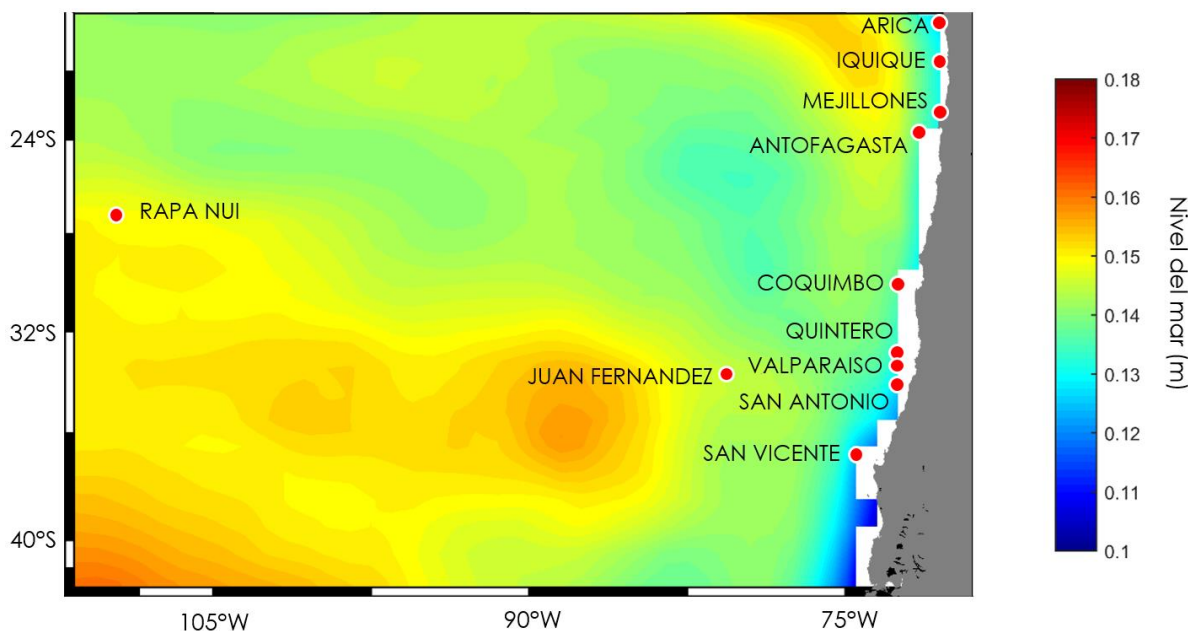


Figura 24: Incremento del nivel del mar respecto entre la mediana de la proyección (2026-2045) respecto de la mediana del período histórico (1986-2005). Los puntos rojos corresponden a los nodos más cercanos a los puertos en los cuales se efectúa la proyección.



#### 4.4.3 Cota de inundación

La Figura 26 muestra la cota de inundación, junto a todas las componentes utilizadas en su cálculo<sup>16</sup>. Se observa que valores mínimos 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 [m] 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, y se debe principalmente al aumento del nivel del mar, cuyo aumento abarca desde +0.20 a +0.24 [m] para dichos extremos, respectivamente. La marea meteorológica y la contribución del oleaje, si bien son importantes en determinar la cota de inundación, no experimentan cambios sustantivos entre ambos períodos.

Este incremento en la cota de inundación (que combina en cierta medida el efecto conjunto de las marejadas y el aumento del nivel medio del mar) puede tener consecuencias significativas en los humedales (sólo a modo de hipótesis), como el aumento del caudal de sobrepaso de agua de mar y la rotura más frecuente de las barras que los separan del mar, que en conjunto podrían incrementar la salinidad y los cambios en las comunidades de plantas de los humedales costeros.

<sup>16</sup> Debido a la dificultad de generar una línea de costa al sur del Canal Chacao y en razón de la escasez de asentamientos costeros expuestos al Océano Pacífico en y al sur de Chiloé, se optó por hacer el análisis de vulnerabilidad (dependiente de la cota de inundación) en la zona costera al norte del Canal Chacao.

Figura 25: Proyecciones de elevación del nivel del mar respecto al promedio 1986-2005 en [m], a partir de 21 modelos del CMIP5 (AR5). Las líneas corresponden a la mediana y el celeste las bandas de error.

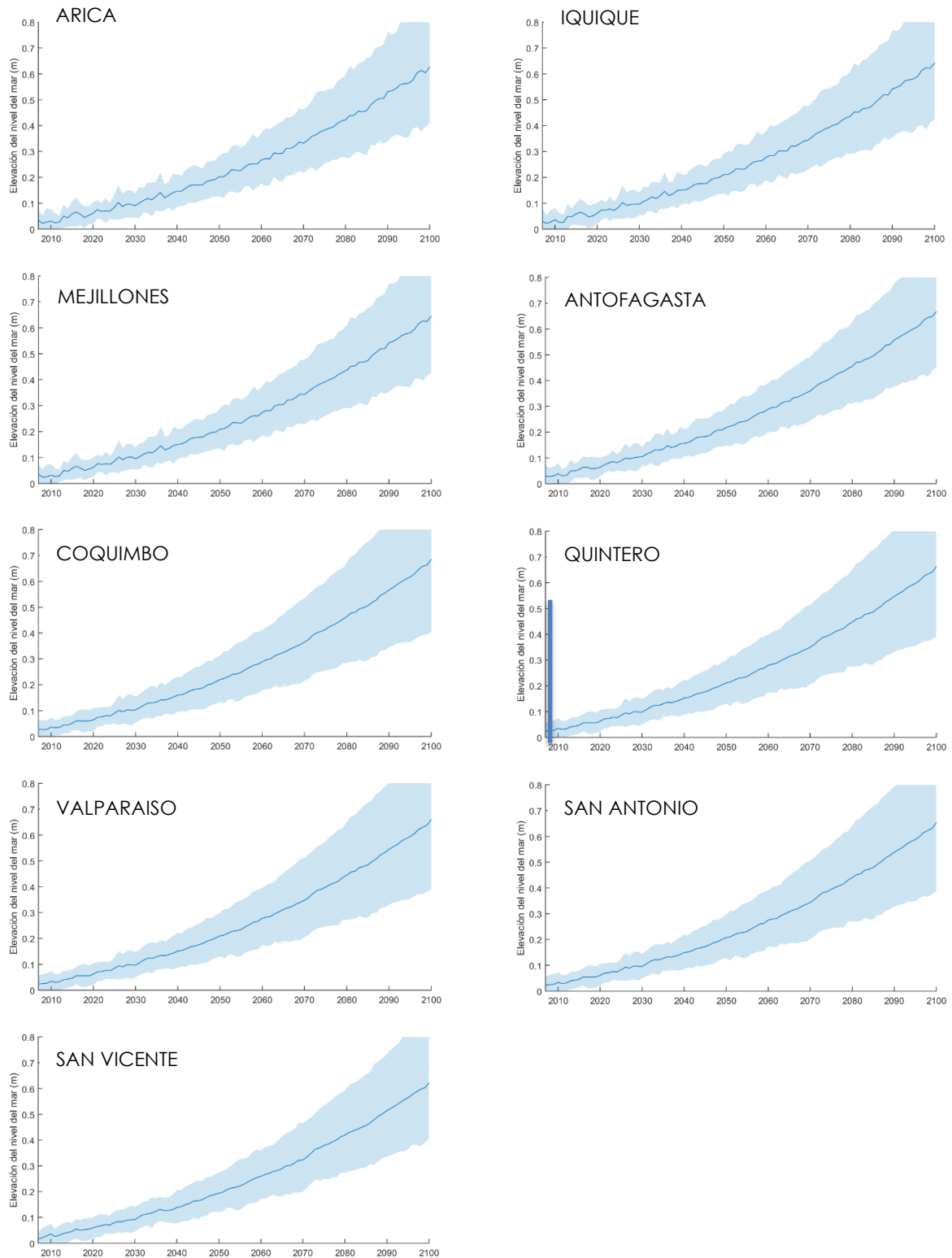
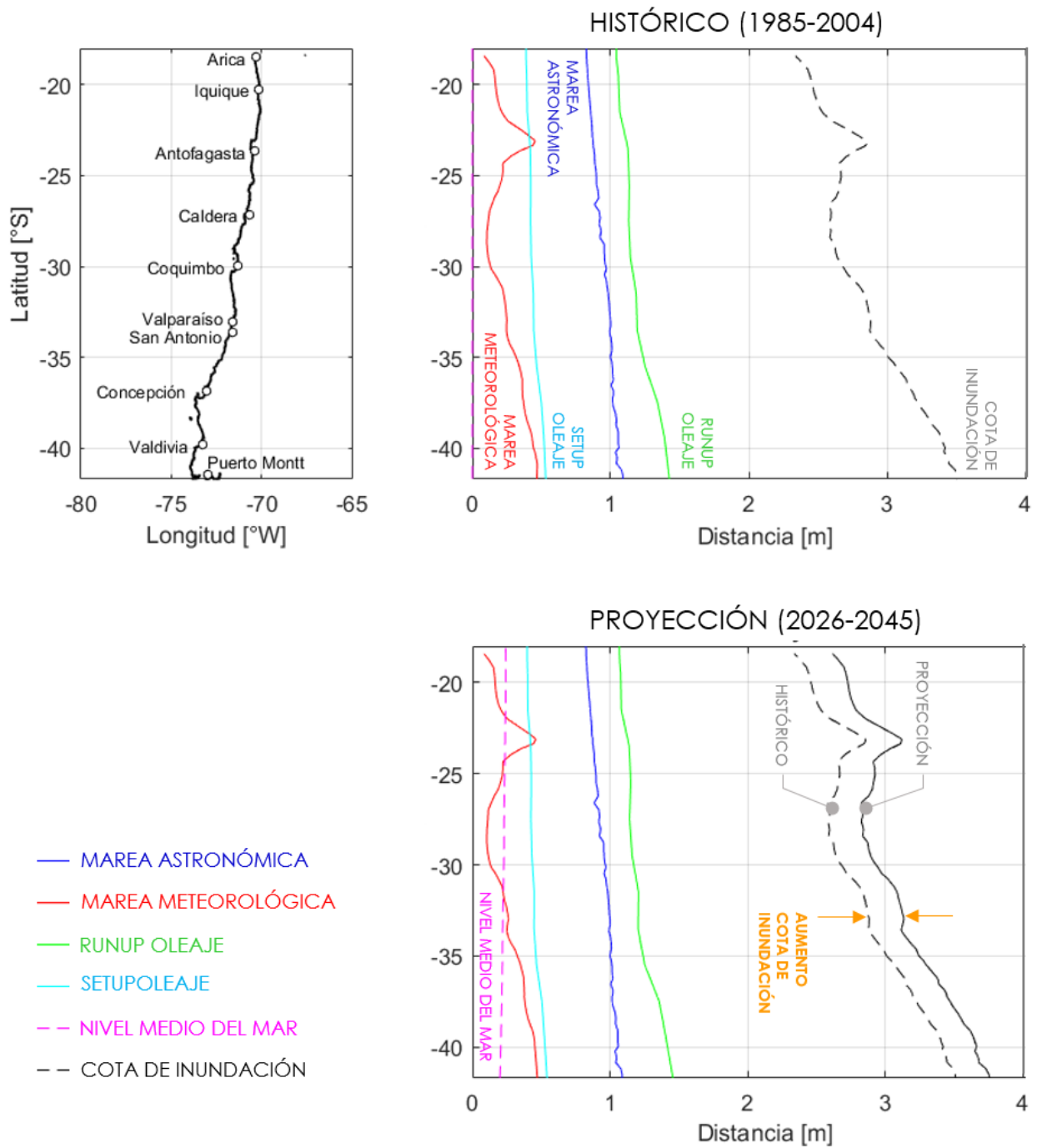


Figura 26: Cota de inundación entre Arica y el Canal Chacao para el período histórico (arriba) y para la proyección (abajo). En el panel de abajo se muestra también la cota de inundación histórica para facilitar la comparación entre ambos períodos.



## 4.5 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

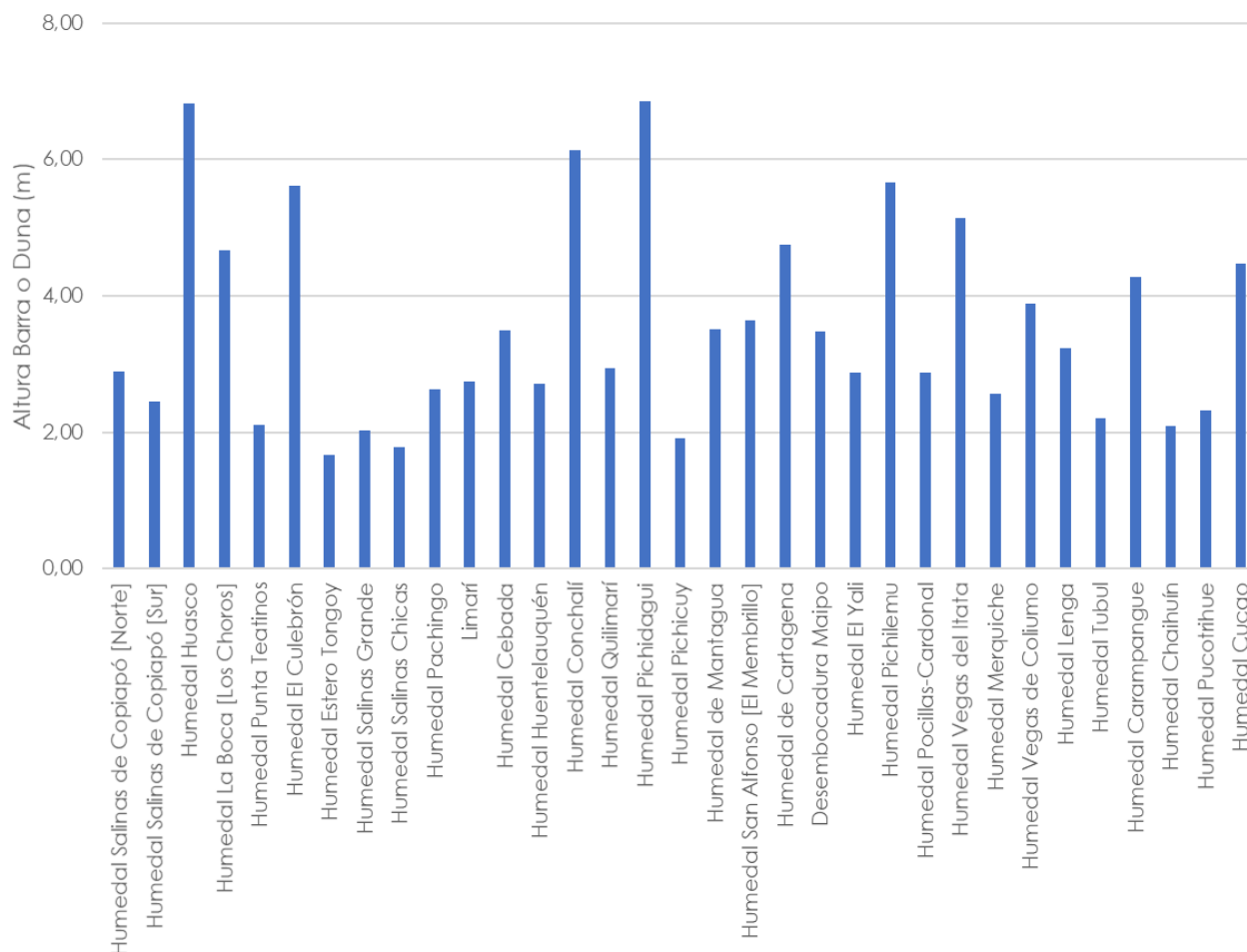
De los 33 humedales en que se estimó la cota de la duna o barra de arena que separa el cuerpo de agua del humedal del mar entre los 27°S y 42°S, se pudo constatar que (Figura 27):

- 3 humedales (9%) presentan separaciones inferiores a 2 [m], lo que permite que se conecten en las pleamares, diariamente.
- 20 humedales (61%) mantienen separaciones de 2 a 4 [m], lo que favorece la conexión en pleamares de sicigia y marejadas. Estos humedales estarían aumentando la frecuencia en que se conectan al mar, lo que redundaría en un cambio de la columna de agua y por lo tanto en el ensamble del ecosistema que sustentan.
- 10 humedales (30%) poseen separaciones superiores a 10 [m], lo que favorece mantengan conexiones superficiales con el mar solo marejadas extraordinarias.

Estas separaciones no son estables, pues dependen de múltiples factores para su acreción y/o erosión, pero son una estimación de la vulnerabilidad actual de los humedales costeros frente a las marejadas.

Cabe notar que aquellos humedales con barras relativamente bajas son más propensos a experimentar sobrepaso de agua de mar y rotura más frecuente de las barras, procesos que en conjunto podrían incrementar la salinidad y los cambios en las comunidades de plantas de los humedales costeros. Las barras de mayor cota y volumen, por el contrario, tienden a aislar a los humedales costeros de la salinidad del mar (aun cuando existe conexión entre ambos cuerpos de agua en forma subterránea).

Figura 27: Altura de separación de las dunas y barras de arena entre humedales y el mar.



#### 4.6 ANÁLISIS DE COMUNIDADES DE PLANTAS

En esta sección se analizan para aquellos humedales en los que se cuenta con información de comunidades de plantas, y que totalizan 10. En el anexo se incluyen los resultados para los 34 humedales donde sólo se cuenta con información de perfiles y/o caudales. Los humedales son:

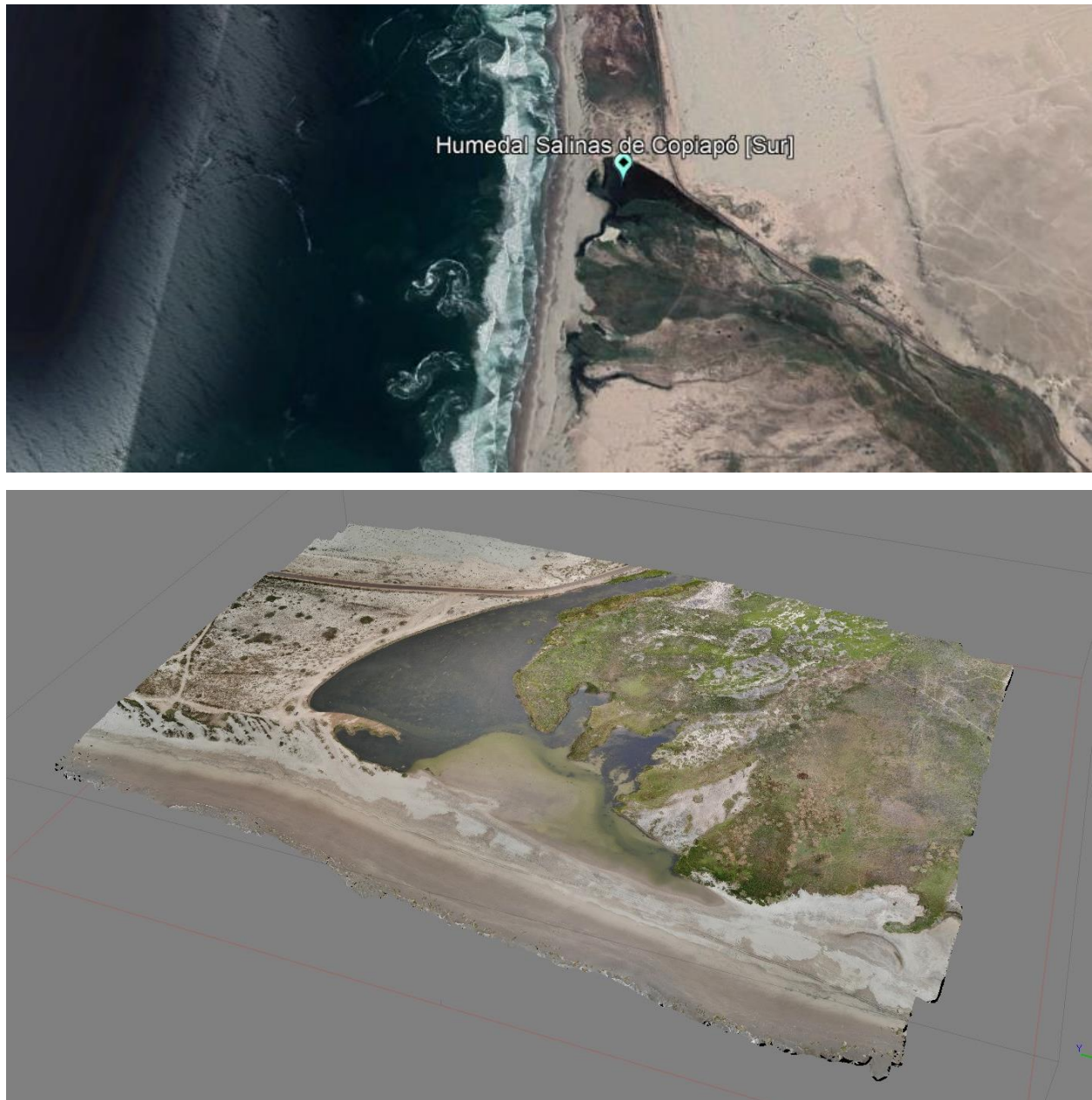
- Desembocadura Estero Copiapó (Salinas Copiapó Sur)
- Punta Teatinos
- Humedal Tongoy
- Salinas Grande
- La Cebada
- Conchalí
- Mantagua
- San Alfonso
- El Yali
- Pocillas



#### 4.6.1 Desembocadura Estero Copiapó (Salinas Copiapó Sur)

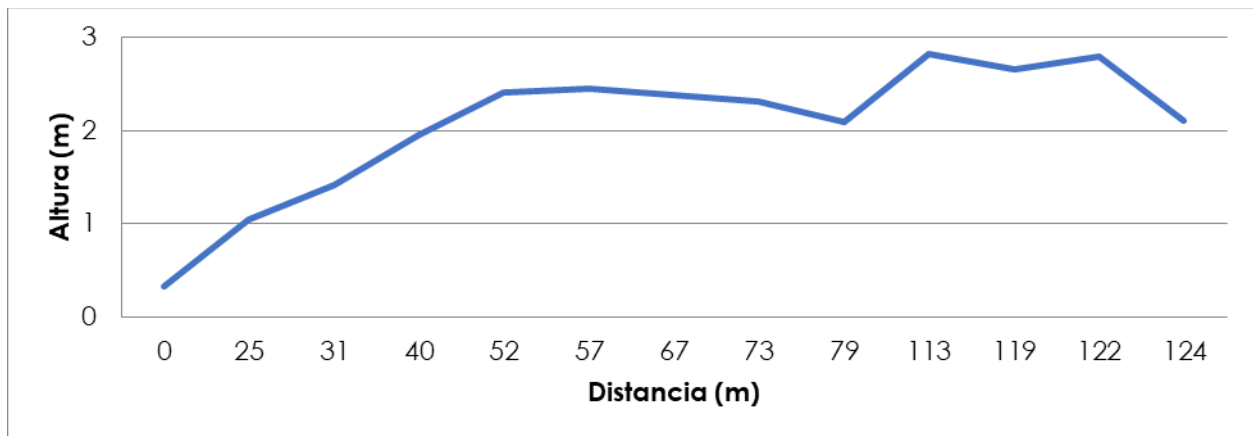
El humedal Desembocadura Estero Copiapó se encuentra localizado en comuna de Caldera (27,31°S; 70,93°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 59.414 m<sup>2</sup> (Figura 28).

Figura 28; Localización Humedal Desembocadura Estero Copiapó.



El perfil topográfico revela una compleja barra de arena que separa la desembocadura del mar, con un ancho superior a 120 m. Además, se observa una anteduna protectora del humedal, con alturas máximas cercanas a los +3 m NRS (Figura 29), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

**Figura 29: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Salinas de Copiapó (norte).** Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



En la Figura 31 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Se observa en este humedal una zonificación bien desarrollada (Figura 30).

**Figura 30: Coberturas de suelo Humedal Salinas de Copiapó**

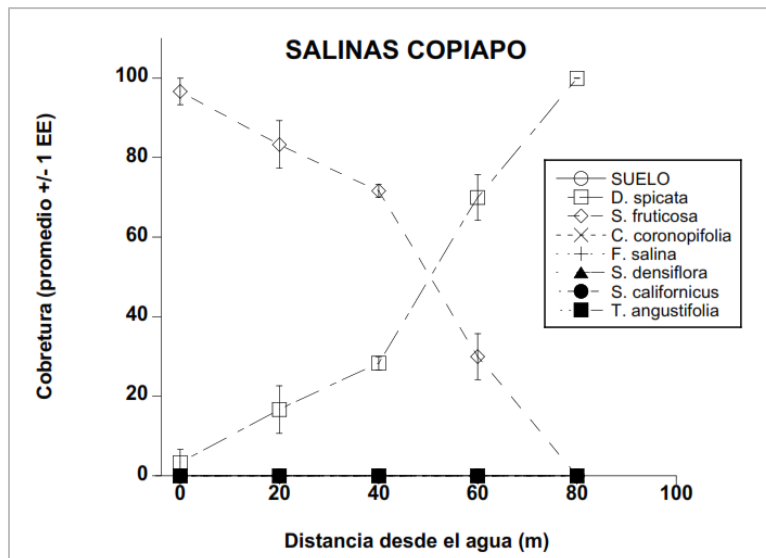
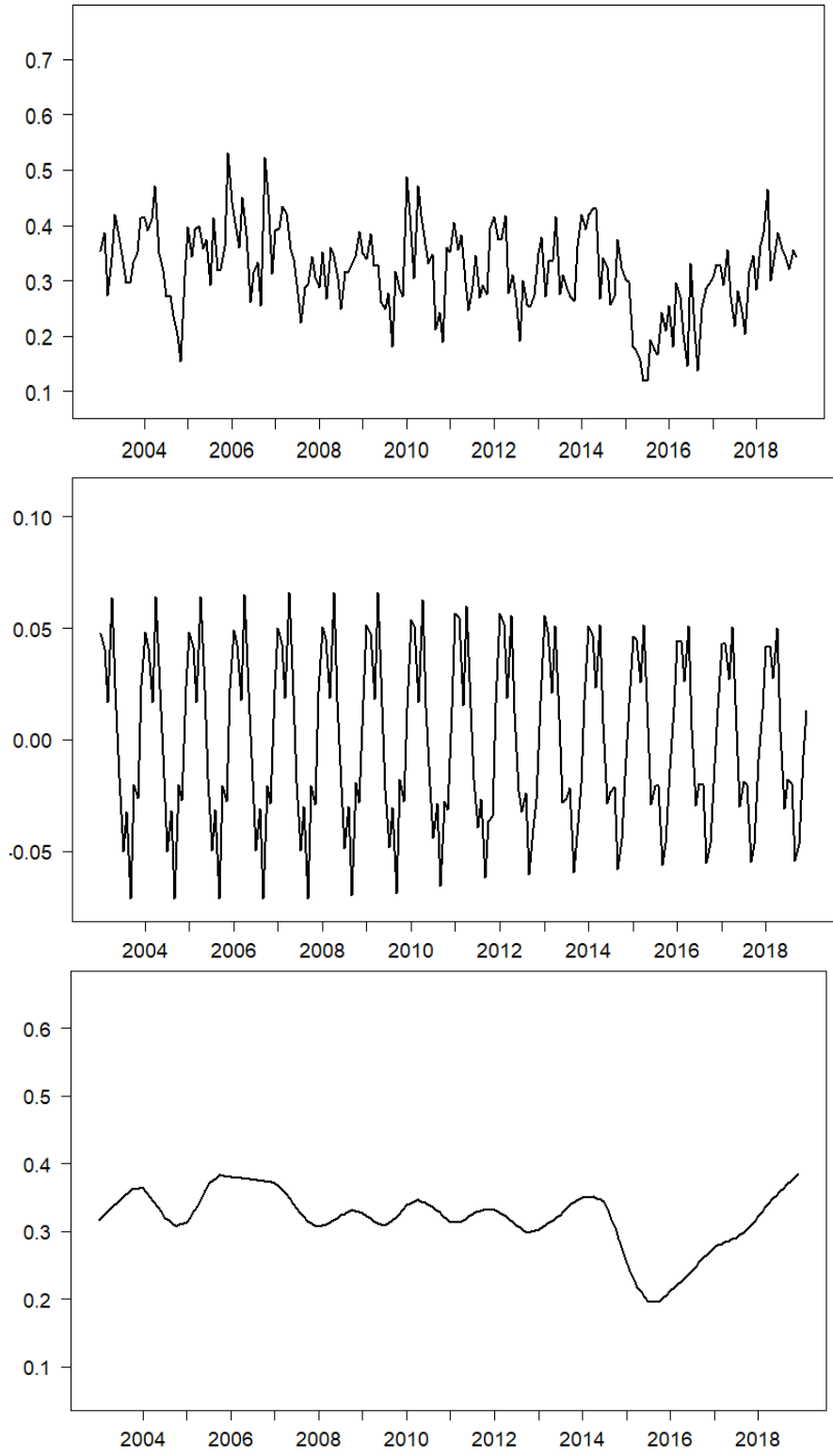


Figura 31: Arriba NVDI, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



#### 4.6.2 Punta Teatinos

El humedal laguna saladita en Punta Teatinos se encuentra localizado en comuna de La Serena (-29,82°S; -71,29°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 23.015 m<sup>2</sup>. Es un cuerpo de agua que presenta varias especies endémicas asociadas y el humedal se encuentra amenazado por el cambio de uso de uso suelo.

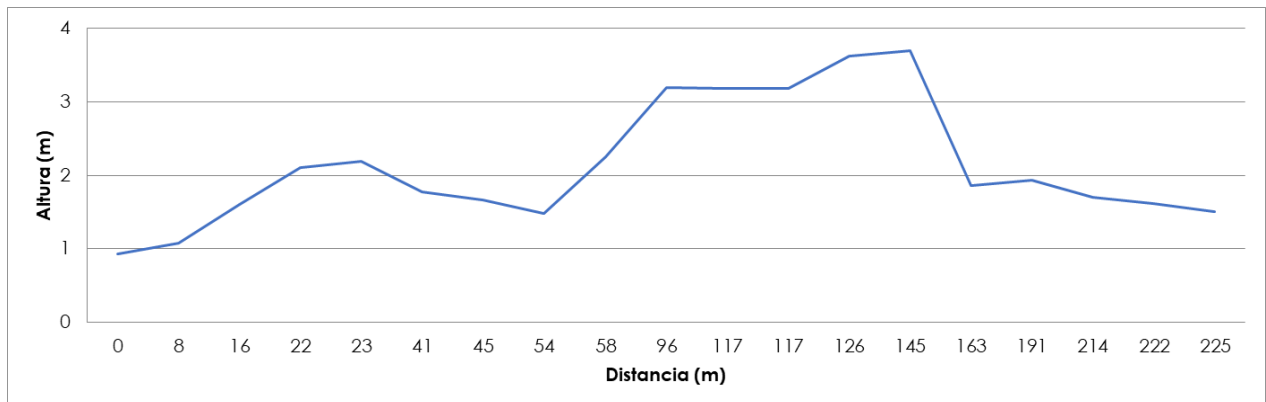
Figura 32; Localización Humedal Saladita, Punta Teatinos.





El perfil topográfico revela una ante duna cercana a los + 4 m NRS (Figura 33), con amplitudes de marea inferiores a 1,7 m.

**Figura 33: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Punta Teatinos. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**



En la Figura 35 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una compleja zonificación, que puede estar asociadas a las presiones y cambios de uso del suelo de humedal (Figura 34).

Figura 34: Coberturas de suelo Humedal Punta Teatinos.

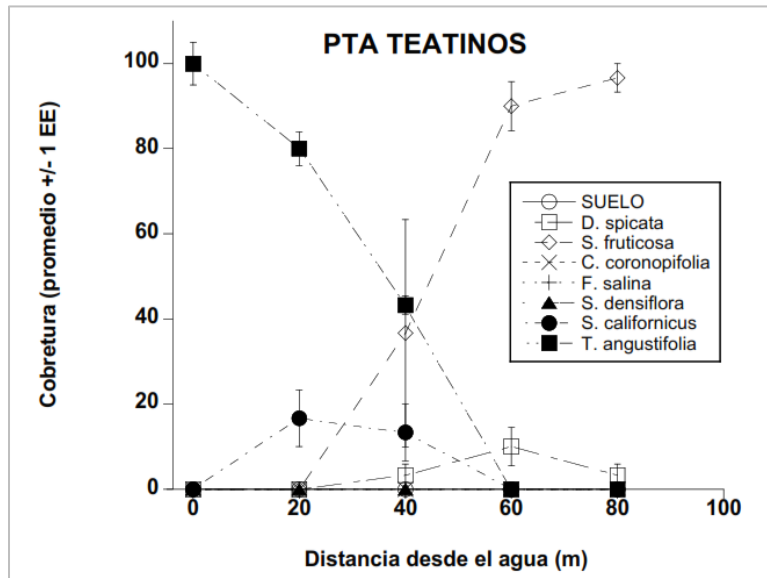
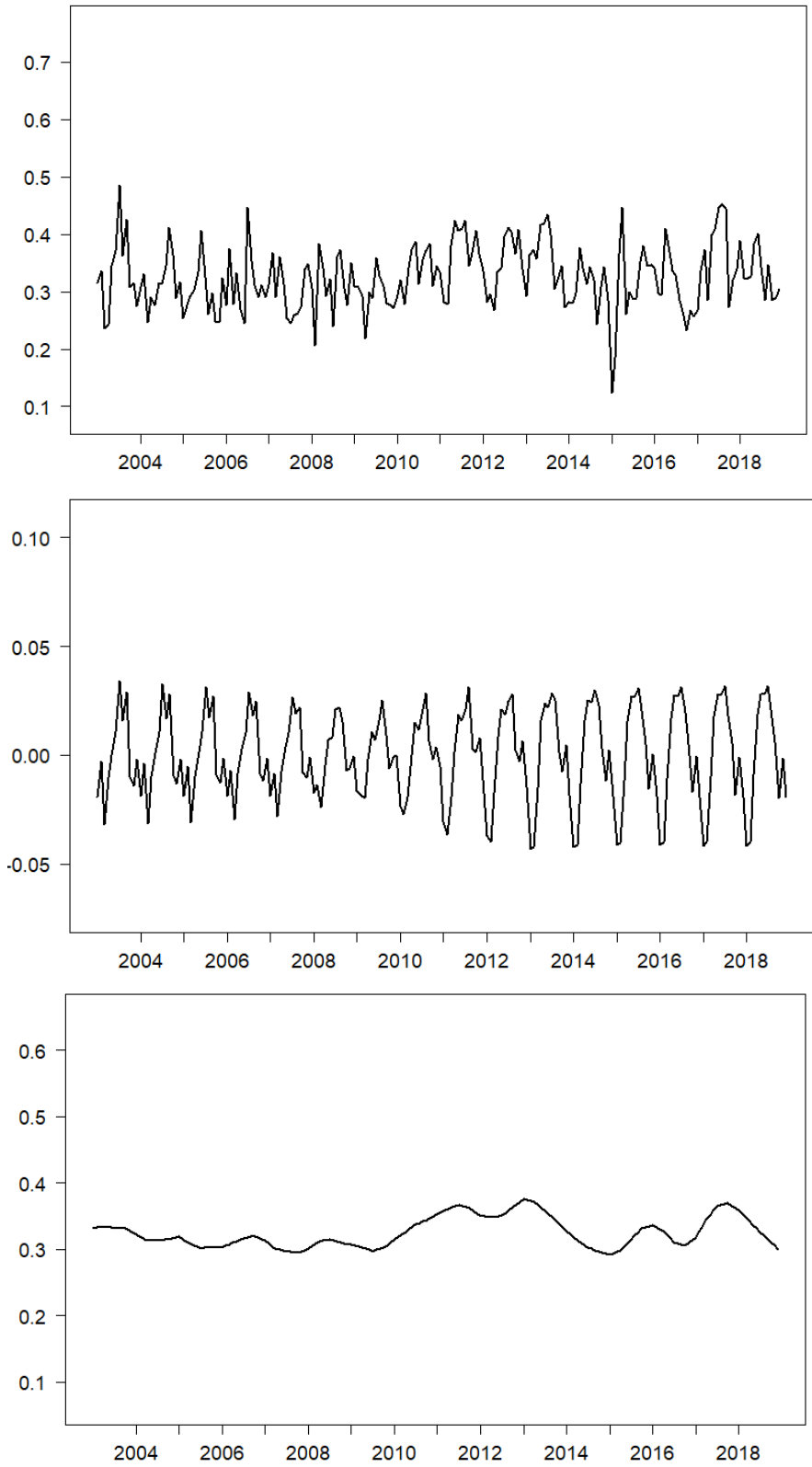


Figura 35: Arriba NVDI Punta Teatinos, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



#### 4.6.3 Humedal Tongoy

El humedal estero de Tongoy se encuentra localizado en comuna de Coquimbo (30,26°S; 71,49°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 27.997 m<sup>2</sup> (Figura 36). Es un humedal estuarino, con presencia de una laguna costera y una extensa playa de arena, que se ubica en la desembocadura del Estero de Tongoy. Es uno de los humedales más reconocidos de la Comuna de Coquimbo debido a la cercanía que tiene con la zona urbana. Este humedal recientemente obtuvo la distinción de sitio Ramsar, junto con la laguna chica, grande y Pachingo (humedales bahía de Tongoy.)

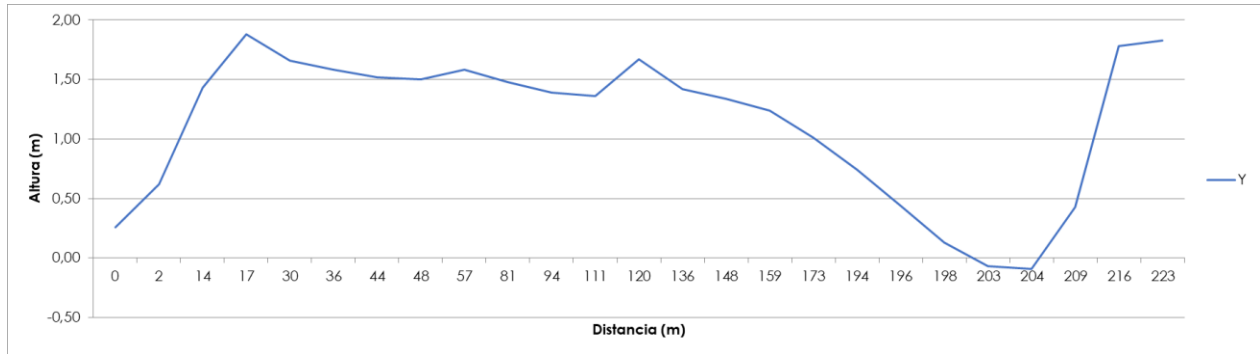
Figura 36; Localización Humedal Tongoy.



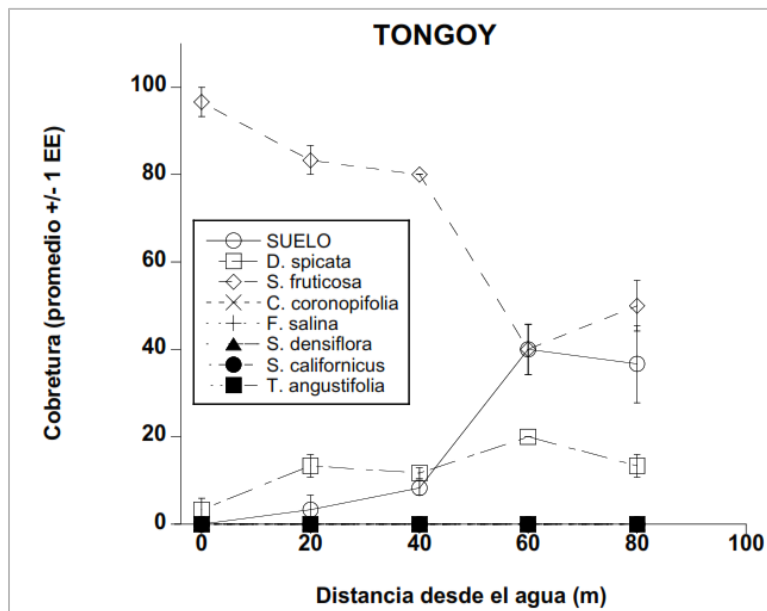


El perfil topográfico revela una playa plana de apenas +2 m NRS (Figura 37), donde las amplitudes de marea son inferiores a 1,7 m. El humedal se encuentra bajo 0 NRS

**Figura 37: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Estero Tongoy. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**

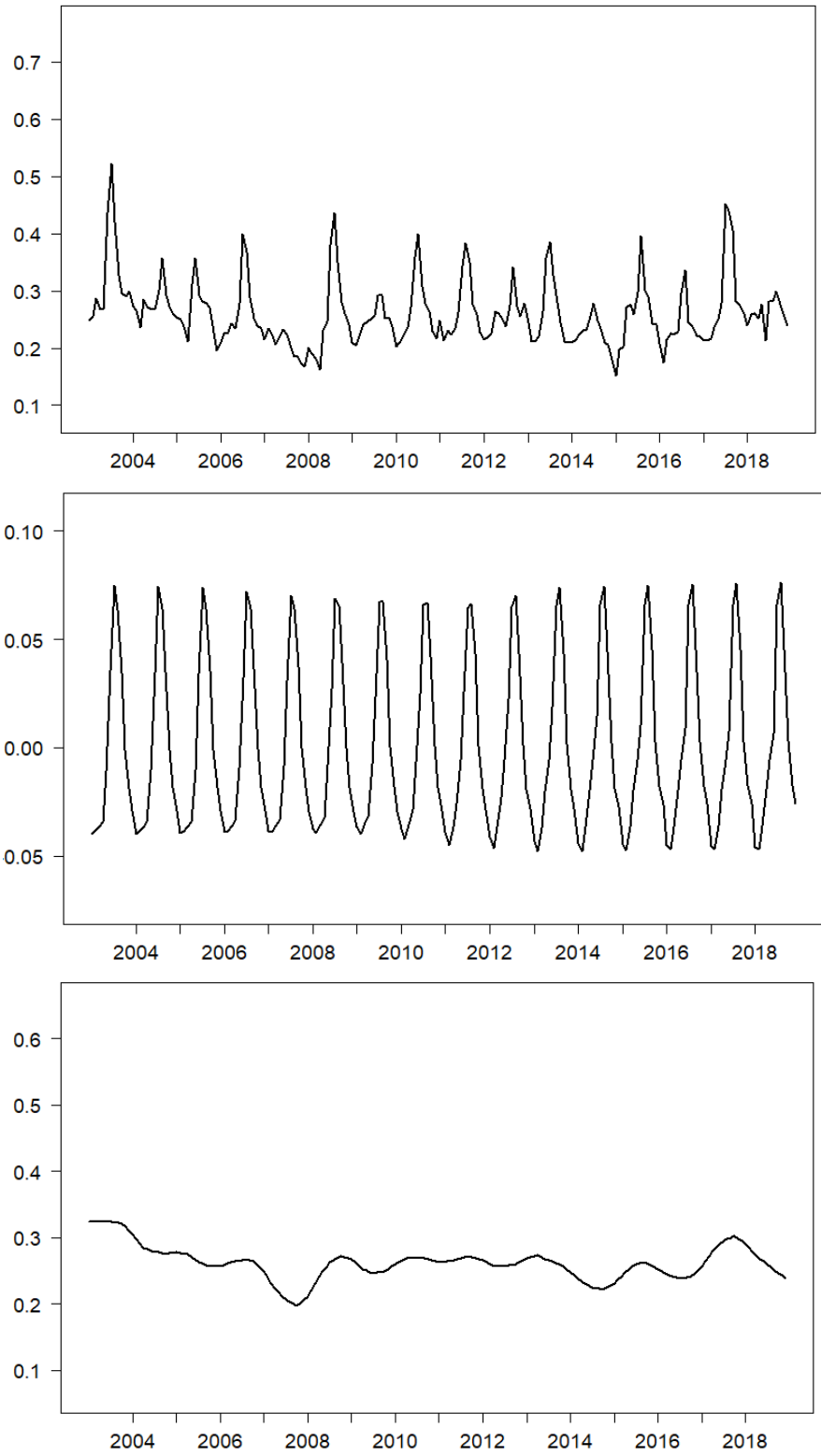


**Figura 38: Coberturas de suelo Humedal Estero Tongoy**



En la Figura 39 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una compleja zonificación, que puede estar asociadas a las presiones y cambios de uso del suelo de humedal (Figura 38).

Figura 39: Arriba NVDI Estero Tongoy, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



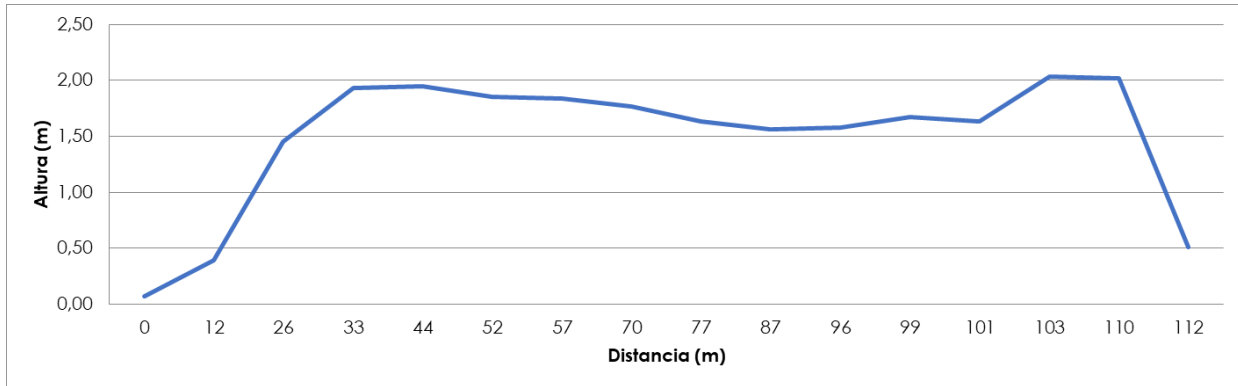
#### 4.6.4 Salinas Grande

El humedal Salinas de Copiapó (norte) se encuentra localizado en comuna de Caldera (30,28°S; 71,51°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 25.623 m<sup>2</sup> (Figura 40). Este humedal se encuentra severamente afectado por el paso de un camino costero que lo separa de la playa, afectando el intercambio natural entre el mar y el humedal. A su vez, este camino parece proteger al humedal de los sobrepasos por marejadas. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS (Figura 41), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura 40; Localización Humedal Salinas Grande.



**Figura 41: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Salinas Grande. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**



En la Figura 42 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores bajos indican la dominancia de vegetación baja. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada.

Figura 42: Arriba NVDI Salinas Grande, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.

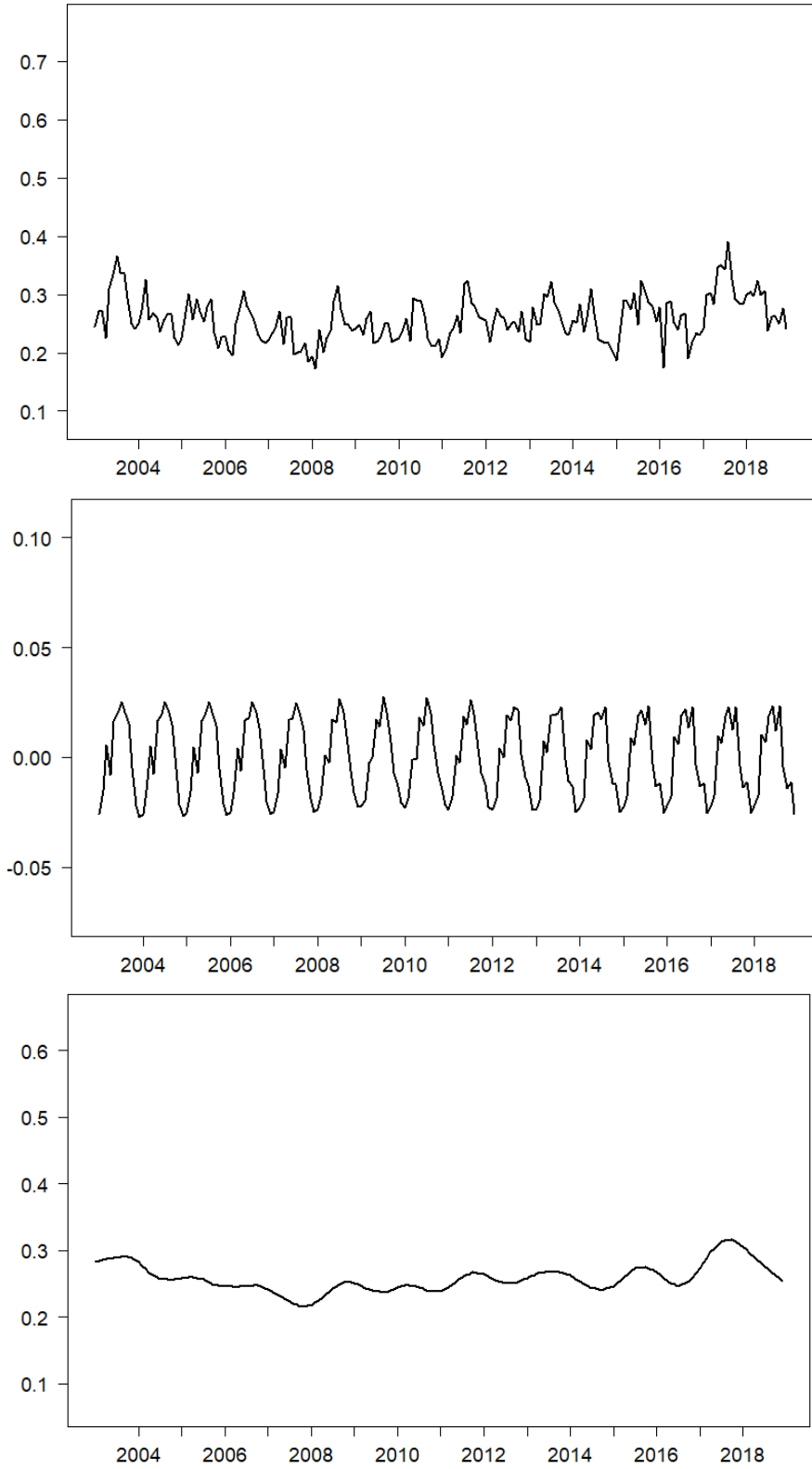
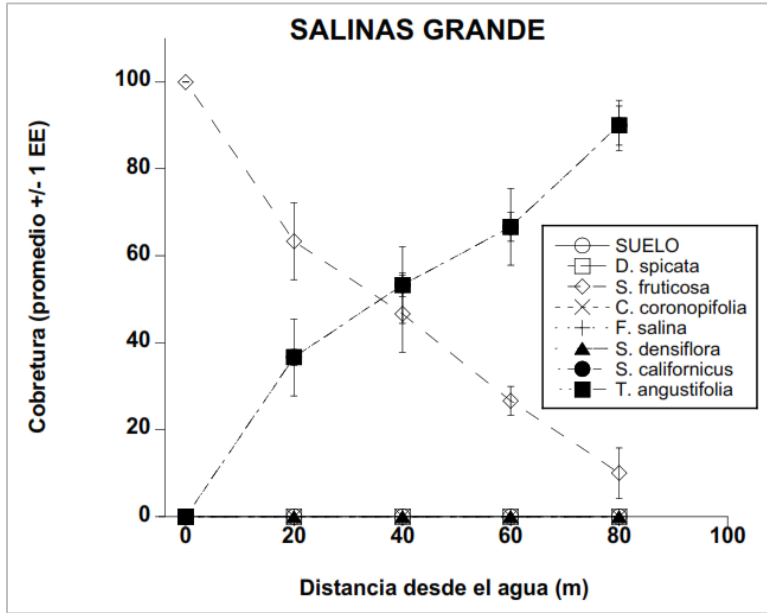


Figura 43: Coberturas de suelo Humedal Salinas Grande.



#### 4.6.5 La Cebada

El humedal La Cebada se encuentra localizado en comuna de Ovalle (30,98°S; 71,65°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 2.114 m<sup>2</sup> (Figura 44). El perfil topográfico revela una duna de más de +3,5 m NRS (Figura 45), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m. Esta barra es una barra de piedras, no de arena.

Figura 44; Localización Humedal La Cebada.

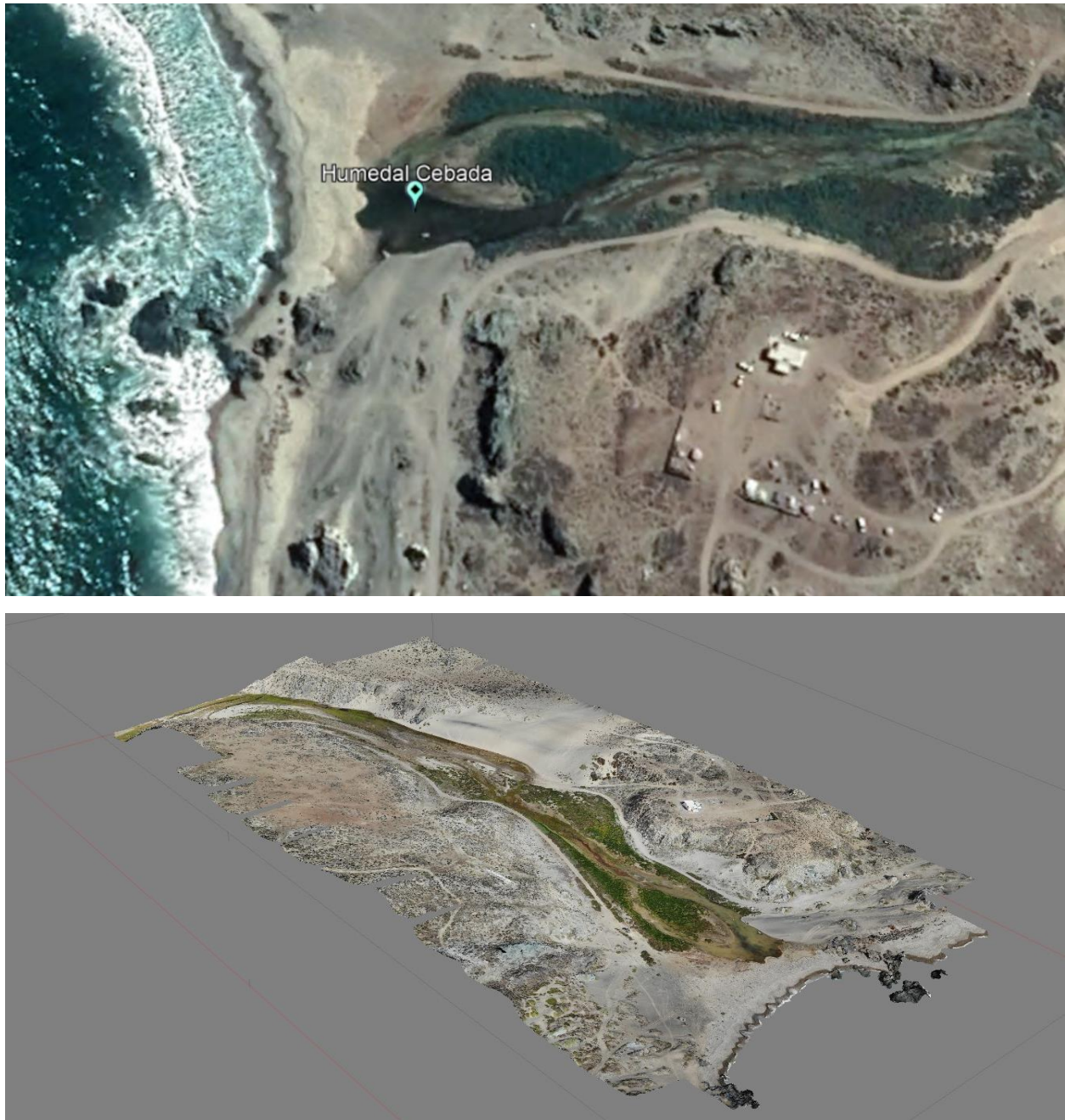
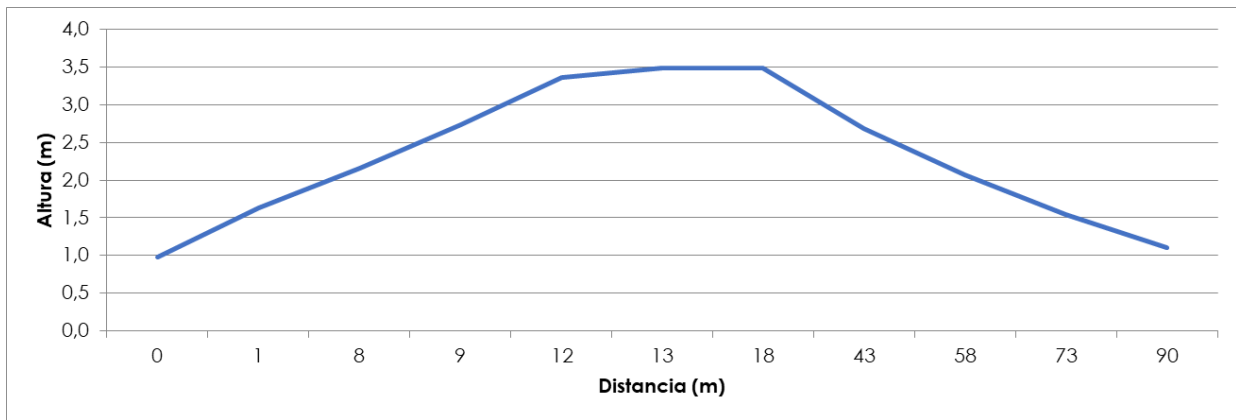


Figura 45: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal La Cebada. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



En la Figura 47 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores bajos indican la dominancia de vegetación baja. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada.

Figura 46: Coberturas de suelo Humedal La Cebada.

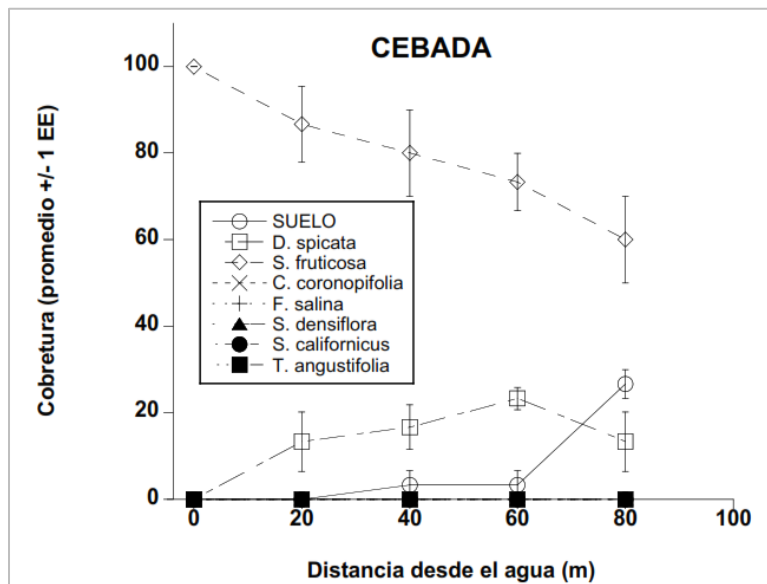
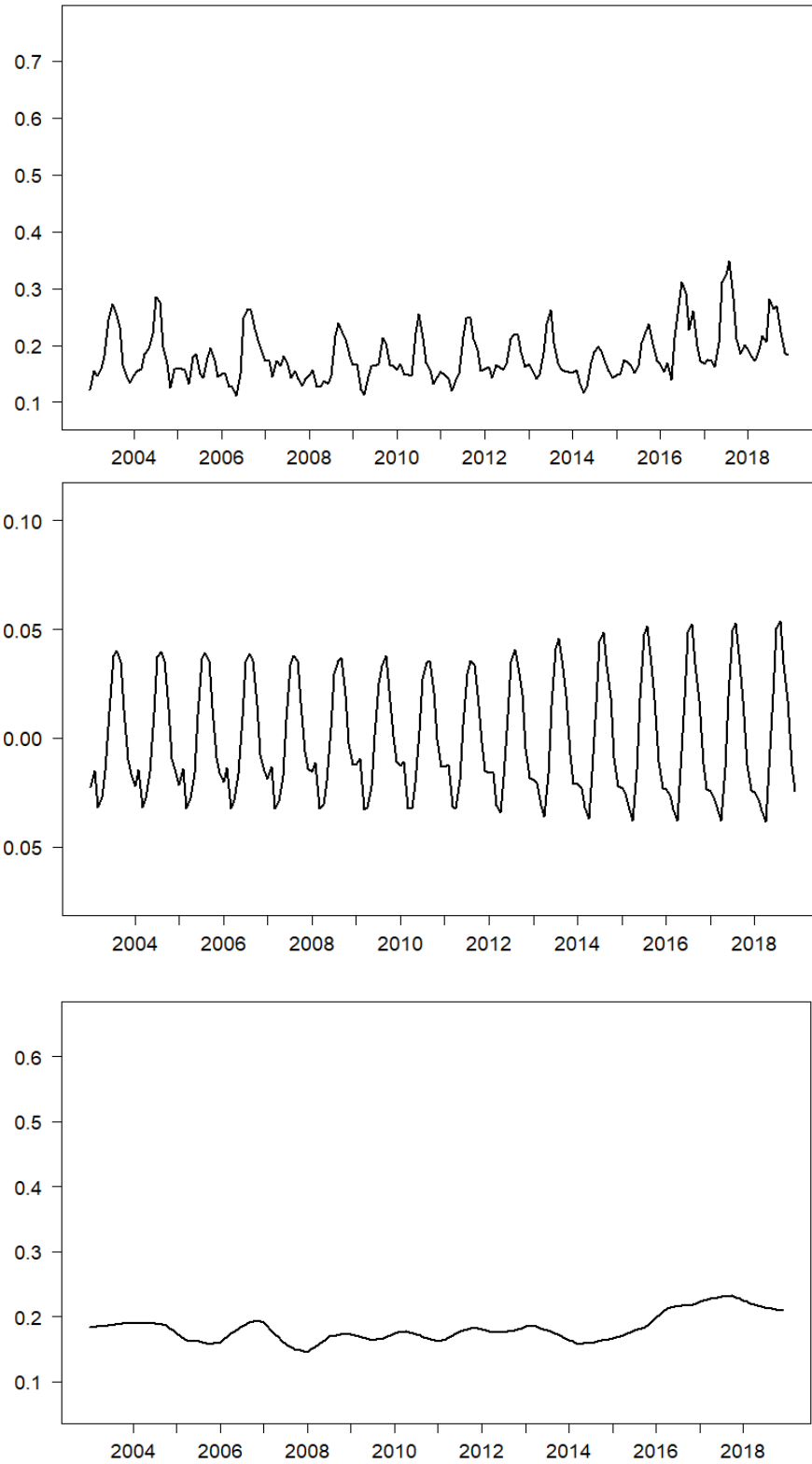




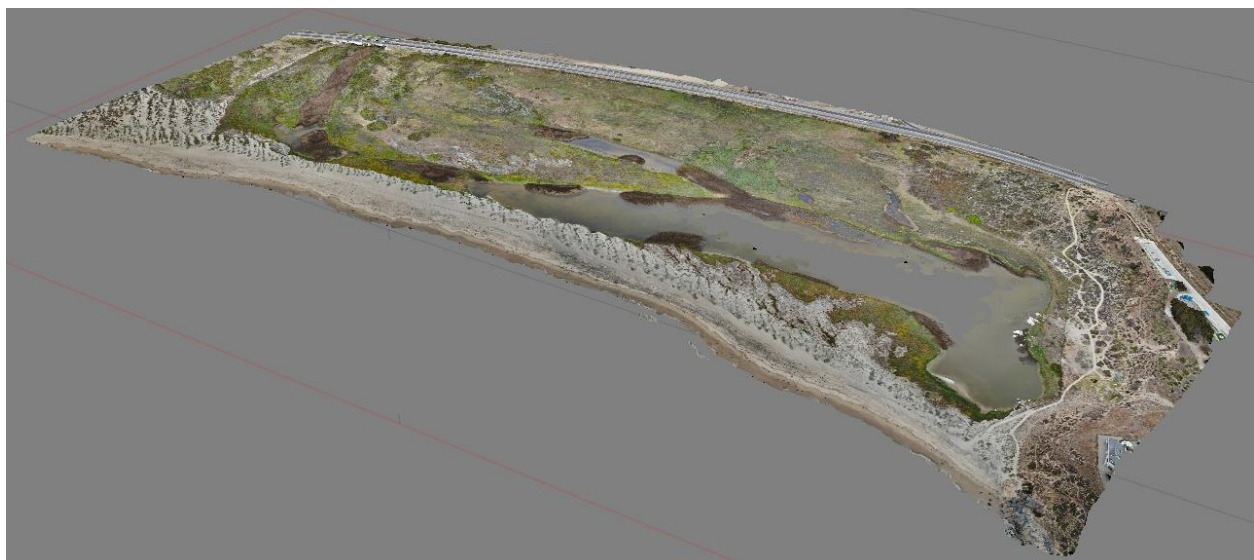
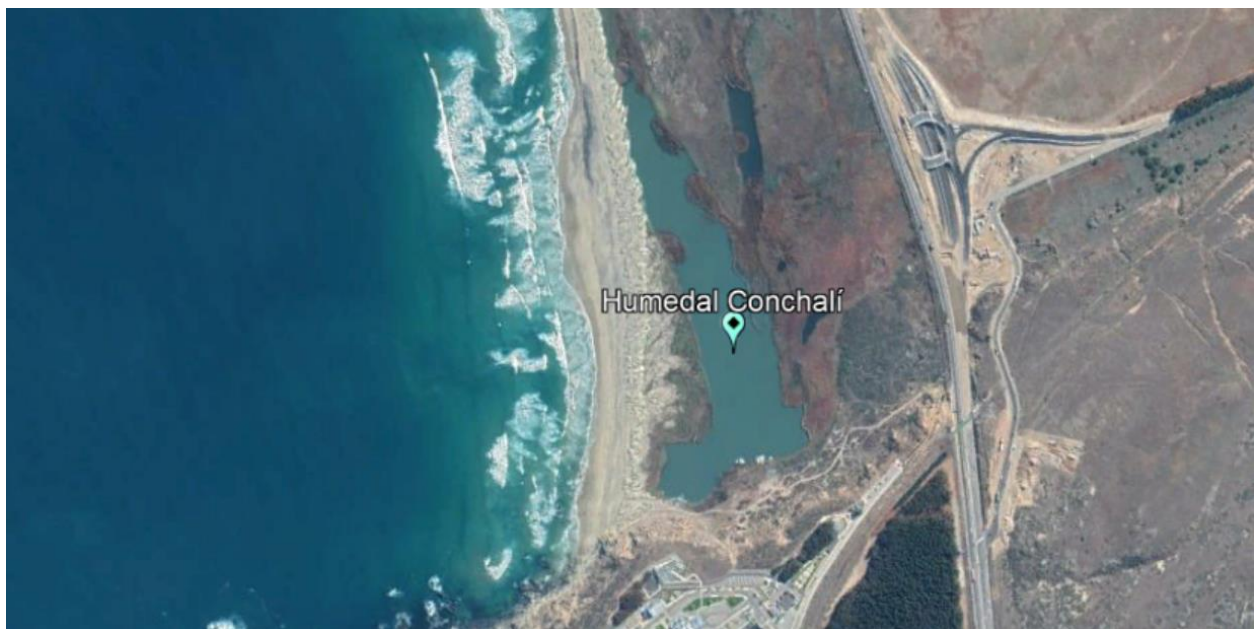
Figura 47: Arriba NVDI La Cebada, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



#### 4.6.6 Conchalí

El humedal Conchalí se encuentra localizado en comuna de Los Vilos (31,88°S; 71,50°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 75.610 m<sup>2</sup> (Figura 48). El Santuario de Naturaleza Laguna Conchalí es un humedal costero localizado a 4 km de Los Vilos. El humedal de 70 há se encuentra bajo el resguardo y manejo de la Minera Los Pelambres y es un sitio Ramsar. El tamaño de la laguna es variable según la estación del año y sus aguas, principalmente salobres, ocasionalmente llegan a recibir flujo de agua marina del estero Conchalí. El sitio cuenta con una playa arenosa amplia y vegetación consistente en juncos y totora. Una carretera cruza el cuerpo de agua del humedal y parte de la vegetación, lo que representa una presión para el sitio.

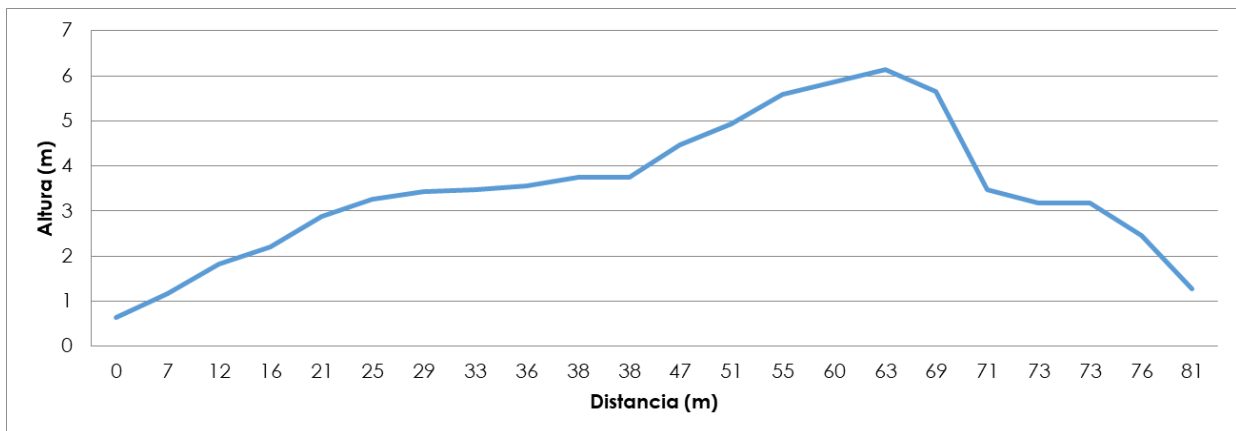
Figura 48; Localización Humedal Conchalí.





El perfil topográfico revela una duna de más de +6 m NRS (Figura 49), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

**Figura 49: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Conchalí. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). El humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**



En la Figura 51 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada (Figura 50).

Figura 50: Coberturas de suelo Humedal Conchalí

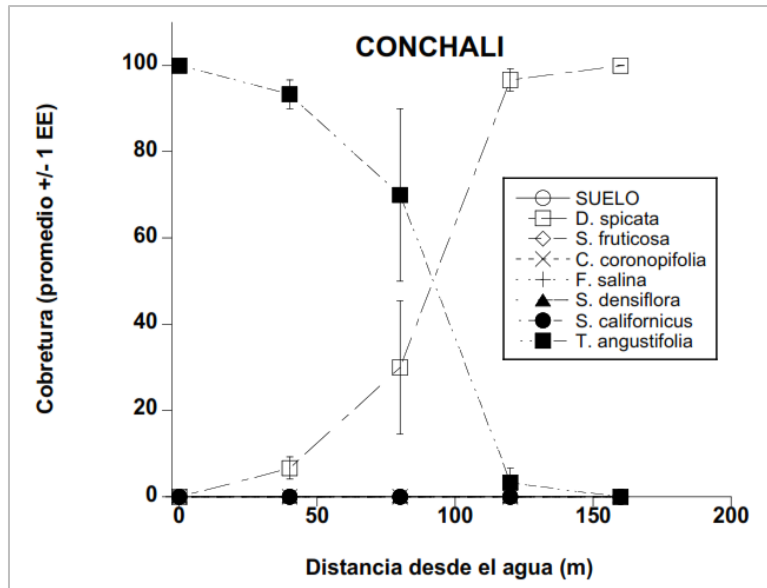
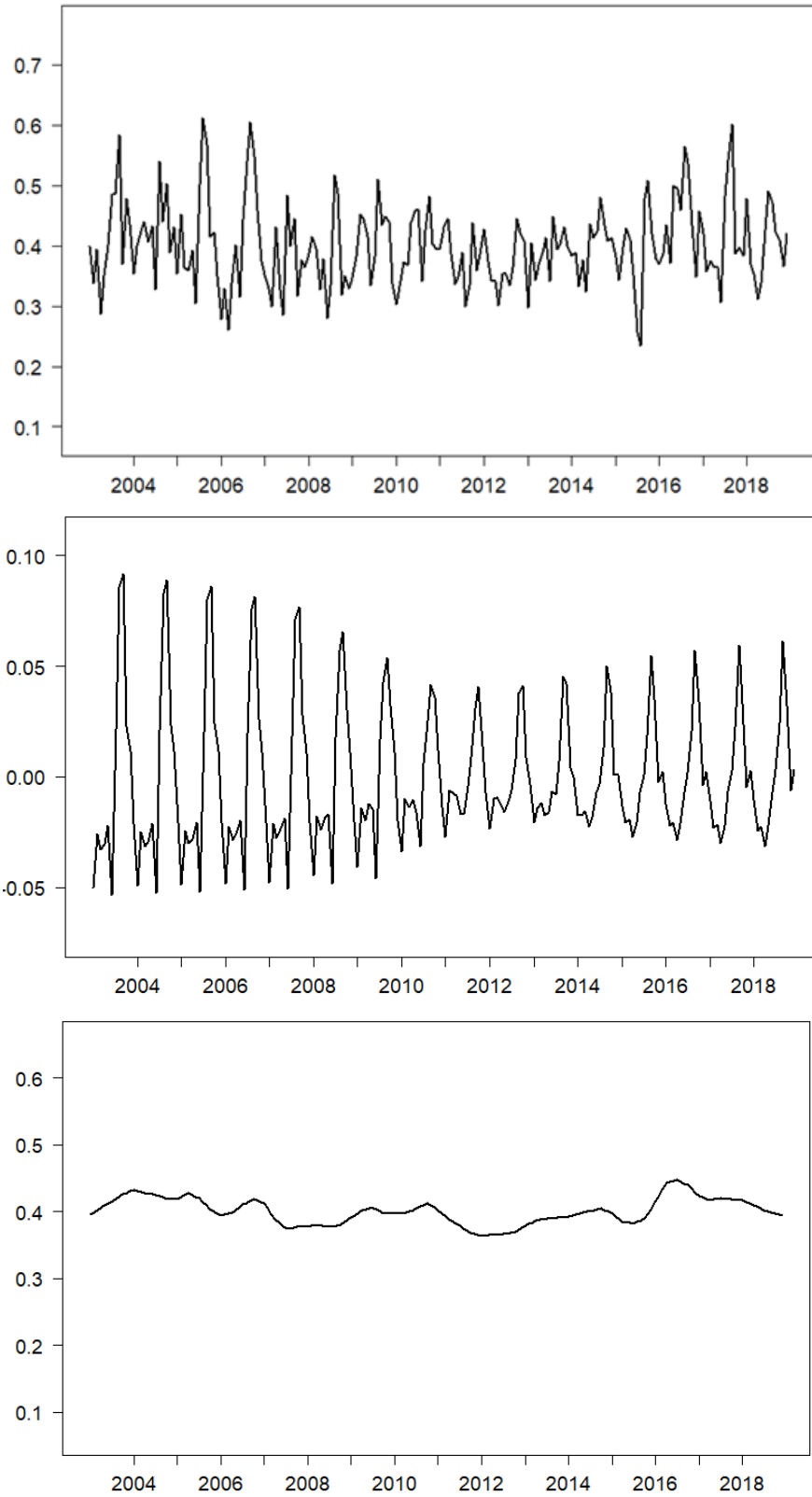


Figura 51: Arriba NVDI Humedal Conchalí, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



#### 4.6.7 Mantagua

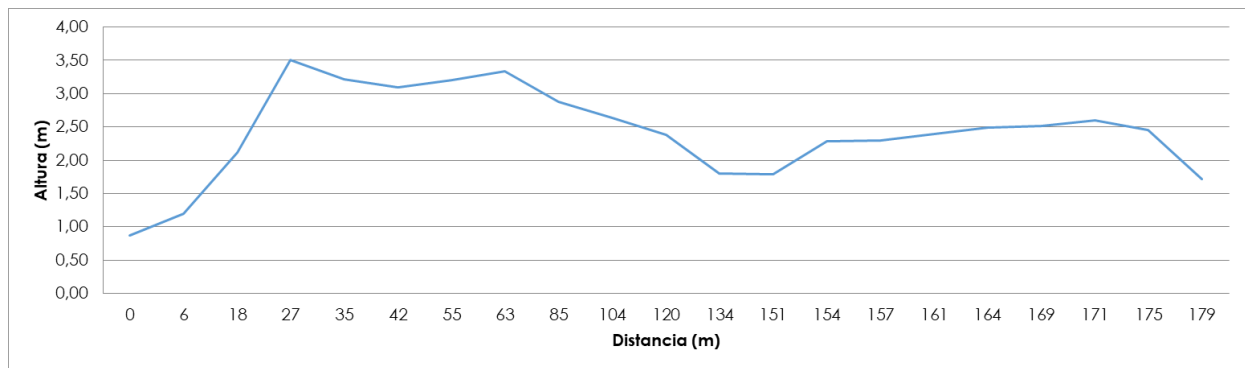
El humedal Mantagua se encuentra localizado en comuna de Quintero (33,88°S; 71,51°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 106.191 m<sup>2</sup> (Figura 52). El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS (Figura 53), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura 52; Localización Humedal Mantagua.





**Figura 53: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Mantagua. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**



En la Figura 54 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada (Figura 54).

Figura 54: Coberturas de suelo Humedal Mantagua

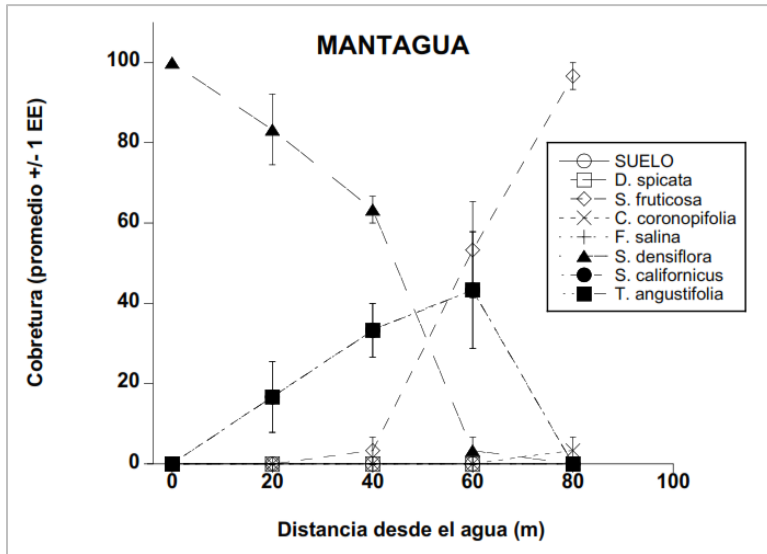
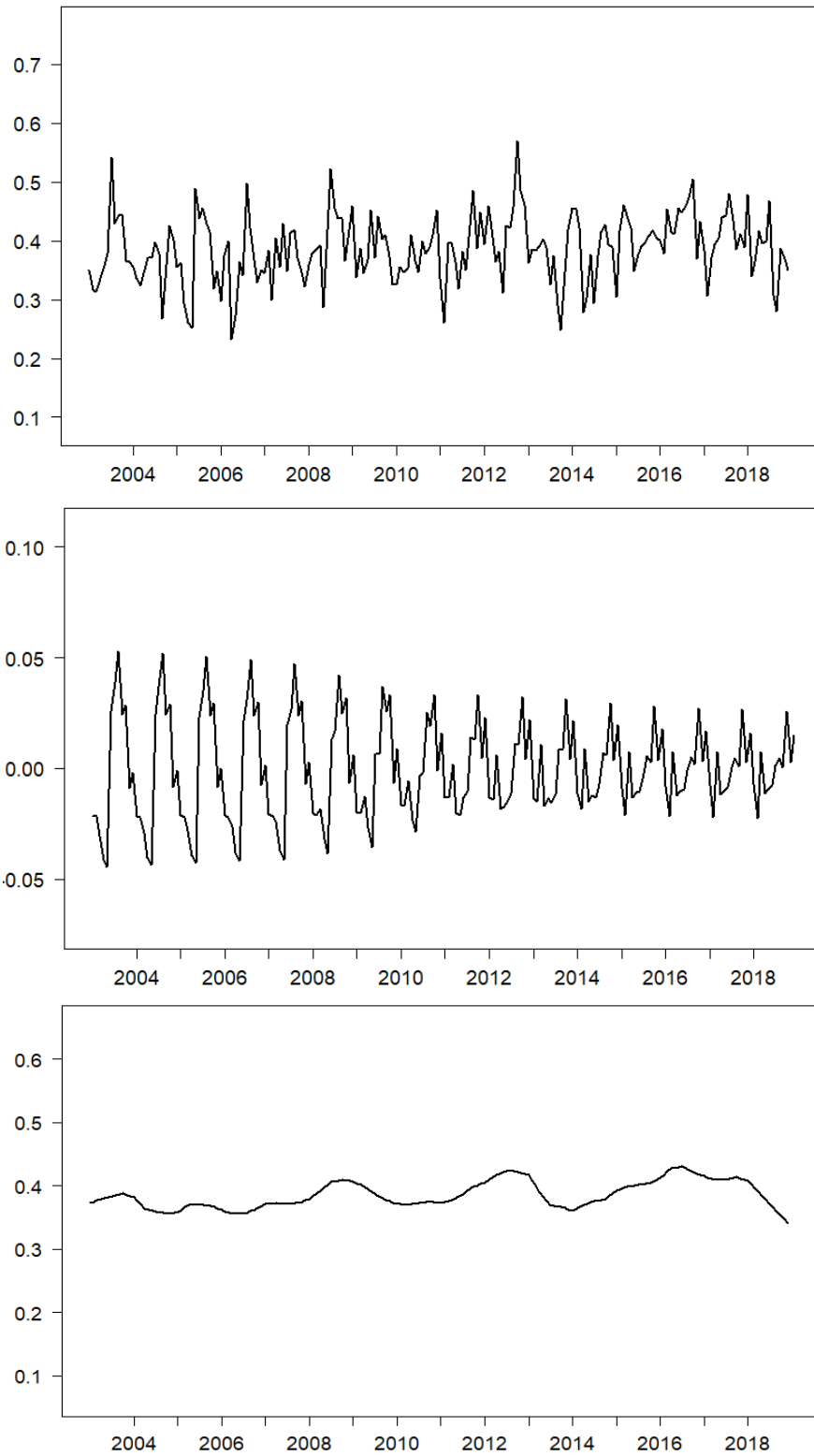




Figura 55: Arriba NVDI Humedal Mantagua, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



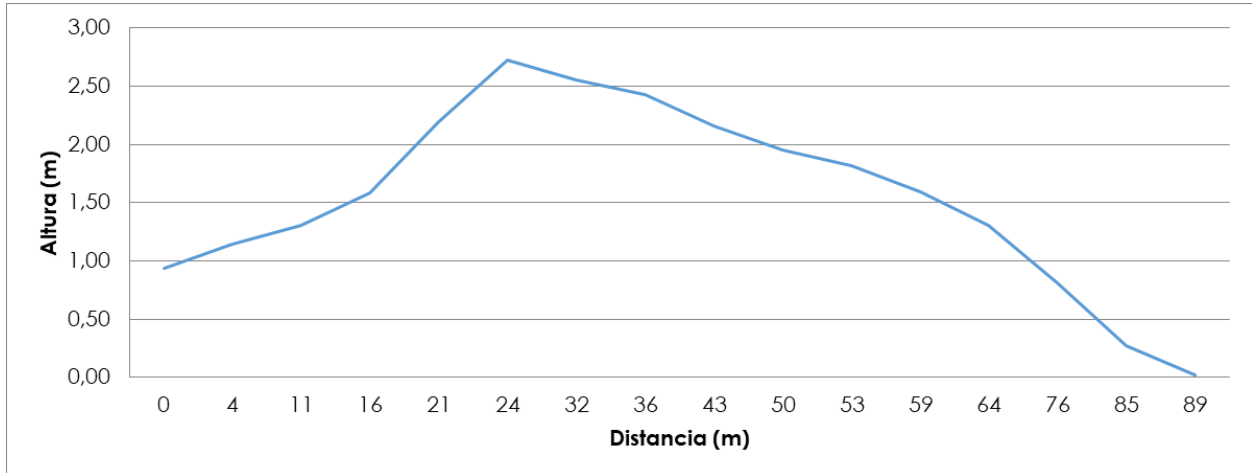
#### 4.6.8 San Alfonso

El humedal San Alfonso se encuentra localizado en comuna de Algarrobo (33,34°S; 71,65°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 10.860 m<sup>2</sup> (Figura 56). El perfil topográfico revela una duna de más de +2 m NRS (Figura 57), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura 56: Localización Humedal San Alfonso.



Figura 57: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal San Alfonso. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



En la Figura 58 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada (Figura 58).

Figura 58: Coberturas de suelo Humedal San Alfonso.

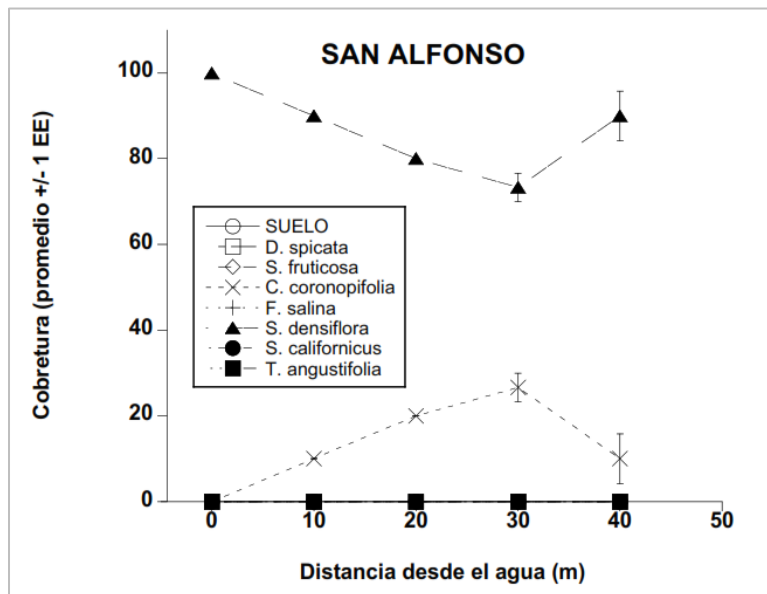
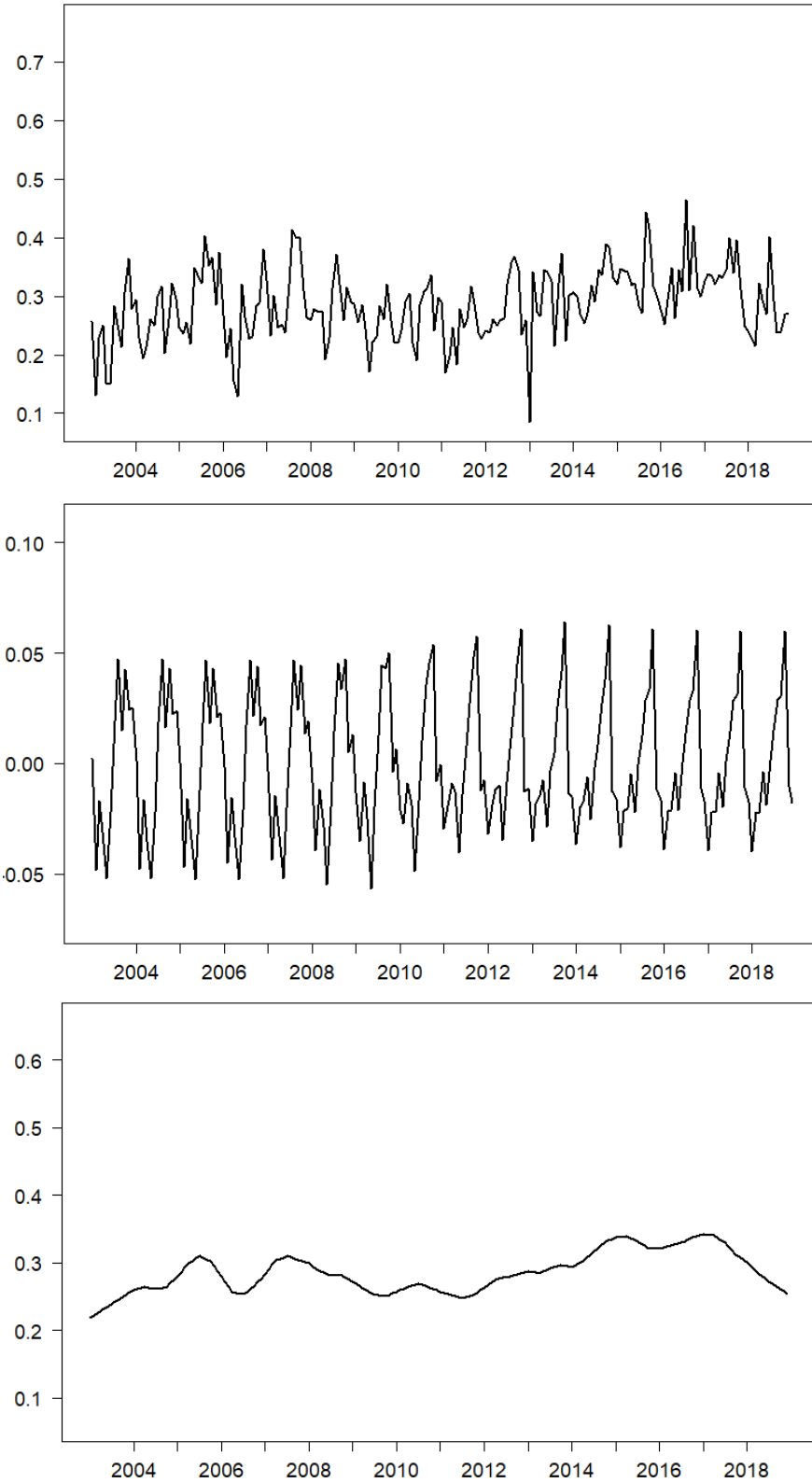


Figura 59: Arriba NVDI Humedal San Alfonso, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



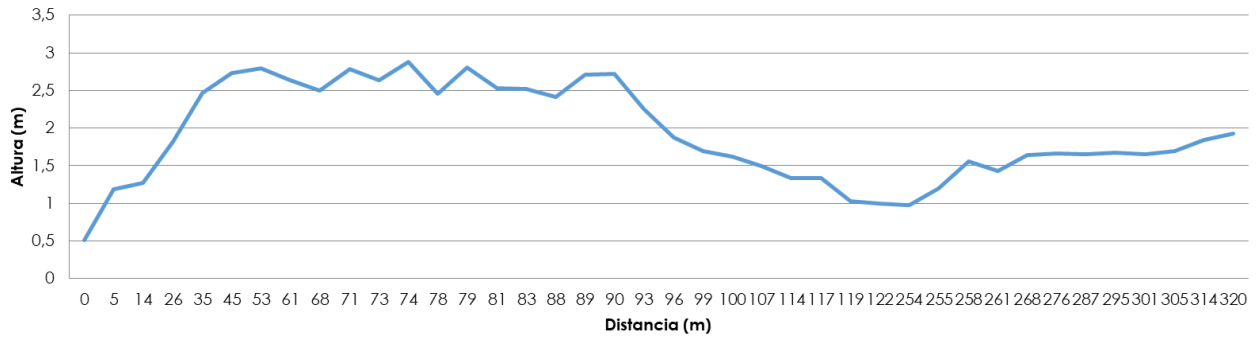
#### 4.6.9 El Yali

El humedal El Yali se encuentra localizado en comuna de Santo Domingo (33,77°S; 71,75°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 668.129 m<sup>2</sup> (Figura 60). El Yali es un complejo sistema de humedales costeros emplazado al sur del Río Maipo. El sistema lo componen más de 14 cuerpos de agua, de los cuales tres se encuentran protegidos y conformar el sitio Ramsar N°878. Se caracteriza porque estos humedales presentan importantes diferencias de régimen y composición de sus columnas de agua, lo que aumenta la riqueza y biodiversidad presente en el sitio. El perfil topográfico revela una duna de más de +3 m NRS (Figura 61), con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura 60; Localización Humedal El Yali.



Figura 61: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal El Yali. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



En la Figura 63 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada (Figura 62).

Figura 62: Coberturas de suelo Humedal El Yali

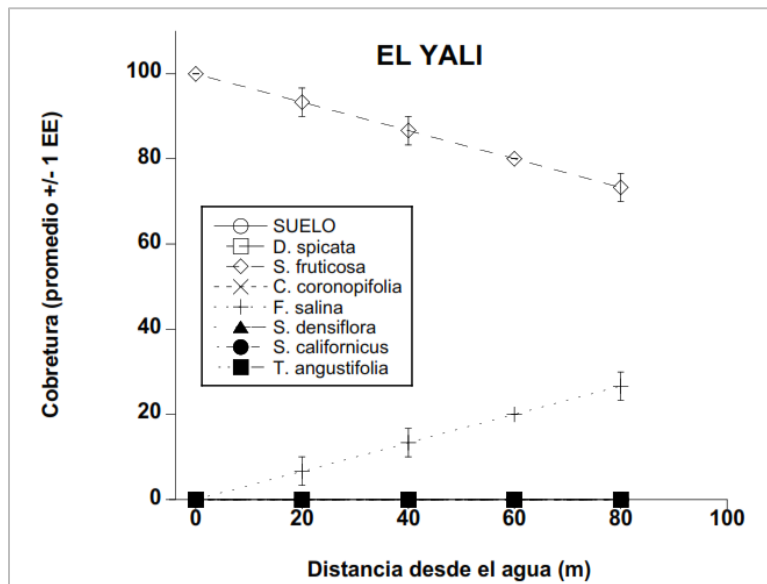
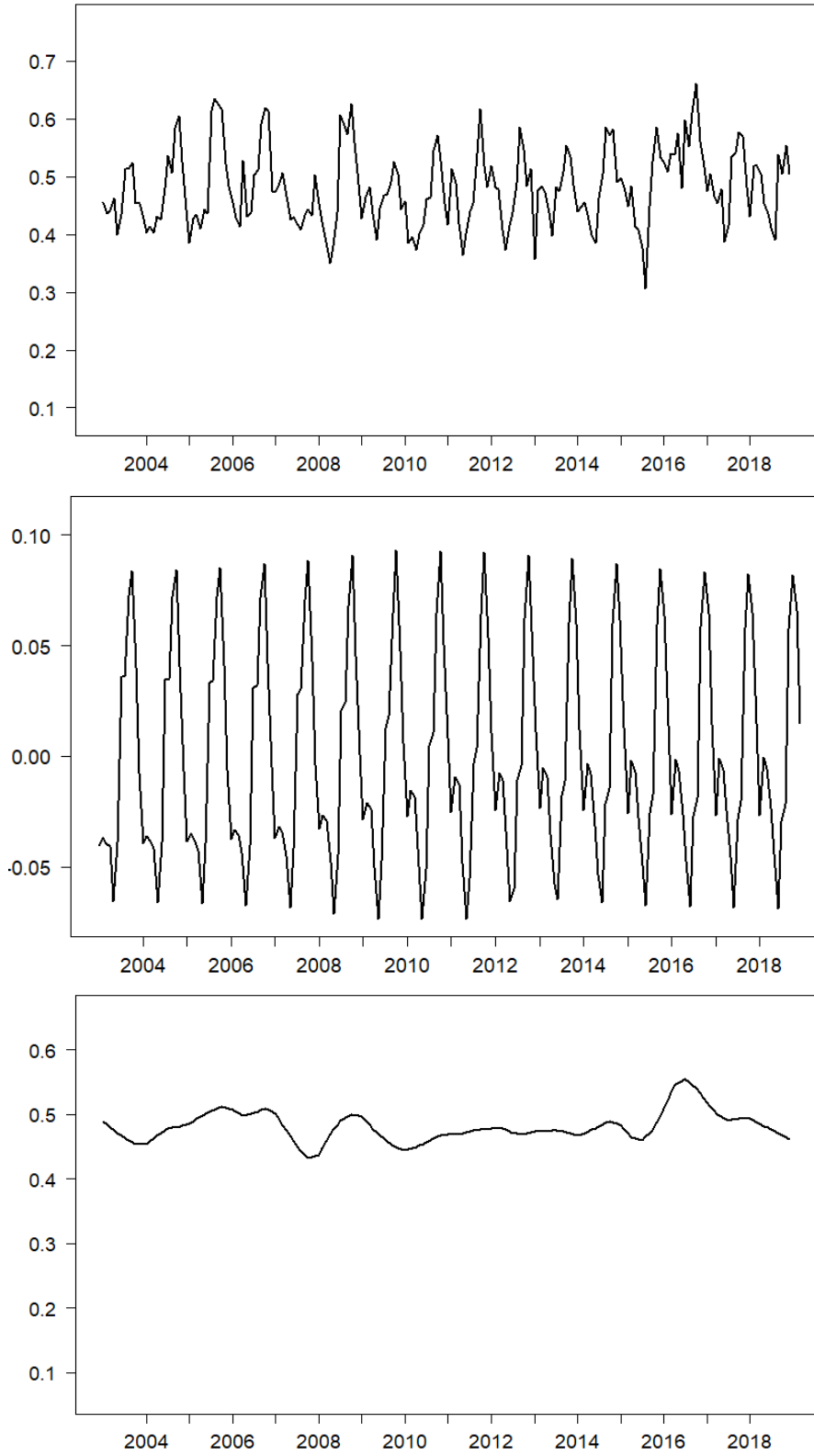


Figura 63: Arriba NVDI Humedal El Yali, centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.



#### 4.6.10 Pocillas

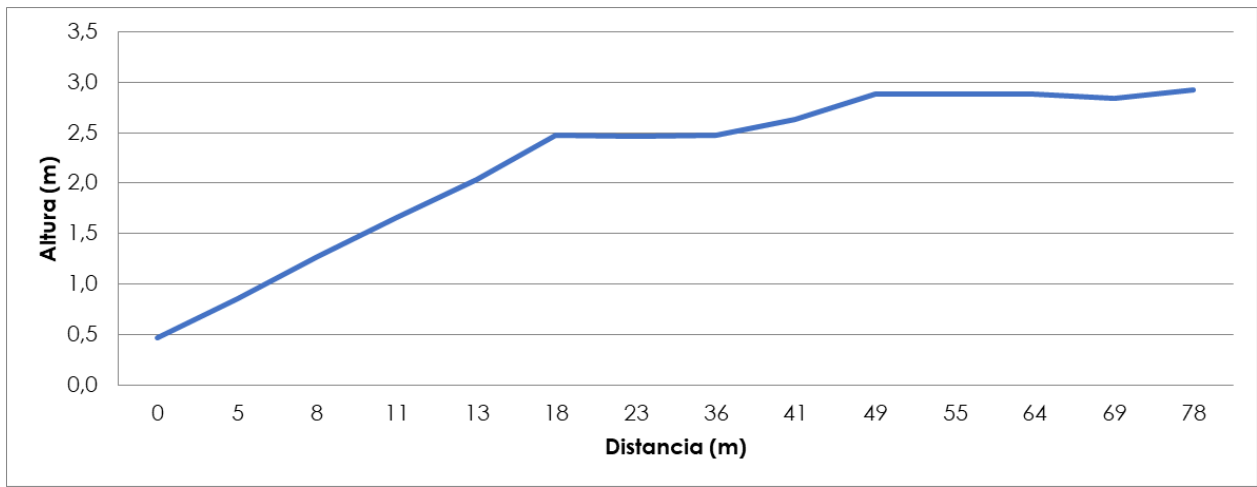
El humedal de Pocillas se encuentra localizado en comuna de Pelluhue (35,33°S; 72,40°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 64.961 m<sup>2</sup> (Figura 64). El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS (Figura 65), con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura 64; Localización Humedal Pocillas.





Figura 65: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Pocillas. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



En la Figura 66 se observa el NVDI, su estacionalidad y la tendencia estimada, para este humedal desde enero 2003 a 2019. Los valores altos indican la dominancia de vegetación alta. Se observa en este humedal una zonificación desarrollada (Figura 67).

Figura 66: Arriba NVDI Humedal Pocillas centro estacionalidad, abajo tendencia entre 2003 y 2019.

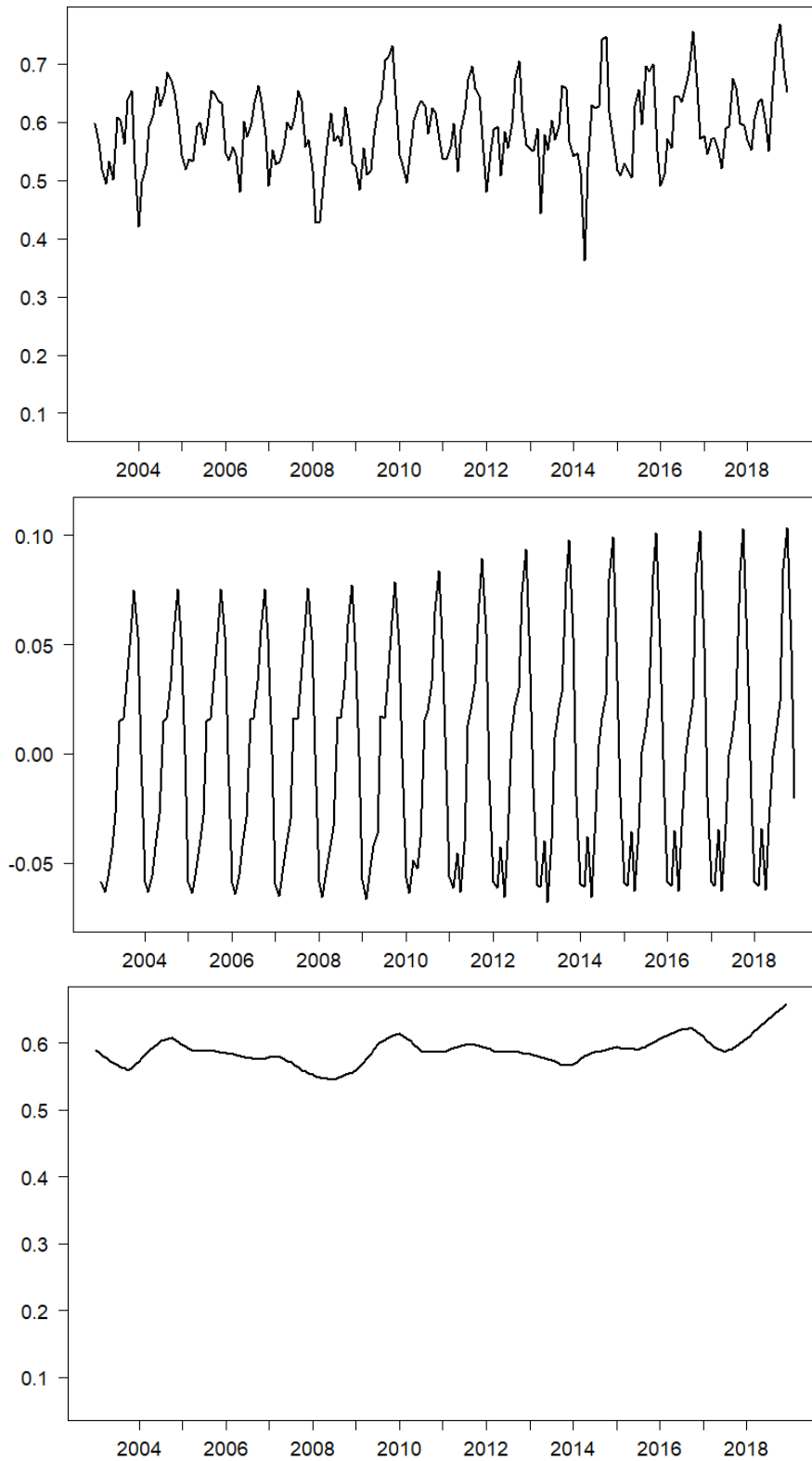
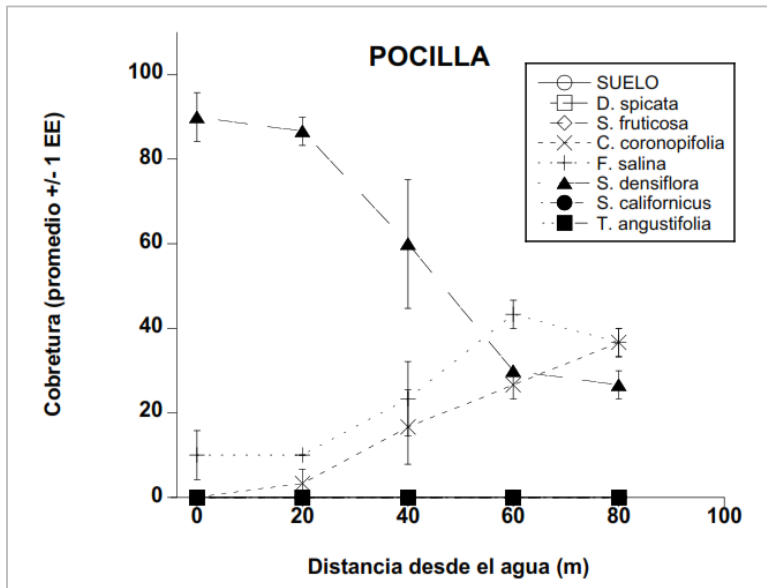


Figura 67: Coberturas de suelo Humedal Pocillas.



#### 4.6.11 Análisis de comunidades de plantas

Los valores de NDVI fluctúan entre 0 y 1. En el caso de los humedales estudiados los valores mayores de este índice (0.4 a 0.6) se observaron en los humedales dominados por especies de plantas altas tales como *Spartina densiflora* (e.g., Pocillas, Mantagua), mientras que los valores menores se observaron en los humedales dominados por especies bajas como *Salicornia fruticosa* (e.g. Salinas de Copiapó, Tongoy, Salinas grande). Una excepción a este patrón lo presentó el humedal de El Yali, el cual presentó un NDVI alto estando dominado por una especie de baja altura como *Frankenia salina*.

En general, si bien todos los humedales presentaron un patrón de estacionalidad con valores altos en los meses de primavera y bajos en otoño, los humedales dominados por *Sarcocornia fruticosa* (Tongoy, Salinas grande, y Cebada) mostraron una tendencia a la mantención del rango y patrón de variación estacional durante los años estudiados, mientras que los humedales dominados por *Spartina densiflora* (San Alfonso, Pocillas), *Typha angustifolia* (Punta Teatinos) e incluso *Frankenia salina* (El Yali), mostraron cambios en el patrón de variación estacional o una disminución paulatina en la estacionalidad desde el año 2004 al 2018 (e.g., Mantagua y Conchalí).

Un aspecto interesante del patrón de estacionalidad en el NDVI es que el humedal de Salinas de Copiapó tiene una estacionalidad inversa con el resto de los humedales estudiados, con los valores máximos al final del verano e inicios del otoño y los mínimos en la época de primavera. Por otra parte, con la excepción antes mencionada, todos los humedales presentaron máximos NDVI durante los años 2004 al 2018 en los mismos meses (meses de primavera), pero a partir del año 2010, los humedales de Mantagua y el Yali se desfasaron de esta tendencia, presentando los máximos en otoño y valores mínimos en verano. Estos cambios pueden estar relacionados con cambios en la composición de especies de estos humedales desde la ocurrencia del terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010.

Una vez extraída la estacionalidad de la serie de tiempo del NDVI de los humedales, se observa una tendencia variable interanual en estos sistemas. En dicha tendencia llaman la atención dos coincidencias. Por una parte, desde verano de 2007 (diciembre del 2006 a febrero del 2007) los humedales de Teatinos, Tongoy, Salinas grandes y el Yali presentaron una tendencia a la disminución del NDVI, la cual alcanzo su menor nivel coincidentemente en la primavera (octubre) de 2007. Posteriormente, se observó una coincidencia en una disminución mucho mayor a la de 2007 en los humedales de Salinas de Copiapó, Conchalí y nuevamente El Yali, los cuales inician un descenso en el NDVI durante la primavera de 2014 (agosto a noviembre) hasta el invierno de 2015 (julio), donde alcanzan el nivel más bajo registrado en esta tendencia.

El patrón de dominancia de las especies vegetales levantadas en los humedales costeros desde los 27°S a los 42°S, muestra una fuerte coincidencia con lo descrito por Fariña et al. (2018), en el sentido de que los humedales costeros de la zona norte de Chile están dominados en su parte baja por la especie *Sarcocornia fruticosa* y en la parte más alta por la especie *Distichlis spicata* mientras que más al sur, en la zona central del país la especie *Spartina densiflora* domina tanto la parte baja como la parte alta de los humedales costeros (Tabla 4).

Tabla 4: Especies de plantas dominantes en la zona baja (cerca del agua) y alta (en el límite superior del humedal y salinidad medida en los espejos de agua de los sitios donde se realizaron levantamientos vegetacionales.

| Sitio         | Baja                         | Alta  | Salinidad promedio (ppm) |
|---------------|------------------------------|---|--------------------------|
| Salinas       | <i>Sarcocornia fruticosa</i> | <i>Distichlis spicata</i>                                 | 50                       |
| Pta. Teatinos | <i>Typha angustifolia</i>    | <i>Sarcocornia fruticosa</i>                              | 3                        |
| Tongoy        | <i>Sarcocornia fruticosa</i> | <i>Distichlis spicata</i>                                 | 35                       |
| Salinas Gde.  | <i>Sarcocornia fruticosa</i> | <i>Typha angustifolia</i>                                 | 35                       |
| Cebada        | <i>Sarcocornia fruticosa</i> | <i>Distichlis spicata</i>                                 | 30                       |
| Conchali      | <i>Typha angustifolia</i>    | <i>Distichlis spicata</i>                                 | 4                        |
| Mantagua      | <i>Spartina densiflora</i>   | <i>Spartina densiflora</i><br><i>Cotula coronopifolia</i> | 8                        |
| San Alfonso   | <i>Spartina densiflora</i>   | <i>Spartina densiflora</i><br><i>Cotula coronopifolia</i> | 5                        |
| El Yali       | <i>Frankenia salina</i>      | <i>Frankenia salina</i>                                   | 35                       |
| Pocilla       | <i>Spartina densiflora</i>   | <i>Cotula coronopifolia</i>                               | 5                        |

En relación con el patrón general descrito por Fariña et al. (2018), en los levantamientos realizados durante este proyecto se observaron particularidades probablemente asociadas

- A la influencia de perturbaciones naturales provenientes de la cuenca: aluviones (Salinas de Copiapó),
- A la influencia de cambios en el régimen hidrológico de los humedales (Punta Teatinos),
- Al efecto del pastoreo ejercido por vacas y caballos o al pisoteo de turistas (San Alfonso y Pocilla) y
- Al efecto combinado de dichos factores, tsunamis y tormentas marinas (El Yali).

En el caso del humedal de Salinas de Copiapó el NDVI cayó drásticamente asociado al paso del aluvión del año 2015 el cual literalmente "sepulto" a la zona costera con al menos 1 [m] de sedimento. A partir del año 2016 es humedal presentó una rápida recuperación.

En el humedal de Punta Teatinos, la dominancia de *Thypha angustifolia* en la zona baja estaría relacionada con una disminución en la salinidad del humedal a valores menores que los registrados en la región norte de nuestro país (sobre 35 ppm). Esta podría ser consecuencia del ingreso de agua dulce desde la cuenca y/o a la apertura de la barra costera durante la época estival o la mantención de esta apertura de manera casi constante, evitando el proceso de evaporación en el espejo de agua que ocurre durante esta época y que incrementa la salinidad en la mayoría de los humedales costeros de la zona norte de nuestro país.

En los humedales San Alfonso y Pocilla, la alta incidencia de *Cotula coronopifolia* en la zona alta de los humedales puede ser consecuencia del consumo de vacas y caballos de *Spartina densiflora* y/o del efecto de vehículos y turistas que pisotean la parte alta del humedal.

En el humedal de El Yali, previo a la ocurrencia del terremoto y tsunami del 27 de febrero del 2010 este humedal estaba dominado por las especies *Sarcocornia fructicosa* en su parte baja, *Spartina densiflora* en la parte media y *Schoenoplectus californicus* en la parte alta (Fariña et al. 2016 y 2009). Luego del tsunami del 2010 y de otros eventos extremos que lo han afectado desde esa época, las tres especies dominantes desaparecieron paulatinamente y fueron reemplazadas por la especie *Frankenia salina*, la cual ha permanecido desde mediados del año 2016 en este humedal, probablemente asociada a la "salinización" del suelo y a la modificación de su hidrología con preponderancia de agua de mar con mayor salinidad que en el pasado, manteniendo en el presente una salinidad muy alta en relación con los humedales de la zona centro sur y semejante a la de los humedales del norte de nuestro país.

Un aspecto muy interesante es el hecho de que la presencia de algunas especies de plantas distintas a las reportadas para las zonas norte y centro es un claro indicador de cambios en la hidrología del humedal o de efectos antrópicos sobre este. Por ejemplo, la presencia de *Thypha angustifolia* en las zonas bajas de los humedales de Punta Teatinos y de Conchalí claramente está asociada a una disminución en la salinidad. La disminución de la salinidad en el humedal de Punta Teatinos estaría relacionada con la apertura prácticamente continua de la barra que evitaría la evaporación en este humedal y en el caso de Conchalí en que una gran barra lo mantiene separado del mar prácticamente se estaría eliminando la influencia marina en este humedal. Asimismo, la presencia de *Cotula coronopifolia* en los humedales de San Alfonso y Pocilla mostraría un claro efecto del pastoreo y/o el pisoteo por ganado o turistas en dichos humedales.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 SOBRE LOS RESULTADOS DE ESTE ESTUDIO

A partir de este estudio se obtuvieron los siguientes resultados:

- Gran parte de los humedales analizados (18/21) experimentaron una reducción en el área de sus espejos de agua en el período 1986 – 2017.
- Todos los humedales costeros en los cuales se contó con registros fluviométricos (6/6) han experimentado un descenso en los caudales de las cuencas que los abastecen.
- En toda la costa de Chile se ha experimentado (1980-2015) y se experimentará (2026-2045) un aumento en la frecuencia y en la intensidad de las marejadas. Aun cuando a nivel histórico no se ve una tendencia clara al aumento del nivel medio del mar (relativo al continente), en la proyección de esperan aumentos en el nivel del mar (absoluto). La cota de inundación, asimismo aumentarán en la proyección.
- Un 70% de los humedales catastrados presentan dunas o barras cuyas cotas son suficientemente bajas como para permitir una conexión con el mar. La conexión podría deberse al aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas.
- El efecto conjunto de los cuatro puntos anteriores redundan en cambios en la salinidad, que a su vez en alteraciones en las comunidades de plantas de los humedales costeros. Debido a la falta de disponibilidad y homogeneidad de información, no se pudo hacer un cruce robusto y cuantitativo de información entre el espejo de agua y la frecuencia e intensidad de las marejadas, el aumento del nivel del mar, la cota de inundación, y los caudales. Así como están, los cálculos independientes. Esto es probablemente lo más urgente de atender.
- De hecho, existe evidencia que algunos humedales ya han modificado sus patrones de zonación esperables, alteración que podría ser atribuible al cambio de régimen hídrico o al incremento de frecuencia de conexión con el mar.

Diversos estudios indican que el cambio climático reciente está afectando tanto a los ecosistemas terrestres y los humedales de una manera compleja (Zuleta & Contreras-López, 2019; Contreras-López et al., 2017). Los cambios inducidos por el clima en el volumen del agua impulsan los cambios en la salinidad de los humedales, lo que determina la composición de la comunidad de peces e invertebrados, que a su vez determina el uso de aves acuáticas y otras especies dependientes de los humedales. Como los cuerpos de agua se desplazan hacia humedales más salinos y los pocos sistemas de agua dulce están también amenazados por diversas causas, la mayoría de la biota de los humedales experimenta un aumento del estrés hídrico. Comprender los cambios ambientales globales en múltiples escalas espaciales y temporales es esencial para la planificación de la conservación de los humedales costeros de Chile central, y para evaluar el

estado de los humedales en las rutas migratorias hemisféricas (Webster et al., 2002; Runge et al., 2015).

En la actualidad, las presiones antrópicas y el cambio climático contemporáneo amenazan de forma creciente a los humedales costeros, generando múltiples impactos sin precedentes en estos cuerpos de agua (Kirwan & Megonigal, 2013). Esto explica el enorme número de humedales que se prevé desaparecerán durante el siglo XXI, tanto por el alza del nivel del mar (Nicholls, 2004) como por los cambios en la disponibilidad hídrica (Winter, 2000). Además, en el litoral de Chile central, las nuevas condiciones climáticas favorecerán la propagación de especies invasoras que pueden alterar la biodiversidad de los humedales, como es el caso de *Xenopus laevis* (Ihlow et al., 2016). La extracción de agua, tanto para uso consuntivo como no consuntivo, puede afectar los sistemas bióticos por disminución del caudal y/o la pérdida de la variabilidad hidrológica natural, que ocasionaría la reducción del hábitat disponible para la biota (Litte et al., 2016). Esto podría acentuar los procesos de fragmentación, aumentando la pérdida de biodiversidad a diferentes niveles.

Adicionalmente, los períodos de crecidas de caudales permiten el lavado de la cuenca. Cuando se altera esta variabilidad hidrológica natural de forma significativa, se pueden llegar a suprimir estos pulsos de lavado y la estructura del sistema se puede volver más autotrófica, por el predominio de la producción primaria y acumulación de nutrientes (Litte et al., 2016).

## 5.2 CONSERVACIÓN DE LOS HUMEDALES COSTEROS

### 5.2.1 Generalidades

La conservación y restauración de humedales costeros se ha reconocido como una forma eficiente de mitigación y adaptación frente al cambio climático (Erwin, 2009), incluyendo el litoral de Chile central (Contreras-López et al. 2017a). En general, los humedales costeros son grandes sumideros de carbono (Rogers et al., 2019), particularmente aquellos situados en zonas áridas (Williams, 1999; Hernández, 2009), por lo que contribuyen a controlar los gases de efecto invernadero cuando son funcionales. Incluso las charcas y otros pequeños humedales contribuyen a este proceso (Gilbert et al., 2017). Su deterioro constituye una severa amenaza de incrementar las huellas de carbono en aquellos países que no los protegen (Rogers et al., 2019). Por otra parte, los humedales costeros pueden constituir un buen mecanismo para mitigar las inundaciones asociadas al incremento de las marejadas debido cambio climático en las costas de Chile central, e incluso servir de mecanismos de disipación de energía para el sobrepaso del mar e inundaciones por tsunami, como en la localidad de Lolleo en el año 2010 (Contreras et al., 2012) y Coquimbo en el año 2015 (Contreras López et al., 2016).

Algunos autores han argumentado que las regiones de alto endemismo y riqueza de especies deberían recibir prioridad en la conservación (Myers, 1990; Kerr, 1997; Myers et al. 2000). La selección de áreas apropiadas para la conservación y manejo no es fácil pues requiere considerar numerosos factores biológicos y políticos para su implementación (Kremen & Merenlender, 2018; Schwartz et al., 2018; Wilson et al., 2018). Además, debido a la alta



variabilidad espacio-temporal de los sistemas naturales, los esfuerzos para conservar los ecosistemas acuáticos de Chile central deben dirigirse a mantener el régimen de flujo natural. Es necesario determinar con mayor rigor los impactos de los desvíos de agua de los principales ríos, así como los efectos del aumento de la salinidad en la estructura y función de los humedales costeros.

### **5.2.2 Iniciativas a nivel internacional**

Existen varias iniciativas de conservación de humedales a nivel internacional, entre las que destacan:

- La convención Ramsar, relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. Esta convención se elaboró en 1971 como medio de llamar la atención internacional sobre el ritmo con que los hábitats de humedales estaban desapareciendo (Ramsar 1987).
- A partir de la reunión COP15 del año 2009 en Copenhague La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CCC) ha pedido a la Secretaría Ramsar elaborar guías para el desarrollo de programas de mitigación y adaptación, donde se reconozca el rol crítico de los humedales en relación al abastecimiento de agua y seguridad alimentaria, como también para la salud humana (Allison et al., 2009). Un año antes, durante la convención sobre humedales, se discutió sobre la importancia de los ecosistemas de humedales, su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que prestan para mitigar y colaborar en la adaptación al cambio climático (CONAF, 2010).

### **5.2.3 Iniciativas a nivel nacional**

Las áreas protegidas en esta zona de Chile son escasas y solo representan el 0,3% de las áreas protegidas del país (MMA, 2016). La zona de Chile central tiene un alto crecimiento demográfico y está siendo fuertemente explotada por la agricultura y la minería. Estas actividades implican un alto nivel de inversión económica pero la biodiversidad y otros servicios ecosistémicos de los humedales no se encuentran incorporados dentro de sus políticas de desarrollo, tanto en sus fases de construcción como de operación, los que, junto con el rápido grado de contaminación de los cursos de agua, implican que muchas especies pasarán de ser desconocidas a extinguirse. Así, es urgente que el Estado de Chile implemente políticas centradas en la protección y conservación de la biodiversidad de agua dulce. Algunas iniciativas de conservación se están tomando para la protección de los humedales costeros urbanos en los últimos años, junto con la delineación de zonas prioritarias para su conservación y la creación de nuevos sitios Ramsar, como Las Salinas de Huentelauquén y los humedales de la Bahía de Tongoy. Estas zonas con figuras de protección legal se vuelven de suma importancia para la conservación de la biodiversidad asociada a este tipo de ecosistemas, en especial para la avifauna migratoria que está particularmente condicionada a la disponibilidad de los cuerpos de agua dulce.

La primera designación de un humedal como sitio de importancia internacional para la conservación de las aves, ocurrió en el año 1974 con la designación de la península de Cobourg

(Australia). Esta iniciativa se replicó en Chile siete años después (1981) con la designación del primer sitio Ramsar del país, el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter, localizado en la Región de Los Ríos (Carrasco-Lagos et al., 2015). Chile aprobó la Convención Ramsar como Ley de la República en 1980, promulgándose en 1981 a través del Decreto Supremo N°771. Entre las primeras iniciativas para proteger a estos ecosistemas figura la denominada Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Racional de los Humedales en Chile (Acuerdo N°287/2005), impulsada por CONAMA (2005), que tuvo por objetivo “promover la conservación de los humedales prioritarios de Chile, de sus funciones y beneficios en un marco de desarrollo sustentable”. Luego, este trabajo se tradujo en la Estrategia Nacional de Biodiversidad, aprobada mediante D.S. 14/2018. Una de las particularidades de esta estrategia, fue la incorporación de los humedales dentro de las áreas protegidas para efectos del SEIA (Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental).

A nivel nacional, existen 14 humedales de importancia internacional que cubren una superficie de 3.617 km<sup>2</sup> (Carrasco-Lagos et al., 2015). Ellos son, comenzando desde el más septentrional al más meridional:

- Salar de Surire
- Salar del Huasco
- Salar de Tara
- Salar de Pujsa
- Sistema hidrológico de Soncor
- Salar de Aguas Calientes IV
- Complejo lacustre Laguna del Negro Francisco y Laguna Santa Rosa, Bahía de Tongoy
- Las Salinas de Huentelauquén<sup>17</sup>
- Santuario de la Naturaleza Laguna Conchalí<sup>18</sup>
- Reserva Nacional Humedal El Yali
- Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter
- Bahía Lomas.

Del total de sitios Ramsar, solo un 22% (alrededor de 80.201 hectáreas) está incluido en algunas de las categorías de áreas protegidas reconocidas en la legislación nacional, principalmente como parques y reserva nacional (MMA, 2018). La mayoría de estos sitios Ramsar son andinos (8) y solo 6 son costeros. También, la mayoría forma parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), con la excepción de aquellos de la Región de Coquimbo y de Bahía Lomas, que son de administración privada. Estos cuerpos de agua aparte de sostener una alta biodiversidad y endemismos pueden servir como sistemas para investigar:

- El papel ecológico de los humedales aislados en zonas áridas,

---

<sup>17</sup> Además cuenta con la denominación de zona libre de caza desde 2010 y es administrada por la Comunidad Agrícola de Huentelauquén.

<sup>18</sup> Administrado por la Minera Los Pelambres Parque Andino Juncal.

- Las respuestas evolutivas y de adaptación a la fragmentación del hábitat,
- La importancia de los aportes de agua subterránea a ecosistemas acuáticos aislados, y
- Las respuestas ecológicas al cambio climático de los humedales.

En Chile, se cuenta con una Estrategia Nacional de Humedales a partir del 2005, que da inicio al Plan de Acción Nacional de Humedales en el 2006. Sin embargo, este plan ha tenido un especial enfoque a los humedales altoandinos (CONAF, 2010), prestando escasa atención a los humedales costeros. Aunque el plan se actualiza mediante la Estrategia Nacional de Biodiversidad, sólo recientemente, el Ministerio del Medio Ambiente se encuentra elaborando un Plan de Acción para la Conservación de Humedales y publicó el Plan Nacional de Protección de Humedales 2018-2022 (MMA 2018), el cual busca:

- proteger la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en áreas prioritarias de humedales,
- identificar y consensuar las áreas prioritarias de humedales a proteger por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNASPE), y
- gestionar las solicitudes de creación de áreas protegidas para estos ecosistemas. En una primera etapa, este plan priorizó 40 humedales a lo largo del país.

Los criterios que se utilizaron para priorizarlos fueron:

- que aportaran a la representatividad de ecosistemas con baja protección a nivel nacional,
- que se superpusieran de manera total o parcial con sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad,
- que constituyeran hábitat para especies de flora y/o fauna clasificadas en categoría de amenaza, para especies endémicas o migratorias,
- que tuvieran factibilidad de protección, es decir, que contaran con posibilidades objetivas para asociarlas a una categoría de protección legal.

Cabe destacar que los humedales de Chile central se encuentran emplazados en el hot-spot de biodiversidad de Chile central (Arroyo et al., 2008), que se ha reconocido como el más vulnerable frente al cambio climático para el año 2050. Además, esta nueva estrategia omite, por falta de conocimiento acumulado, las relaciones entre las especies locales y migratorias, las magnitudes de su interacción y abundancia, las relaciones entre los ecosistemas acuáticos y terrestres, entre otros aspectos importantes para la mantención de la integridad ecológica de los humedales.

### **5.3 CONSERVACIÓN DE AVES MIGRATORIAS**

El cambio de uso de la tierra es una amenaza clave para la conservación de la biodiversidad y los servicios que prestan a nivel mundial (Maxwell et al., 2016; Bauer & Hoyer, 2014; Semmens et al., 2011). Las especies migratorias son particularmente vulnerables a dichos cambios, dadas las

vastas áreas geográficas que ocupan durante su ciclo anual (Wilcove & Wikelski, 2008; Runge et al., 2014). De hecho, una evaluación global indicó que las áreas protegidas conservan solo el 9% de las especies de aves migratorias (Runge et al., 2014). Así, las estrategias para identificar y conservar los hábitats críticos para la persistencia de las especies migratorias son vitales.

Desafortunadamente, los vacíos en el conocimiento de la abundancia, distribución y demografía de la mayoría de las especies migratorias (Zuckerber et al., 2016), han obstaculizado la planificación estratégica y han generado incertidumbre sobre los esfuerzos de conservación (Runge et al., 2016). Dado que las poblaciones de muchas especies migratorias continúan disminuyendo (Wilcove & Wikelski, 2008; Harris et al., 2009), existe una necesidad urgente de identificar zonas o hábitats críticos para la conservación de las especies objetivo y susceptibles de gestión. La protección de hábitats relativamente intactos, como lo estimado por un bajo índice de huella humana (Venter et al., 2016), son escasos y económicamente caros en todas partes. Mientras que el enfoque de “uso compartido” entre especies migratorias y el hombre, permitiría la inclusión de paisajes domesticados para la conservación (Phalan et al., 2011; Kremen & Merenlender, 2018). Otras aproximaciones, denominadas hábitats permisivos para uso compartido, son análogas, pero más generales que los escenarios de conservación de hábitat intactos y de compartir la tierra (Phalan et al., 2011). Explorar tales aproximaciones es un paso clave en la planificación de la conservación en Chile, dado que la historia reciente indica que los valores biológicos y el bienestar humano pueden afectar el éxito de la conservación y representar puntos críticos en las decisiones sobre las estrategias más eficaces a implementar (Barrett & Arcese, 1995; Schwartz et al., 2018). Si el objetivo es conservar al menos el 17% de los ecosistemas terrestres y su biodiversidad, según lo mandado por el Convenio sobre Biodiversidad y los objetivos del 50% sugeridos por el análisis comparativo (Noss et al., 2012), Chile (Petit et al., 2018) y varios otros países están muy lejos de alcanzar dichas metas (e.g. MacKinnon et al., 2015; Amenguala & Alvarez-Berastegui, 2018).

La zona costera comprendida entre el Pacífico del Norte, Centro y Sudamérica se encuentra dentro de la Estrategia de Conservación de Aves Migratorias (Senner et al., 2017) e incorpora sitios de importancia para la conservación del ciclo de vida completo de aves que necesitan estos amplios territorios. Comienza al norte con la Región Ártica-Subártica (70°N) donde los hábitats para la reproducción de estas aves consideran la tundra, zonas alpinas de arbustos enanos y los humedales de taiga en Alaska, EE.UU y Noroeste de Canadá, la Región Templada del Norte, la Región Neotropical y la Región Templada del Sur (55°S) que abarca desde Perú hasta Tierra del Fuego en Chile (Senner et al., 2017).

Dentro de esta ruta migratoria, existen al menos 170 sitios protegidos, donde 12 son de importancia hemisférica<sup>19</sup> y 28 de importancia internacional<sup>20</sup>. Dentro de este territorio, 61 sitios han sido designados como Áreas Importantes para la Conservación de las Aves y la Biodiversidad (IBA), donde Las Salinas de Huentelauquén es el único sitio de la región con esta denominación (BirdLife International, 2019) que se encuentra además amenazada.

---

<sup>19</sup> Al menos 500.000 aves ocurren allí anualmente, o el 30% de la población biogeográfica.

<sup>20</sup> ~100.000 aves o el 1% de la población biogeográfica.

Dentro de la Región Templada del Sur, un análisis de amenazas realizado durante los talleres de la Estrategia de Conservación de Aves Migratorias, detectó que los proyectos turísticos, actividades recreativas y el cambio climático son las amenazas más importantes para las aves que hacen uso de estos 170 sitios, donde 33 IBA se encuentran dentro del territorio nacional. Se necesita mayor densidad de humedales costeros protegidos, si queremos conservar una muestra representativa de la biodiversidad de aves y otras especies nativas de estos ecosistemas. Además, debido a la disposición lineal de estos humedales a lo largo de la costa, todos estos ecosistemas son importantes para mantener la conectividad de las especies con capacidades de movimiento restringidas (Marquet et al., 2012).

Los humedales costeros son ecosistemas importantes para la fauna residente y migratoria, que proveen un amplio suministro de alimentos y refugio que sostiene la vida silvestre de esta zona. Esta fuente de alimentos es fundamental para las aves acuáticas y aquellas que migran a través de la costa (Martin et al., 2007), así como para las especies que anidan en ellos.

## 6 REFERENCIAS

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P. Y Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. Y Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, N° 116, p 16–32.

Barnett TP, Adam JC & Lettenmaier DP (2016). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438: 303–309

Box JB, Duguid A, Read RE, Kimber RG, Knapton A, Davis J & Bowland AE (2008). Central Australian waterbodies: The importance of permanence in a desert landscape. *Journal of Arid Environments* 72: 1395– 1413.

Bradley TJ & Yanega GM (2018). Salton Sea: Ecosystem in transition. *Science* 359: 754

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change Supplementary Material. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)].

Carvacho B. & Sánchez M. (2010): Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. 728-737. ISBN 978-84-472-1294-1

Contreras-López M, P Winckler, I Sepúlveda, A Andaur-Álvarez, F Cortés-Molina, CJ Guerrero, CE Mizobe, F Igualt, W Breuer, JF Beyá, H Vergara y R Figueroa-Sterquel (2016). Field Survey of the 2015 Chile Tsunami with emphasis on Coastal Wetland and Conservation Areas. *Pure and Applied Geophysics*, 173(2): 349-367, DOI: 10.1007/s00024-015-1235-2.

Contreras-López M, Figueroa-Sterquel R, Salcedo-Castro J, Vergara-Cortés H, Zuleta C, Bravo V, Piñones C, Cortés-Molina F (2017) "Vulnerabilidad de humedales y dunas litorales en Chile central" En Botello A, Villanueva S, Gutiérrez J y Rojas JL (eds.) *Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático*, Editorial Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) - Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) - Universidad Autónoma de Campeche (UAC), 227-246.

Contreras-López M & Zuleta C (2019). Vulnerabilidades de los humedales costeros de Coquimbo. En Zuleta C. & Contreras-López M. (eds.) *Humedales Costeros de la Región de Coquimbo: Biodiversidad, Vulnerabilidades & Conservación*. Ediciones Universidad de La Serena-Ministerio del Medio Ambiente, La Serena, Chile, 189 – 227 (en prensa).

DGA, 2017. Actualización Balance Hídrico. Informe Final. S.I.T. 417 Desarrollado para la Dirección General de Aguas, MOP, por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile

DGA, 2014. Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional. Informe Final. S.D.T. 356 Desarrollado para la Dirección General de Aguas, MOP, por Centro de Información de Recursos Naturales, CIREN. Santiago, Chile

Fariña JM & Camaño A. (eds) (2012). *Humedales Costeros de Chile. Aportes Científicos a su Gestión Sustentable*. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

- Fariña, J. M., He, Q., Silliman, B. R., & Bertness, M. D. (2016). Bottom-up and top-down human impacts interact to affect a protected coastal Chilean marsh. *Ecology*, 97(3), 640-648. Farina, JM, He, Q, B.R. Silliman and M.D. Bertness (2018) Biogeography of salt marsh plant zonation on the Pacific coast of South America. *Journal of Biogeography* 45: 238-247
- Farina, J.M\*,Q. He, B.R. Silliman and M.D. Bertness (2018) Biogeography of salt marsh plant zonation on the Pacific coasta of South America. *Journal of Biogeography*. 45:238-247. DOI: 10.1111/jbi.13109
- Farina, J.M\*,Q. He, B.R. Silliman and M.D. Bertness (2016) Bottom-up and top-down human impacts interact to affect a protected coastal Chilean Marsh. *Ecology* 97: 640-648.
- Fariña, J.M\*, B.R. Silliman and M.D. Bertness (2009) Can conservation biologists rely on established community structure rules to manage novel systems?...Not in salt marshes. *Ecological Applications* 19: 413-422
- Ewanchuk, P. J., & Bertness, M. D. (2004). The role of waterlogging in maintaining forb pannes in northern New England salt marshes. *Ecology*, 85(6), 1568-1574.
- Gilbert, M., González-Piqueras J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*. 8, 35-45.
- Iknayan KJ & Beissinger SR (2018). Collapse of a desert bird community over the past century driven by climate change. *PNAS* 115: 8597–8602.
- Koenig WD (2002). Global patterns of environmental synchrony and the Moran effect. *Ecography* 25: 283–288.
- Marquet PA, Abades S & Barría I (2012). Distribución y Conservación de Humedales Costeros: Una Perspectiva Geográfica. En: *Humedales Costeros de Chile*. Fariña JM & Camaño A (eds). Ediciones Universidad Católica de Chile. pp. 2-19.
- Martínez C, Contreras-López M, Winckler P, Hidalgo H, Godoy E & Agredano R (2018) Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141 – 155, 2018.. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.011
- Möller, P. 2018. Análisis espacio-temporal de los cambios producidos por el terremoto del 2010 en dos humedales costeros de la provincia de Arauco. Tesis de magister no publicada, Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Moore JA (2016). Recent desiccation of Western Great Basin Saline Lakes: lessons from Lake Abert, Oregon, USA. *Sciences of Total Environments* 554: 142–154
- Muñoz P. (2015) Índices de Vegetación, Geógrafo, CIREN, 2015 (disponible en: <http://agroclimatico.minagri.gob.cl/wp-content/uploads/sites/26/2015/05/Indices-de-vegetaci%C3%B3n-Pedro-Mu%C3%B1oz.pdf>)
- Sada DW, Fleishman E & Murphy DD (2005). Associations among spring-dependent aquatic assemblages and environmental and land use gradients in a Mojave Desert mountain range. *Diversity and Distributions* 11: 91–99.
- Sen, P (1968). Estimated of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Stat Assoc* 39:1379-1389
- Senner NR et al. (2018). A salt lake under stress: the relationship between birds, water levels, and invertebrates at a Great Basin saline lake. *Biological Conservation* 220: 320–329.
- Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie de Docencia N°49.
- Steen VA, Skagen SK & Melcher CP (2016). Implications of climate change for wetlanddependent birds in the Prairie Pothole Region. *Wetlands* 36: 445–459.
- Theil, H. (1950), "A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III", *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.*, 53: 386–392, 521–525, 1397–1412.

Winckler P, Contreras-López M, Castilla JC (2019) Impactos y Adaptación en Océanos y Zonas Costeras. En Vicuña S & Castilla JC (eds.) Cambio Climático en Chile: Ciencia y desafíos en mitigación y adaptación, Ediciones UC, Santiago, 397 – 430.

White M., Nemani R. (2006) Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. *Remote Sens. Environ*, 104, 43–49.



## **7 ANEXOS**

### **7.1 HUMEDALES SIN INFORMACIÓN DE CUBIERTA VEGETATIVA**

### 7.1.1 Salinas de Copiapó (Norte)

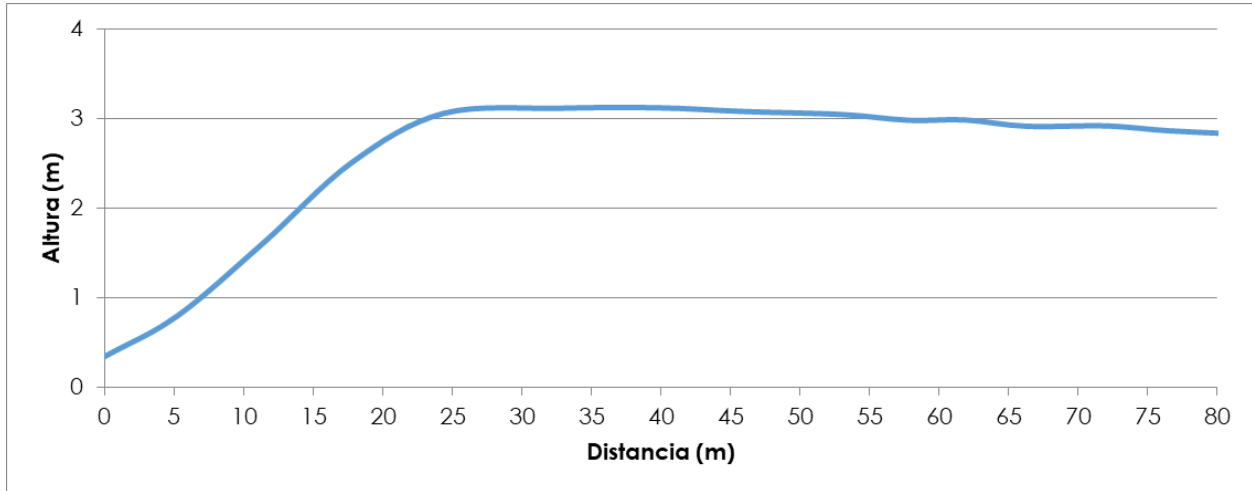
El humedal Salinas de Copiapó (norte) se encuentra localizado en comuna de Caldera (27,29°S; 70,93°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 8.111 [m<sup>2</sup>].

Figura A1.1: Localización Humedal Salinas de Copiapó (Norte).



El perfil topográfico revela la inexistencia de una Anteduna protectora del humedal, sin embargo, el cuerpo de agua se encuentra a más de +3 m NRS (Figura A1.2) con amplitudes de marea inferiores a 1,6 [m].

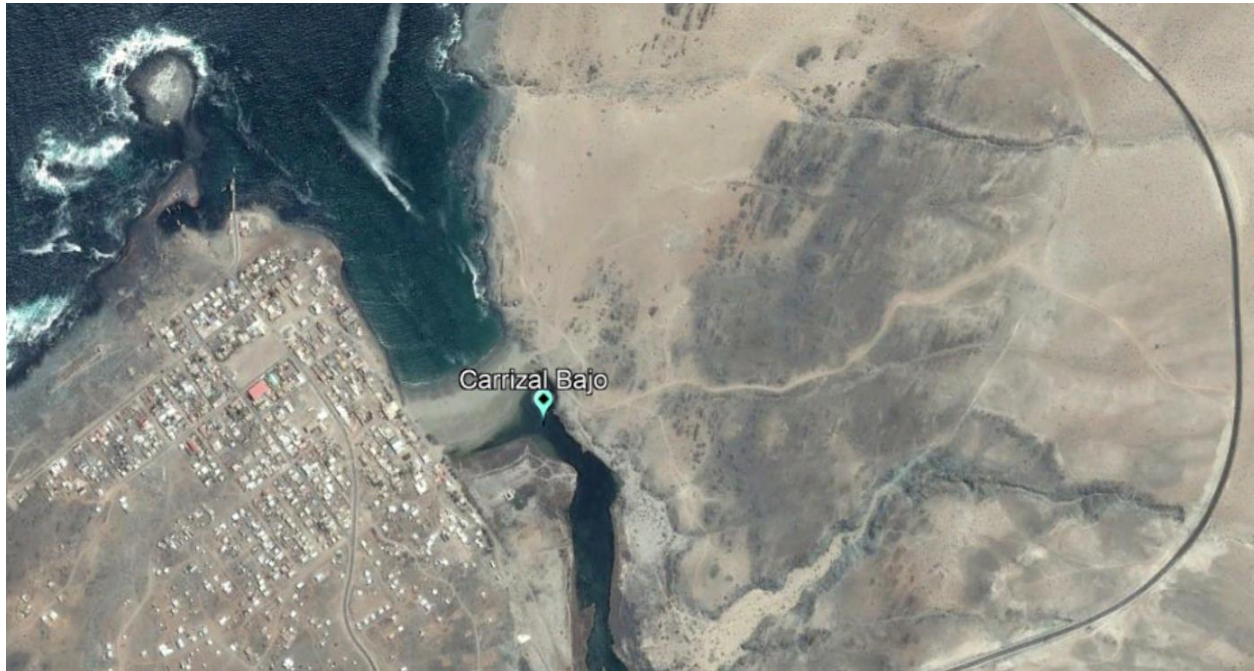
**Figura A1.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Salinas de Copiapó (norte). Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**



### 7.1.2 Carrizal Bajo

El humedal Carrizal Bajo se encuentra localizado en comuna de Huasco (28,08°S; 71,14°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 48.114 [m<sup>2</sup>]. Este cuerpo de agua sustenta varias especies de aves acuáticas y migratorias. Actualmente se encuentra en proceso de declararlo Santuario de la Naturaleza como figura de protección.

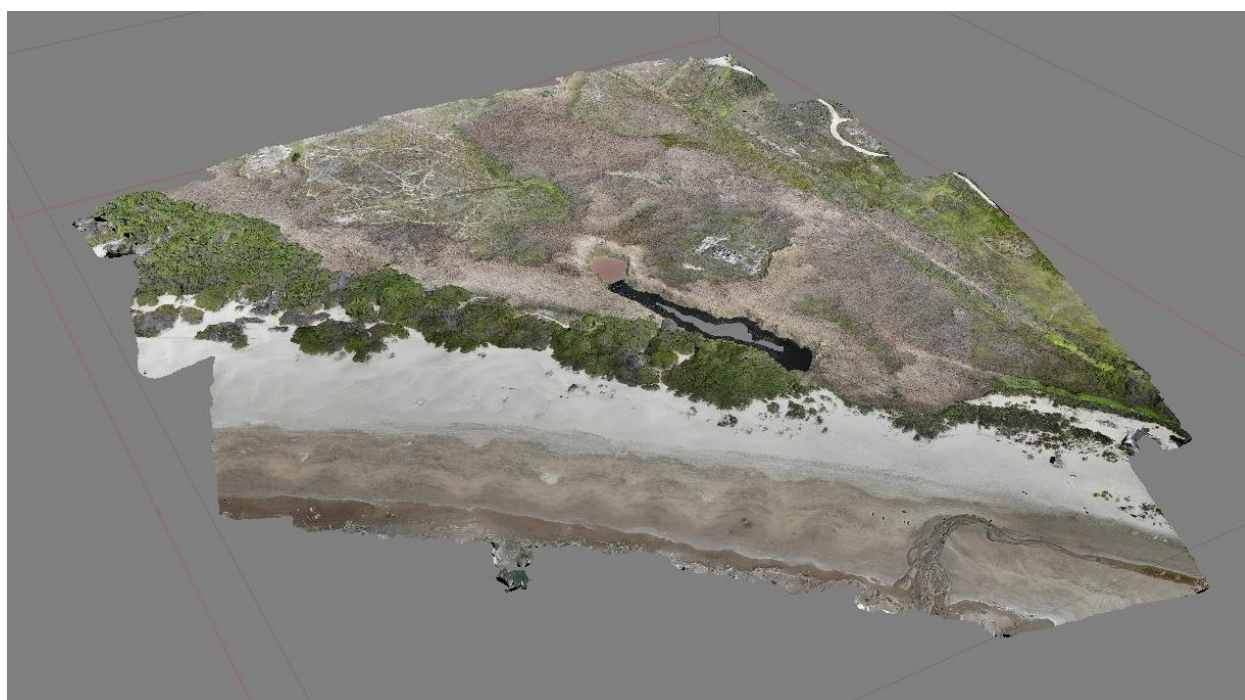
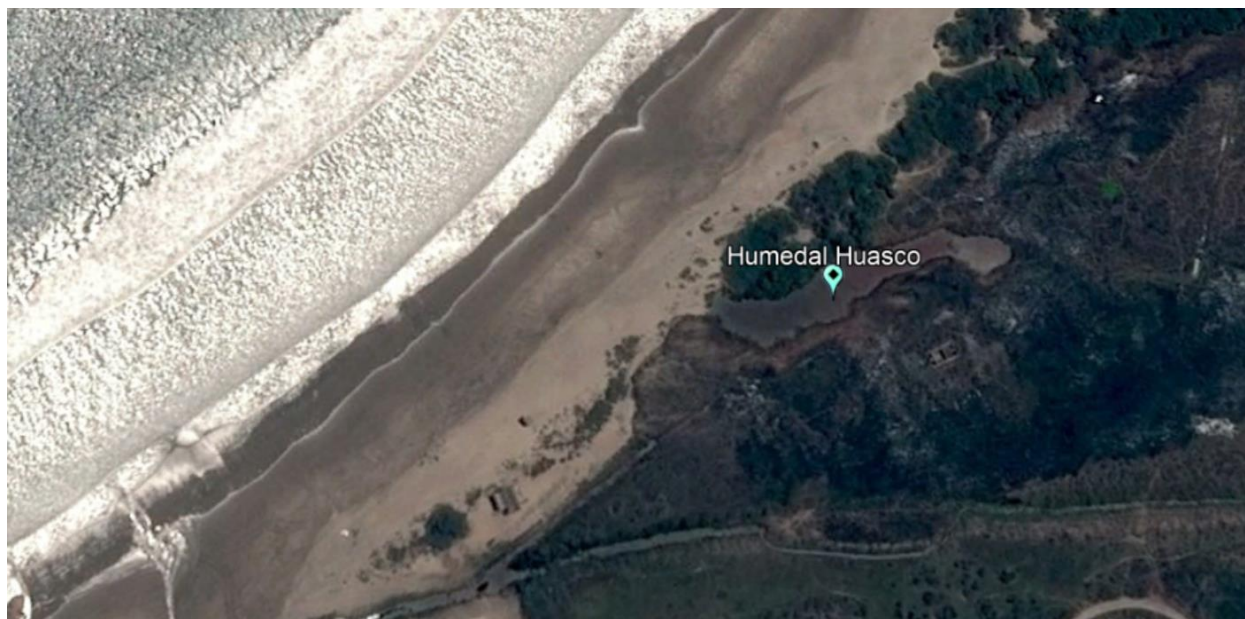
Figura A2.1: Localización Humedal Carrizal Bajo.



### 7.1.3 Huasco

El humedal de Huasco se encuentra localizado en comuna de Huasco (28,46°S; 71,21°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 1.141 [m<sup>2</sup>]. En él se encuentran más de 100 especies de aves migratorias y residentes.

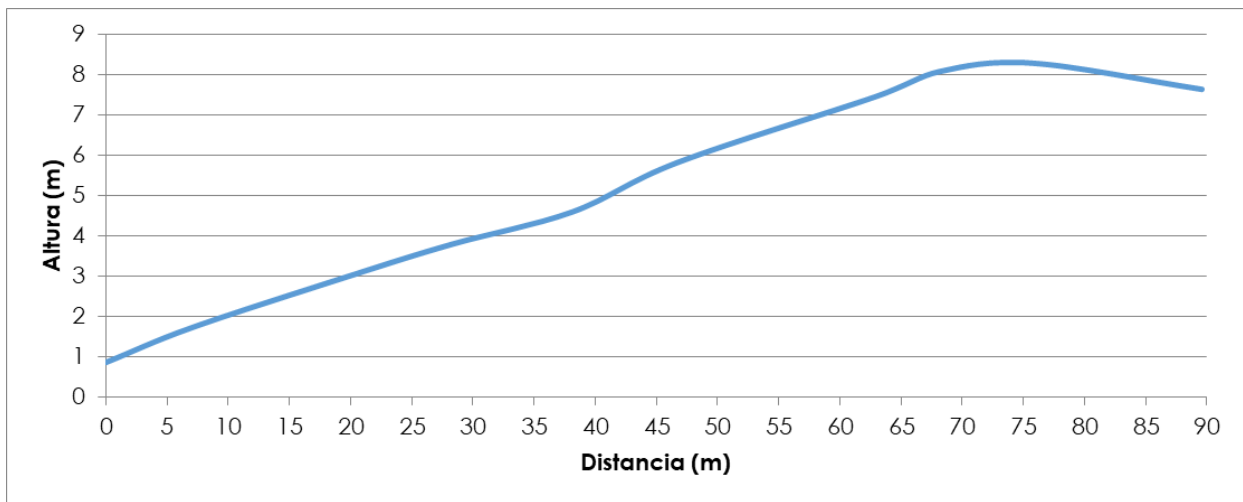
Figura A4.1: Localización Humedal Huasco.





El perfil topográfico revela una duna de más de + 8 m NRS, con las amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

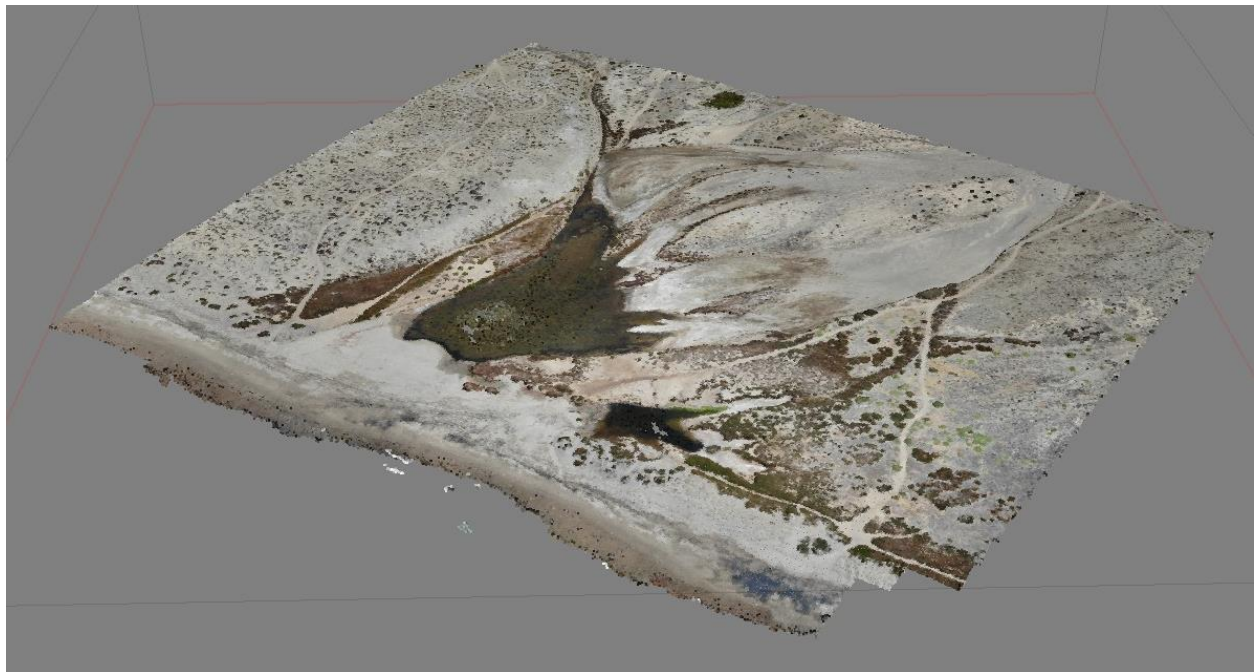
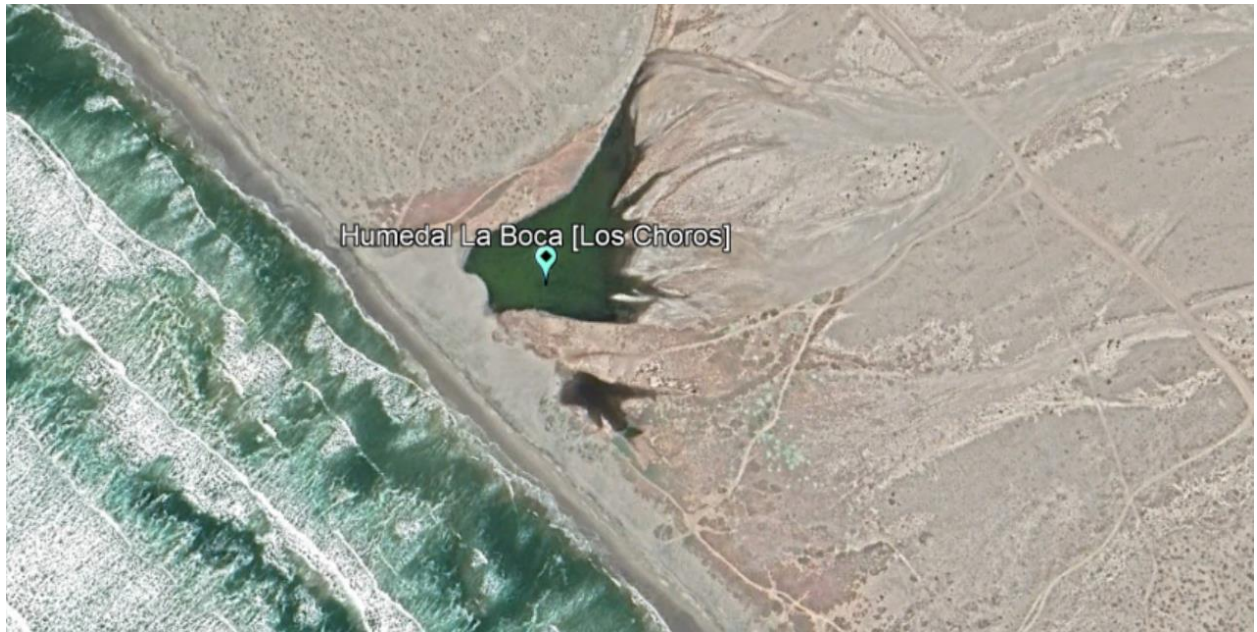
**Figura A4.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Huasco. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.**



#### 7.1.4 Choros Bajos

El humedal La Boca se encuentra localizado en comuna de La Higuera (29,30°S; 71,36°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 14.964 [m<sup>2</sup>]. Este Humedal se encuentra ubicado en el sector La Boca de Los Choros y en sus alrededores proliferan diversas especies de plantas, las que ofrecen refugio y alimento a múltiples animales residentes y aves migratorias.

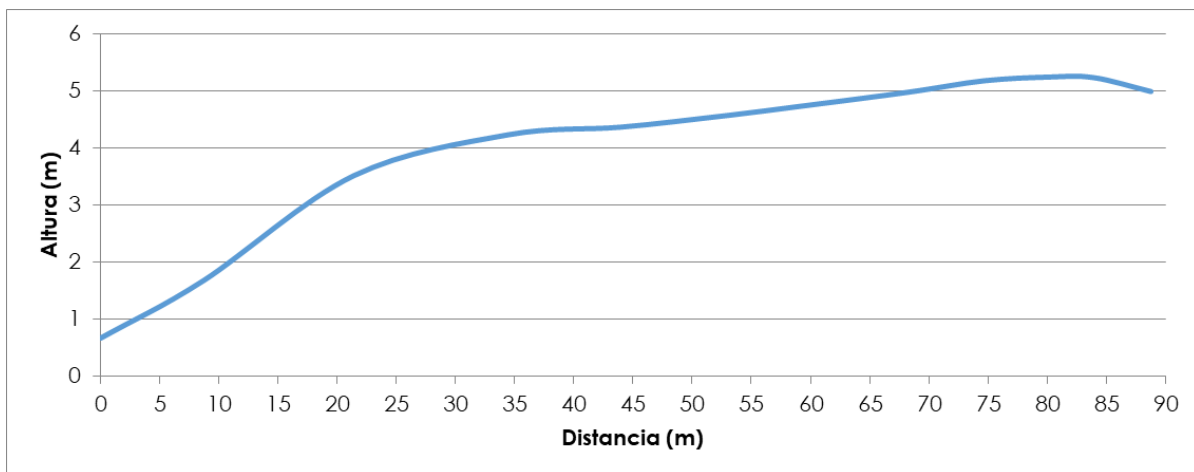
Figura A5.1: Localización Humedal La Boca.





El perfil topográfico revela una duna de más de + 5 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

**Figura A5.2:** Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal La Boca. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.





### 7.1.5 El Culebrón

El humedal El Culebrón se encuentra localizado en comuna de Coquimbo ( $29,96^{\circ}\text{S}$ ;  $71,32^{\circ}\text{W}$ ), tiene un espejo de agua que alcanza los  $20.724 \text{ [m}^2\text{]}$ . El Estero El Culebrón se ubica en la ciudad de Coquimbo, es un área muy intervenida, que fue drenada a mediados del siglo XX y solo en los últimos años existen algunos esfuerzos por restaurar y conservar el humedal.

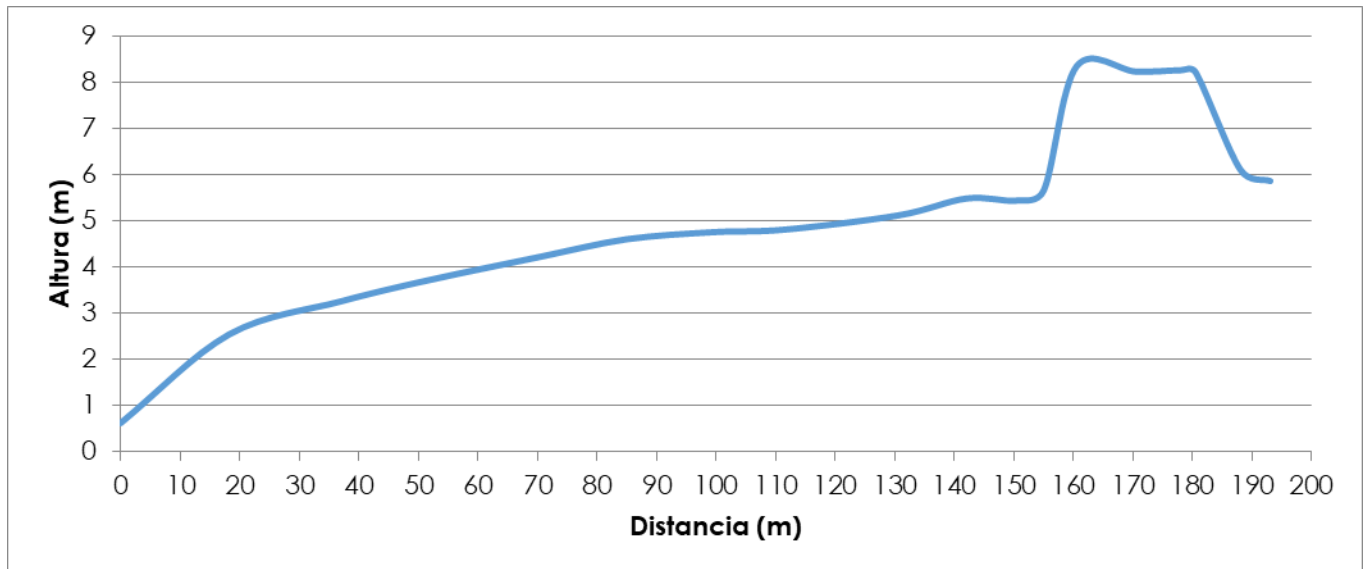
**Figura A6.1: Localización Humedal El Culebrón.**





El perfil topográfico revela una duna de más de + 8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,7 m.

**Figura A6.2:** Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal El Culebrón. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.6 Salinas Chica

El humedal Salinas Chica se encuentra localizado en comuna de Coquimbo (30,29°S; 71,54°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 38.860 [m<sup>2</sup>]. Este humedal es conservado y protegido por la comunidad local, existiendo varios esfuerzo para mantenerlo. El perfil topográfico revela una duna de más de +2 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,7 m.

Figura A7.1: Localización Humedal Salinas Chica.

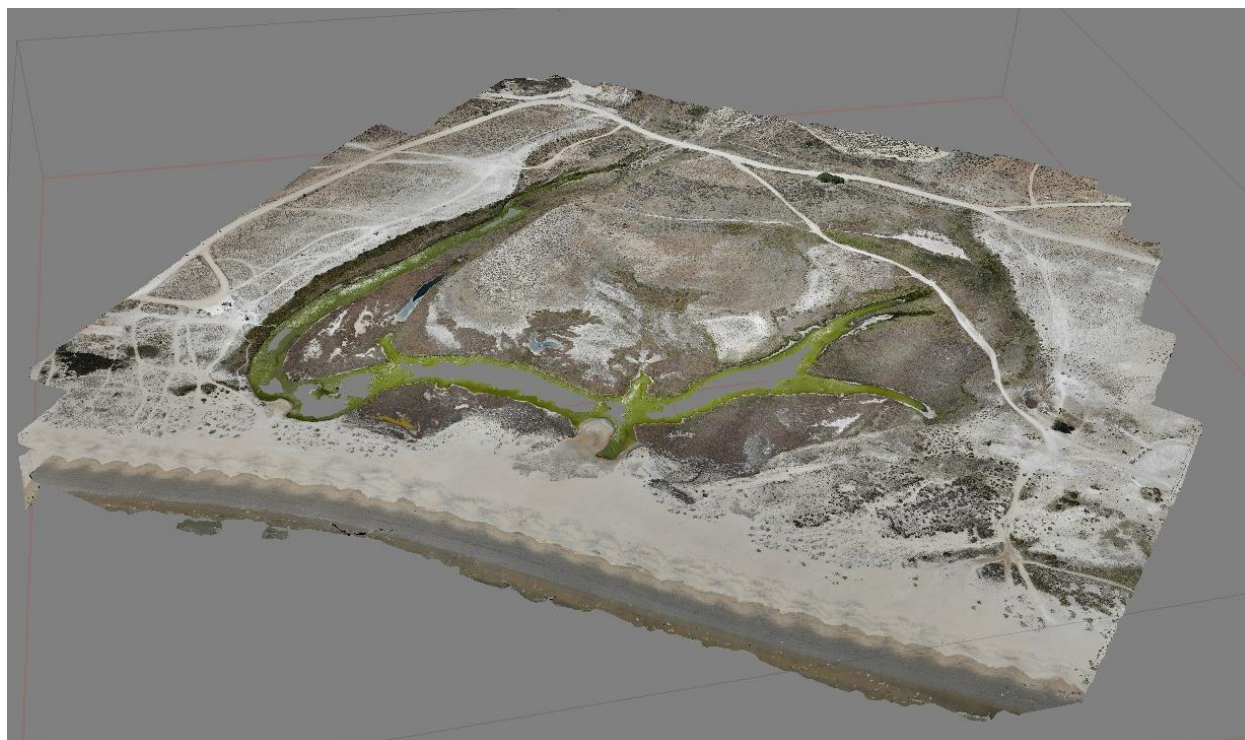
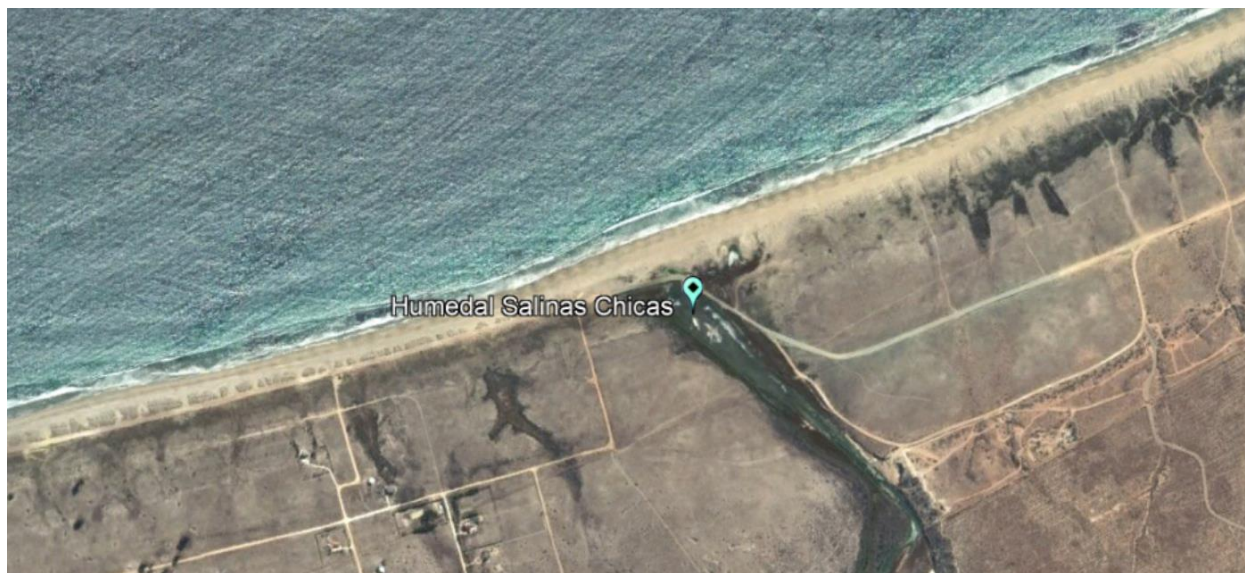
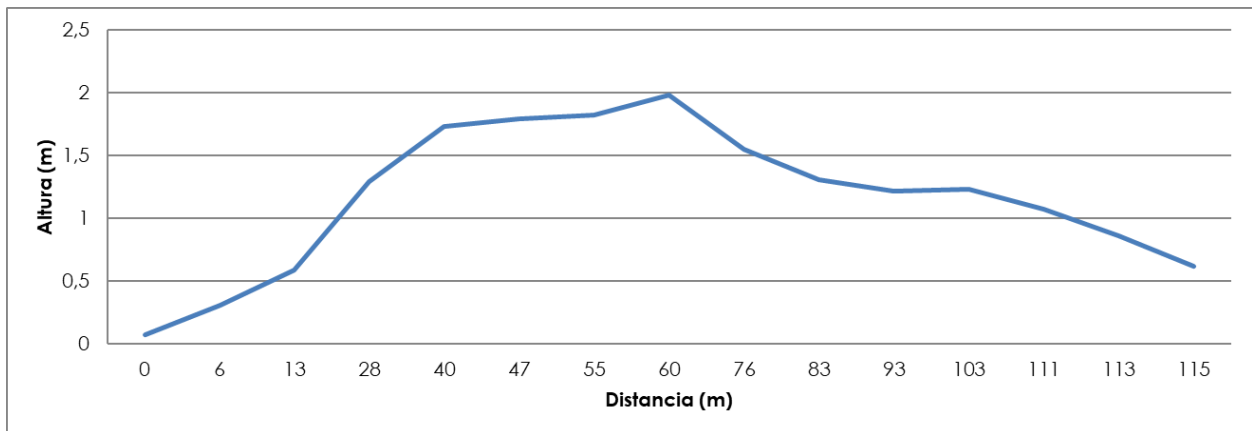




Figura A7.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Salinas Chicas. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.7 Pachingo

El humedal Pachingo se encuentra localizado en comuna de Coquimbo (30,30°S; 71,57°W). Tiene un espejo de agua que alcanza los 170.025 [m<sup>2</sup>]. Se trata de un humedal con una extensión considerable. Cuenta con una laguna principal de la cual se desprenden ramificaciones secundarias de acuerdo a la cantidad de agua proveniente de los mantos acuíferos y lluvias temporales. La playa estuarina forma en su desembocadura una barra arenosa que cuenta con una boca que comunica con el mar. Cuenta con diversos tipos de vegetación que le brindan mayor complejidad comparado con otros humedales ubicados en la costa norte. Un camino costero actualmente lo separa de la playa. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,7 m.

**Figura A8.1: Localización Humedal Pachingo.**

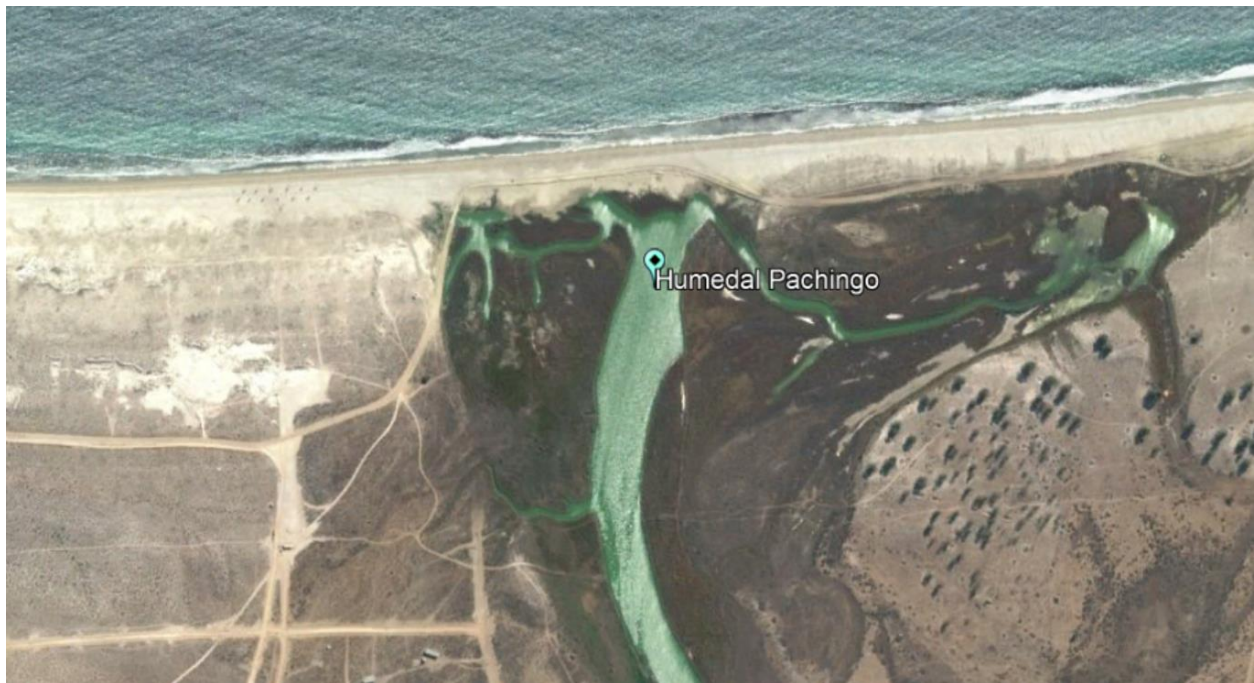
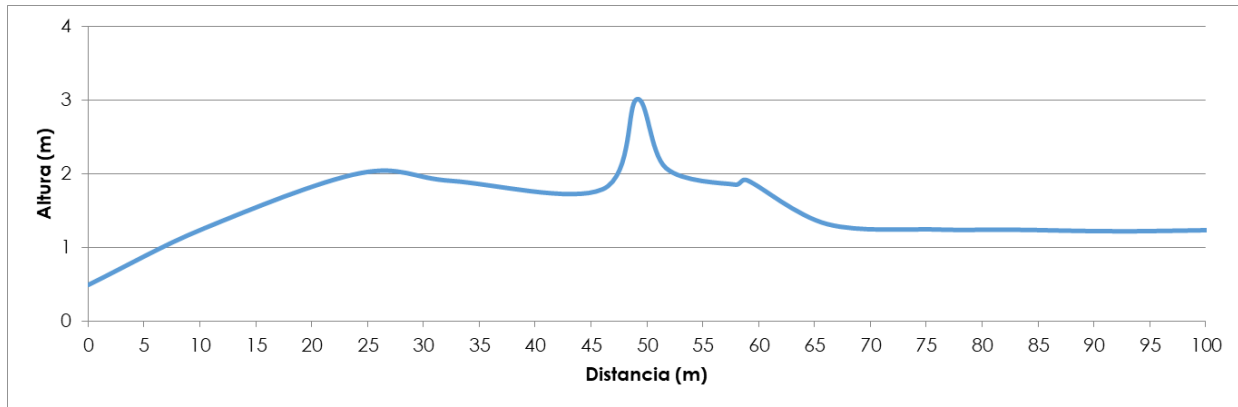


Figura A8.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Pachingo. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



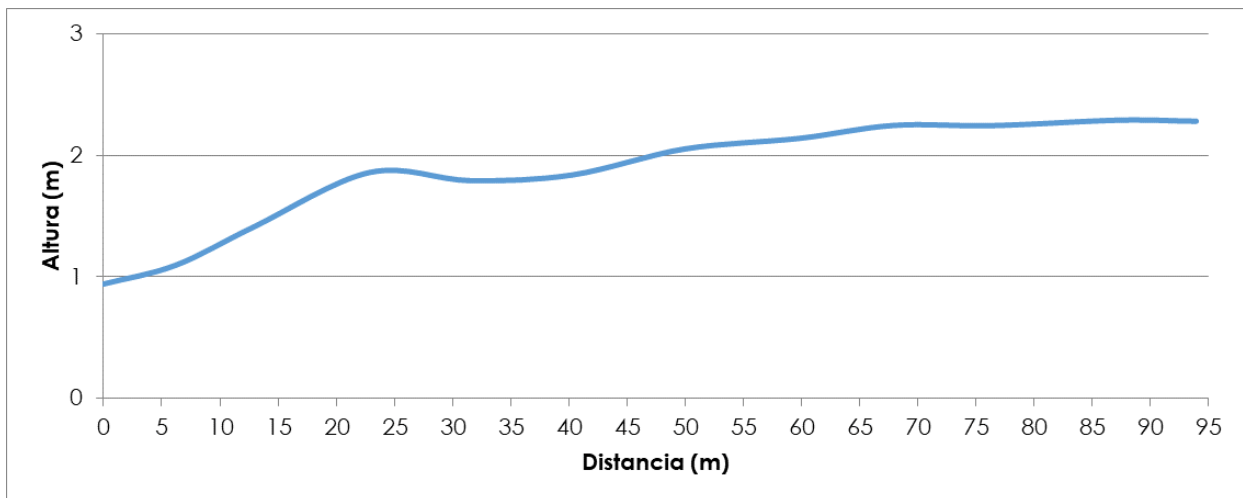
### 7.1.8 El Limarí

El humedal desembocadura del Limarí se encuentra localizado en comuna de Ovalle (30,73°S; 71,70°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 456.913 [m<sup>2</sup>]. El Río Limarí nace de la confluencia de los ríos Hurtado y Grande, y se ubica a 4km al este de la ciudad de Ovalle. Su desembocadura tiene una extensión de aproximadamente 190 há y corresponde a un humedal estuarino con alta influencia marina. En ésta se genera un meandro producto de una barra de arena al sur, lo que facilita el asentamiento de las aguas y la presencia de hábitat apropiado para aves playeras de orilla. El Río Limarí es el límite sur del Parque Nacional Fray Jorge y actualmente se evalúa su protección. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura A9.1: Localización Humedal Desembocadura del Limarí



Figura A9.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Desembocadura del Limarí. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.9 Huentelauquén

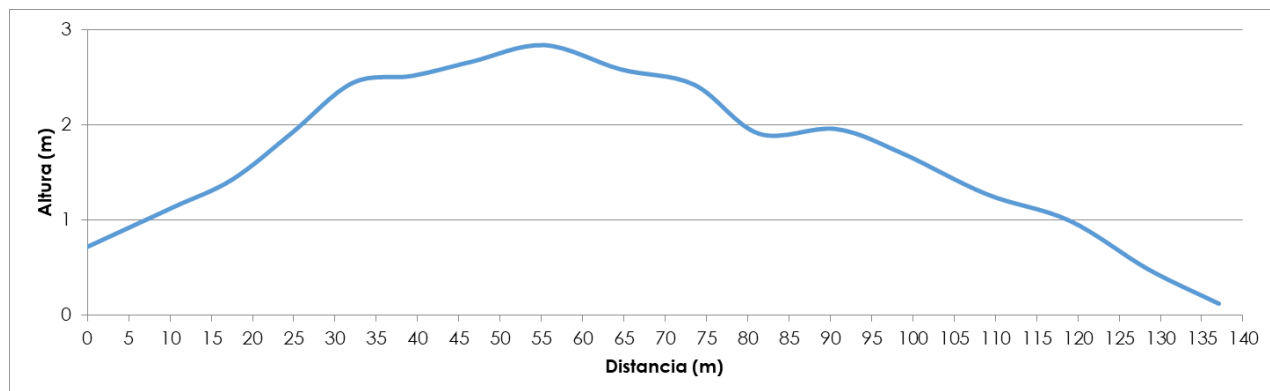
El humedal Salinas de Huentelauquén (sitio Ramsar N°2237) se encuentra localizado en comuna de Canela (31,62°S; 71,56°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 768.289 [m<sup>2</sup>]. En la desembocadura del Río Choapa se encuentra el humedal Huentelauquén, que forma parte de una red de humedales de la zona Central de Chile. El humedal tiene un área aproximada de 200 hectáreas. Al ensancharse la desembocadura del río, se forma un espejo de agua de unas 60 hectáreas. El nivel del agua del río varía con las estaciones y con la contención de aguas en los embalses cercanos. El sitio cuenta con diversos tipos de hábitat tales como dunas, playas arenosas, zonas de cultivo, entre otros. Debido a su importancia ecológica, este humedal fue declarado como Sitio Ramsar en 2015. El perfil topográfico revela una duna de más de +3 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura A10.1: Localización Humedal Salinas de Huentelauquén.





Figura A10.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Huentelauquén. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.10 Quilimarí

El humedal Quilimarí se encuentra localizado en comuna de Los Vilos (32,12°S; 71,51°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 108.842 [m<sup>2</sup>]. El perfil topográfico revela una duna de más de + 6 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura A11.1: Localización Humedal Quilimarí.

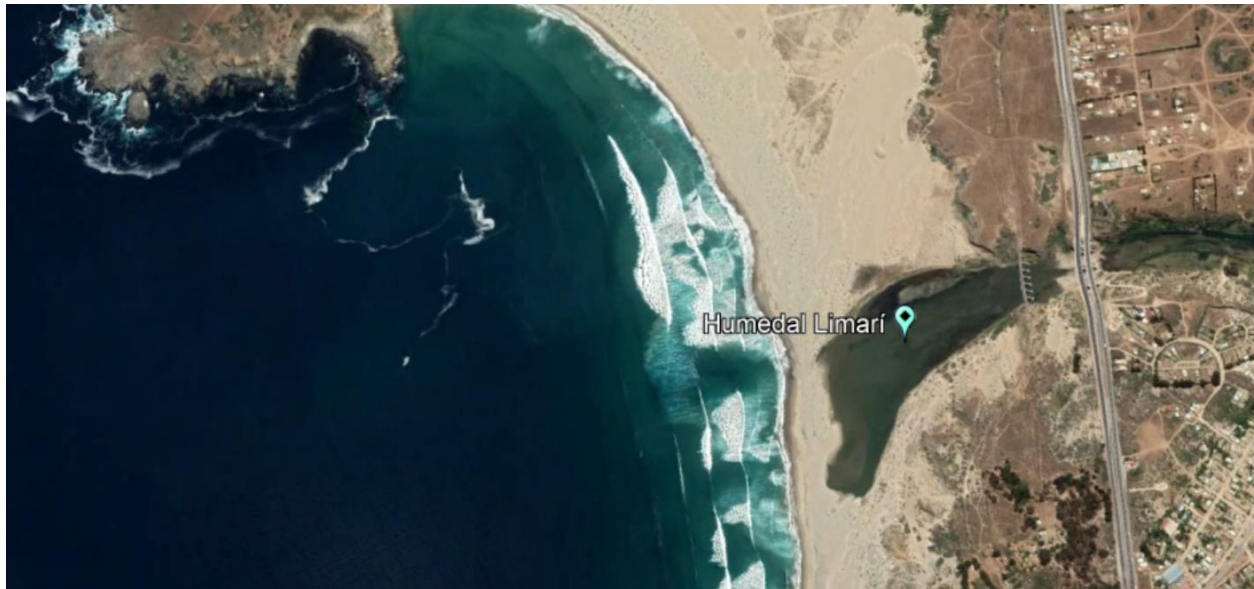
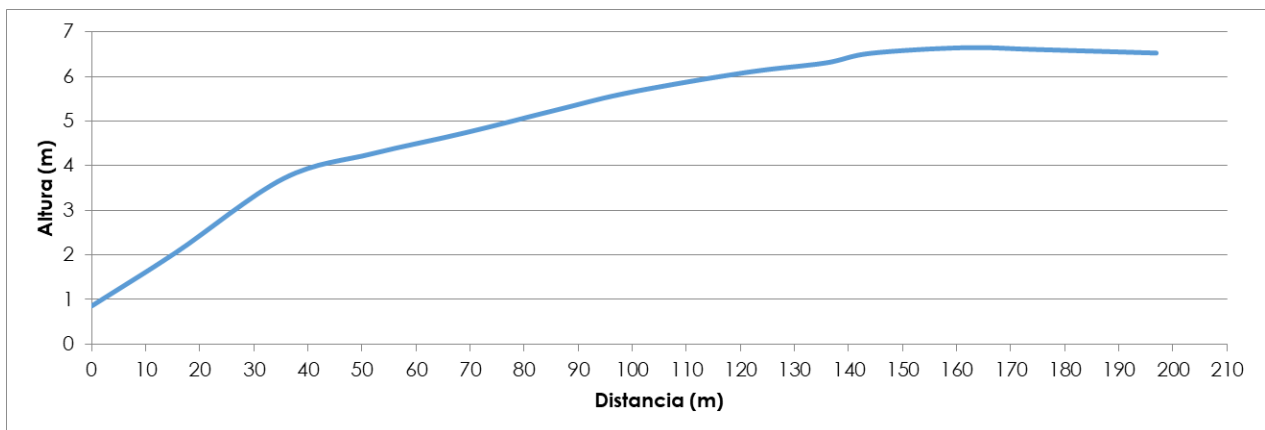


Figura A11.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Quilimarí. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.11 Pichicuy

El humedal de Pichicuy se encuentra localizado en comuna de La Ligua (32,35°S; 71,44°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 38.030 [m<sup>2</sup>]. El perfil topográfico revela una duna de apenas +2 m NRS.

Figura A12.1: Localización Humedal Pichicuy.

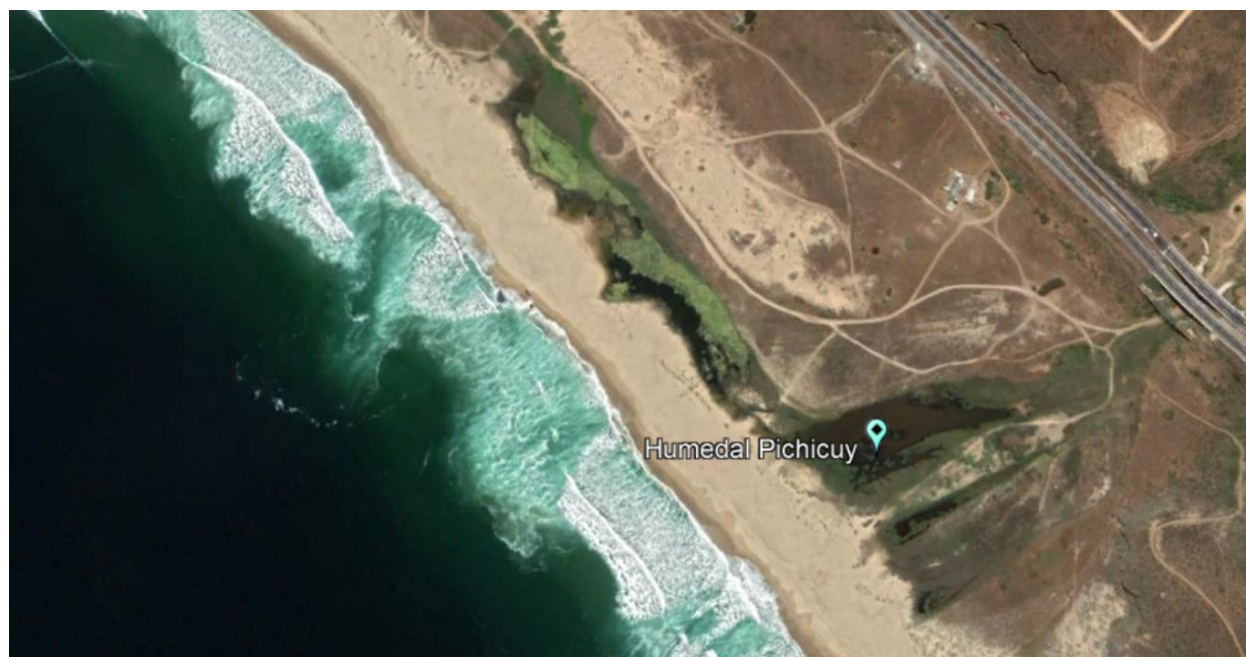
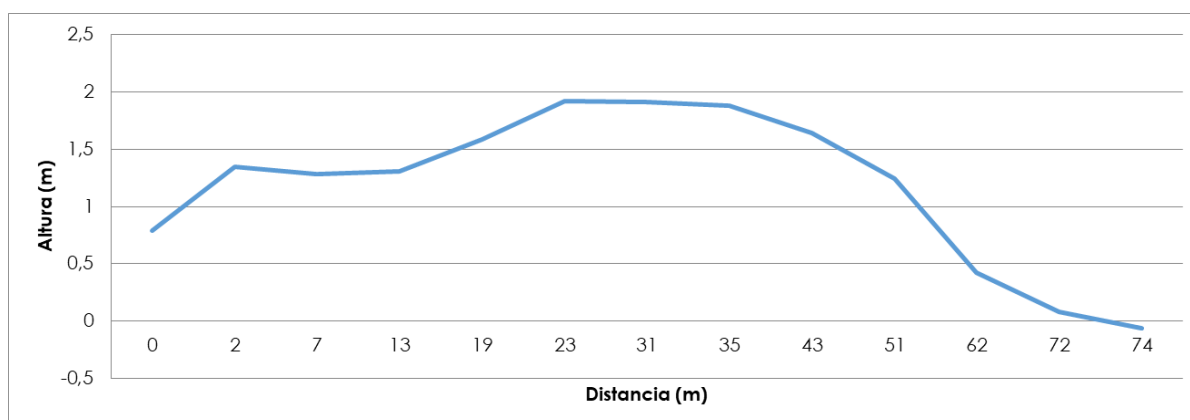


Figura A12.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Pichicuy. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.12 Humedal Cartagena

El humedal Cartagena se encuentra localizado en comuna de Cartagena (33,54°S; 71,60°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 50.936 [m<sup>2</sup>]. El perfil topográfico revela una duna de más de +5 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura A17.1; Localización Humedal Cartagena.

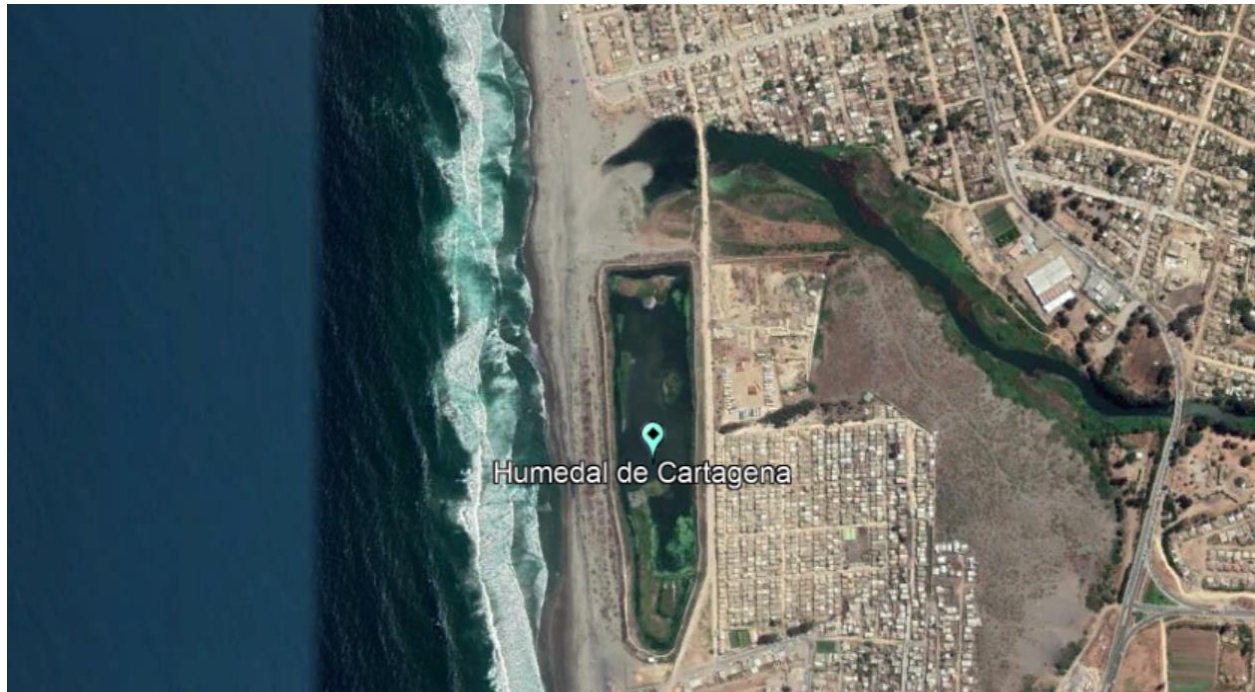
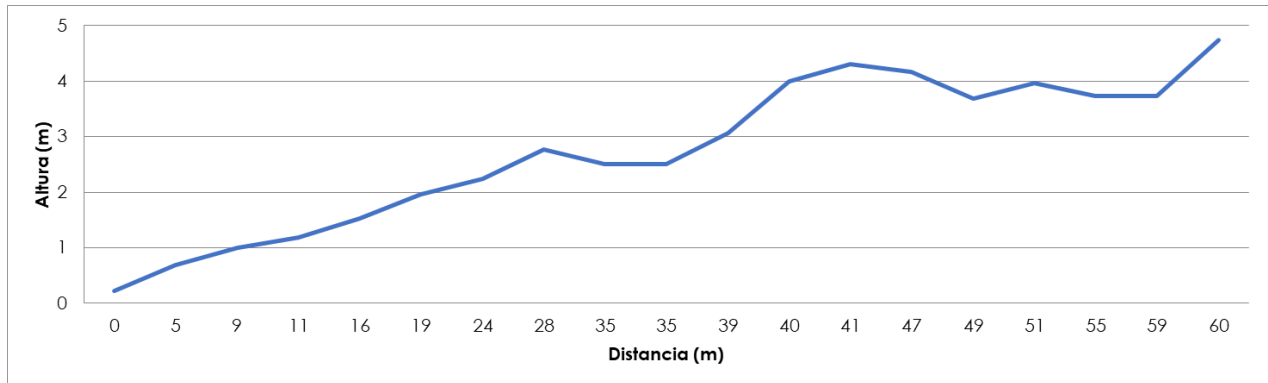


Figura A17.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Cartagena. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



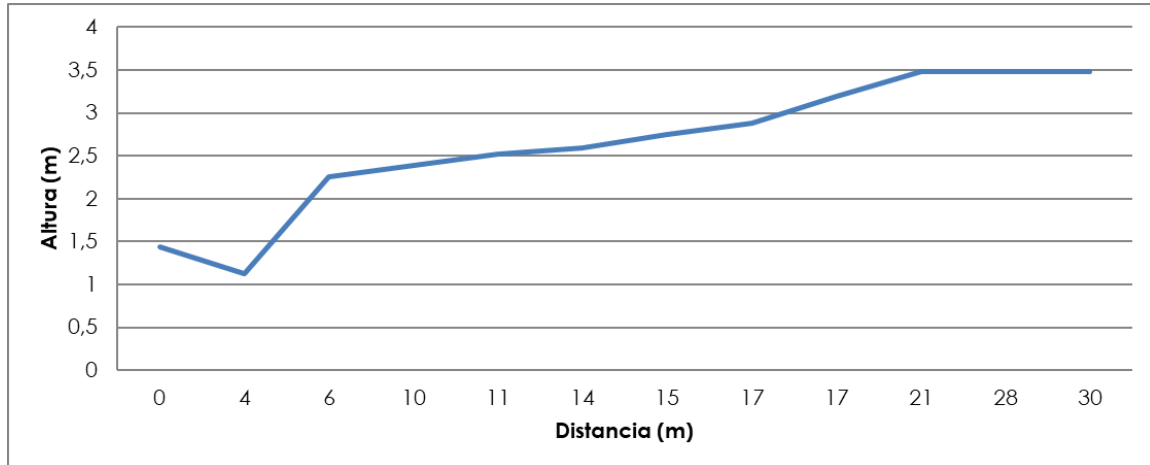
### 7.1.13 Desembocadura Maipo

El humedal Desembocadura Río Maipo se encuentra localizado en comuna de San Antonio (33,62°S; 71,63°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 385.983 [m<sup>2</sup>]. El perfil topográfico revela una duna de más de +3 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura A18.1: Localización Humedal Desembocadura Río Maipo.



Figura A18.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Desembocadura Río Maipo. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



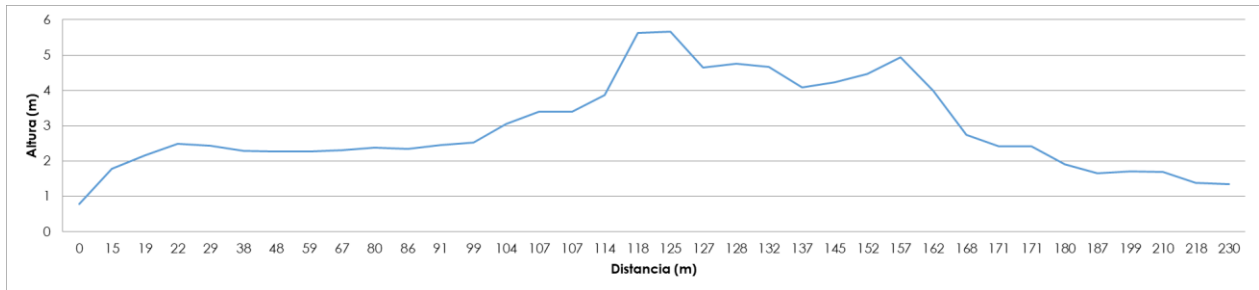
#### 7.1.14 Pichilemu - Laguna Bajel

El humedal Pichilemu se encuentra localizado en comuna de Pichilemu (34,38°S; 72,00°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 406.940 m<sup>2</sup>. Es un humedal urbano emplazado en el sector de la antigua estación de ferrocarriles del balneario. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,6 m.

Figura A21.1 Localización Humedal Laguna Bajel.



Figura A21.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Pichilemu. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.





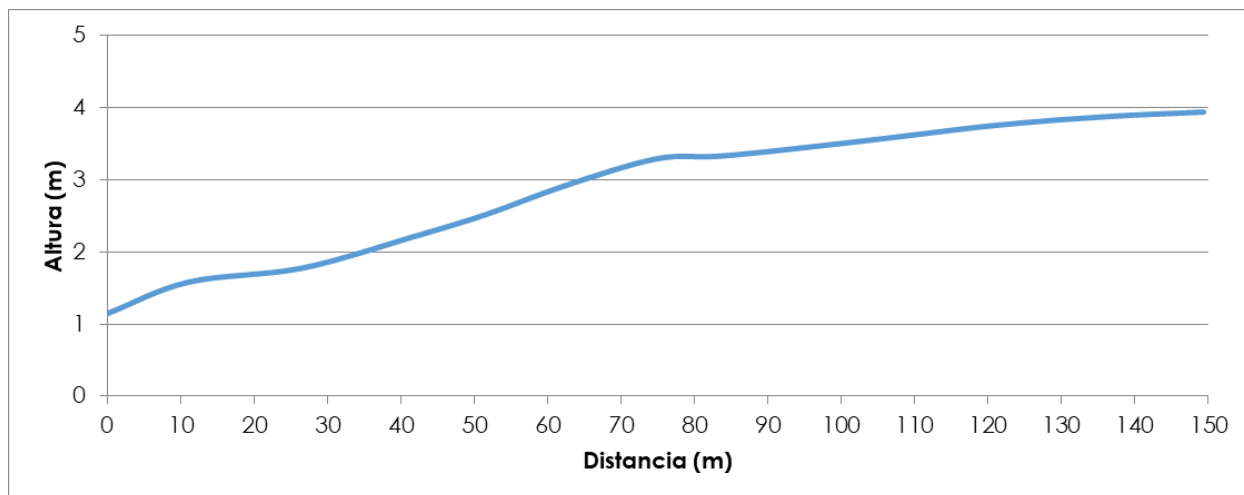
### 7.1.15 Vegas del Itata

El humedal vegas del Itata se encuentra localizado en comuna de Coelemu (36,39°S; 72,87°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 99.397 m<sup>2</sup>. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A27.1: Localización Humedal Vegas del Itata.



Figura A27.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Vegas del Itata. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



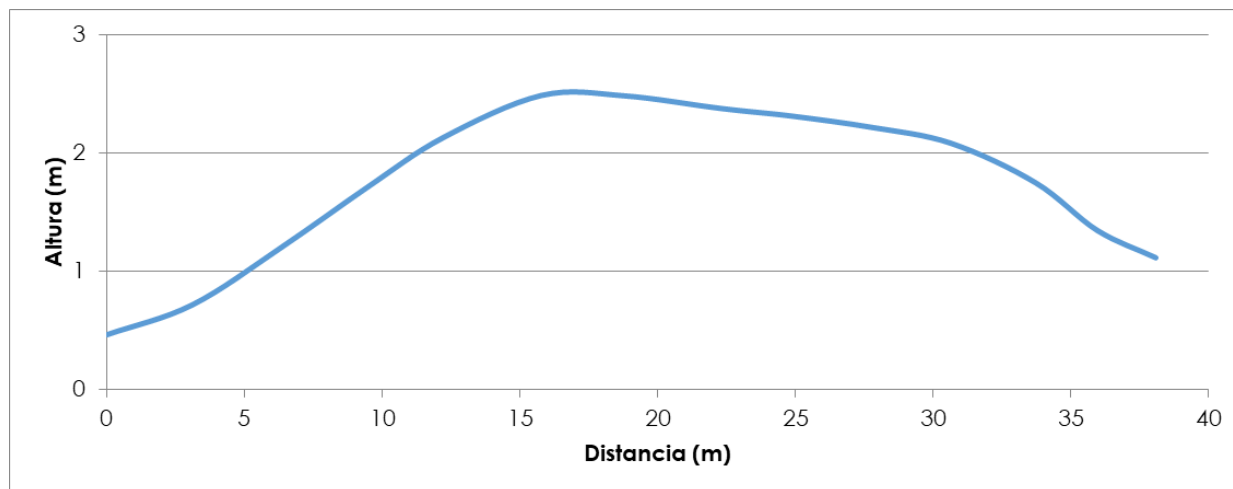
### 7.1.16 Merquiche

El humedal Merquiche se encuentra localizado en comuna de Tomé (36,48°S; 72,91°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 576 m<sup>2</sup>. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A28.1: Localización Humedal Merquiche.



Figura A28.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Merquiche. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



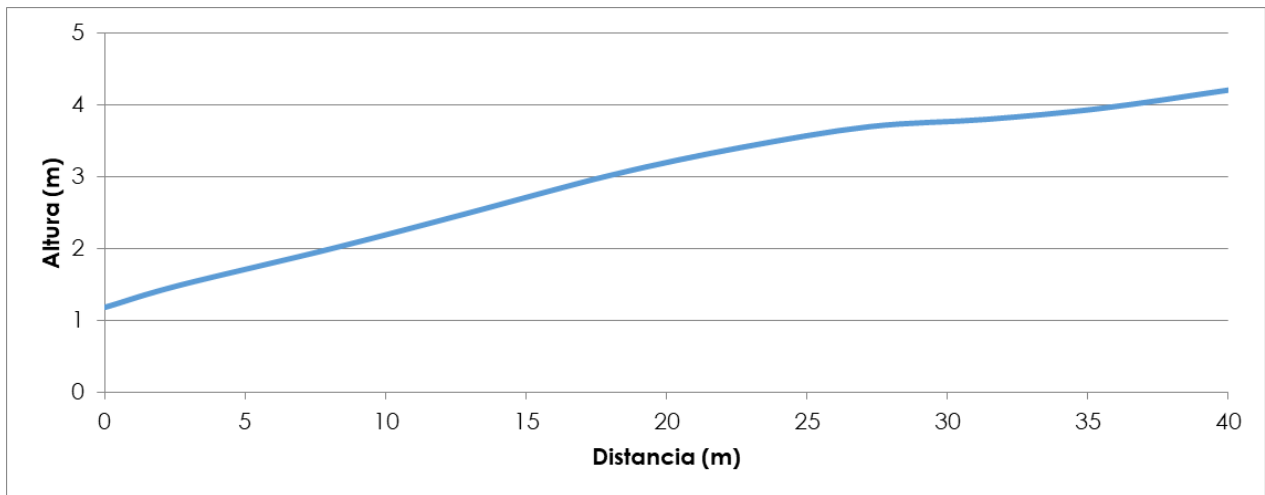
### 7.1.17 Vegas de Coliumo

El humedal Vegas de Coliumo se encuentra localizado en comuna de Tome (36,56°S; 72,95°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 28.715 m<sup>2</sup>. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A29.1: Localización Humedal Vegas de Coliumo.



Figura A29.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Vegas de Coliumo. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



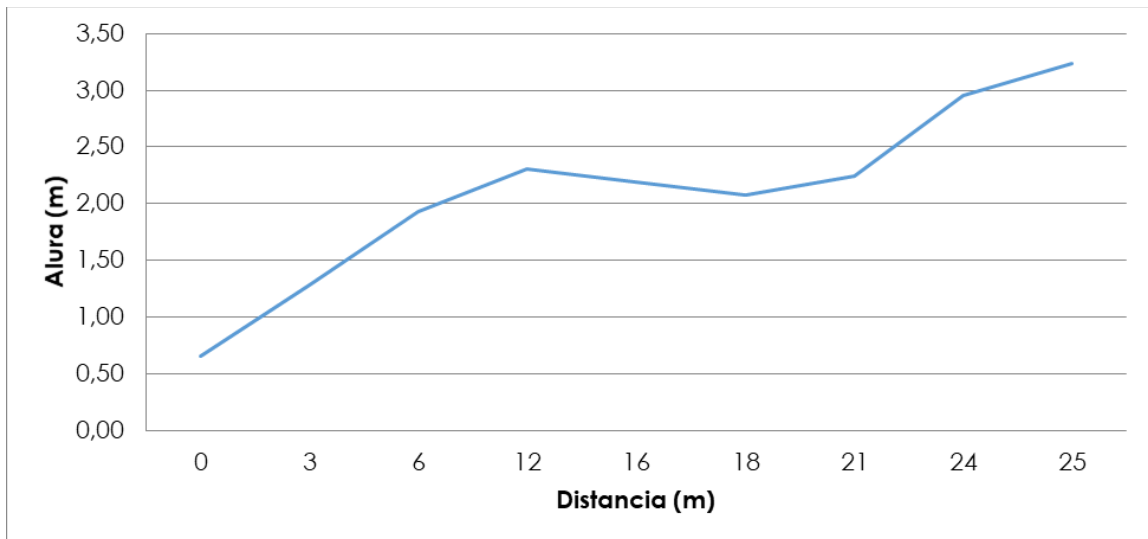
### 7.1.18 Lengua

El humedal de Lengua se encuentra localizado en comuna de Hualpén (36,77°S; 73,17°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 477.016 m<sup>2</sup>. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A30.1: Localización Humedal Lengua.



Figura A30.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Lengua. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.19 Vegas de Carampangue

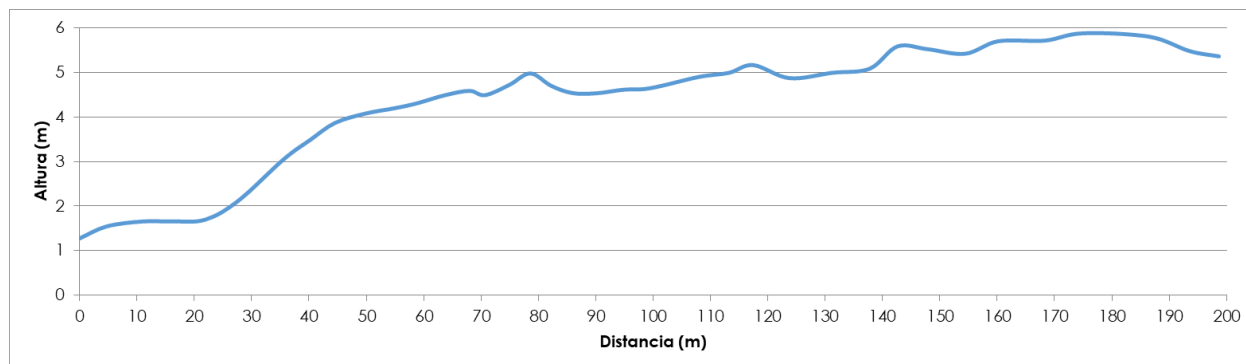
El humedal Vegas de Carampangue se encuentra localizado en comuna de Arauco (37,24°S; 73,30°W) y tiene un espejo de agua que alcanza los 358.254 m<sup>2</sup>. Este humedal experimento un drástico alzamiento con el terremoto del año 2010, que lo desecó. Con el transcurso de los años se ha vuelto a formar paulatinamente. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A31.1: Localización Humedal Carampangue.





Figura A31.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Carampangue. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



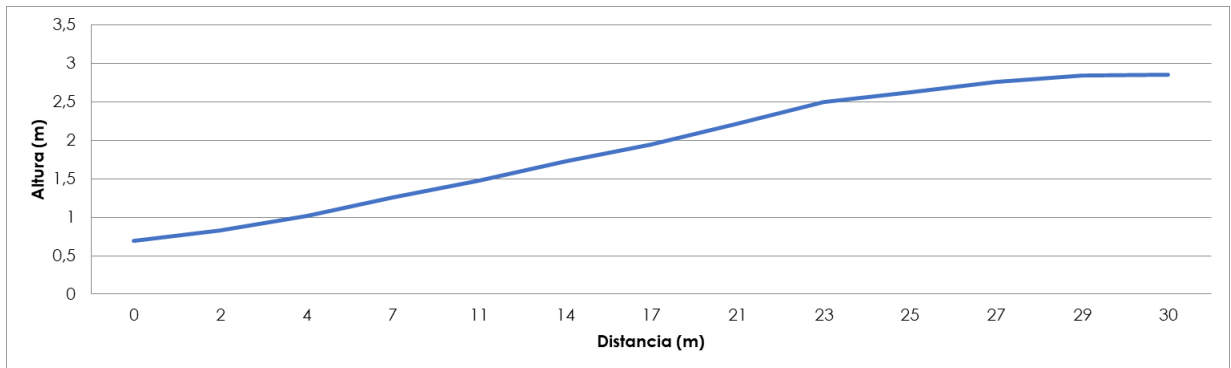
### 7.1.20 Tubul

El humedal de Tubul se encuentra localizado en comuna de Arauco (37,23°S; 73,44°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 388.116 m<sup>2</sup>. Este humedal experimento un drástico alzamiento con el terremoto del año 2010, que lo desecó. Con el transcurso de los años se ha vuelto a formar paulatinamente. El perfil topográfico revela una duna de más de +3 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A32.1: Localización Humedal Tubul.



Figura A32.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Tubul. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



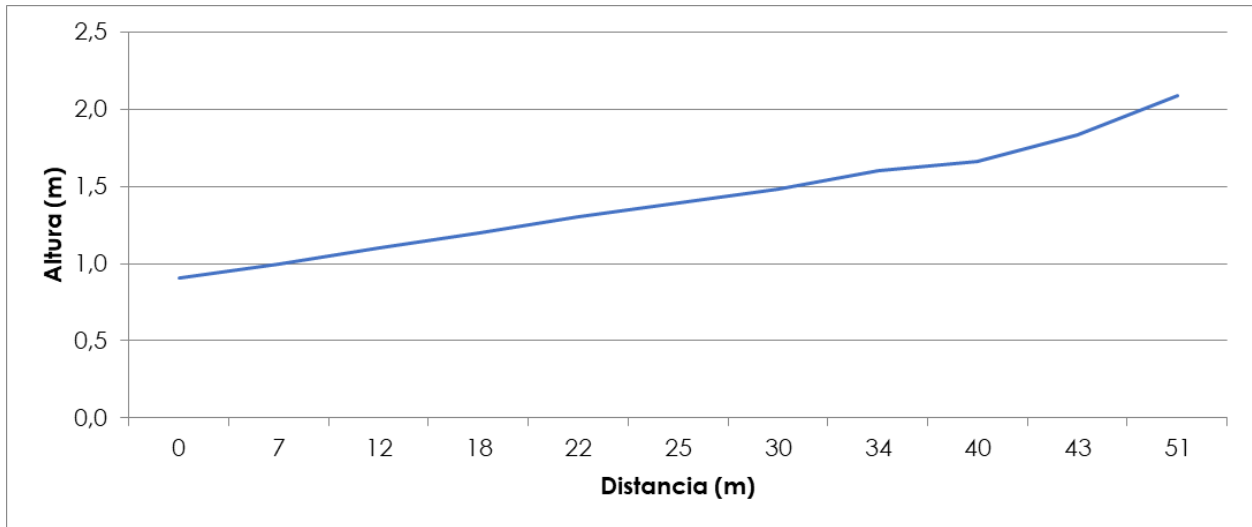
### 7.1.21 Chaihuín

El humedal Chaihuín se encuentra localizado en comuna de Corral (39,95°S; 73,58°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 418.199 m<sup>2</sup>. El perfil topográfico revela una playa plana de más de +2 m NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 m.

Figura A33.1: Localización Humedal Chaihuín.



Figura 68: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Chaihuín. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). El humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.



### 7.1.22 Cúcao

El humedal Cúcao se encuentra localizado en comuna de Chonchi (42,64°S; 74,12°W), tiene un espejo de agua que alcanza los 449.819 [m<sup>2</sup>]. El perfil topográfico revela una duna de más de +8 [m] NRS, con amplitudes de marea inferiores a 1,8 [m].

Figura A34.1: Localización Humedal Cúcao.

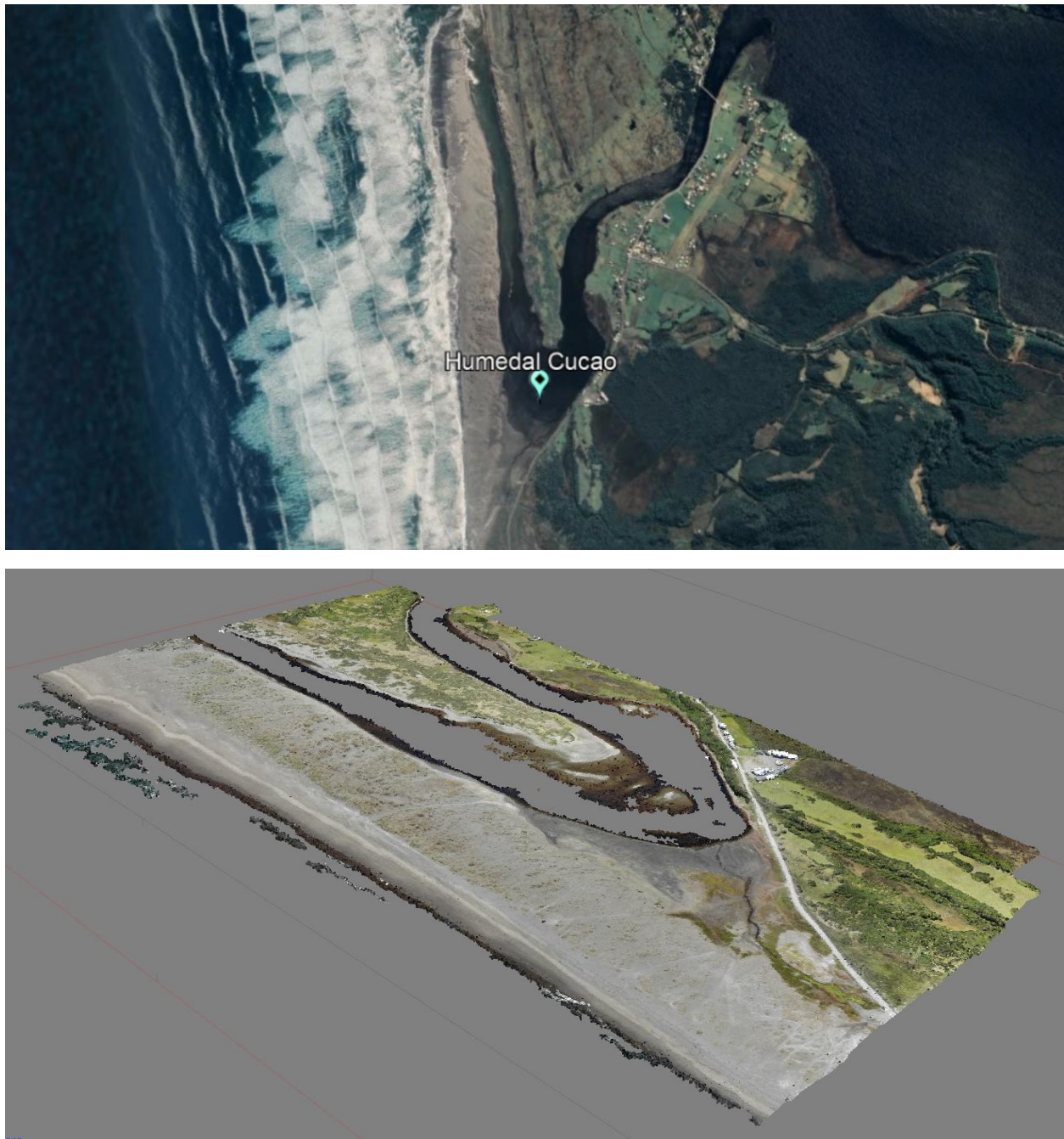


Figura A34.2: Perfil topográfico transecto eje del humedal perpendicular a la costa Humedal Cucao. Los valores se encuentran en metros y son referidos al plano Nivel de Reducción de Sonda (NRS). EL humedal se encuentra emplazado a la derecha y el mar a la izquierda.

