

**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE LA DESEMBOCADURA DE  
ESTUARIOS INTERMITENTES EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE Y  
SU RELACIÓN CON EL CAUDAL DE RÍO APORTANTE**

Tesis de Grado y Memoria de Título presentada por

**Drazen Ignacio Kusjanovic Ivanovic**

como requisito parcial para optar al título de

**Ingeniero Civil**

y el grado de

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Patricio Catalán Mondaca

11 de Julio de 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** Evolución morfológica de la desembocadura de estuarios intermitentes en la zona central de Chile y su relación con el caudal de río aportante

**Nombre del candidato(a):** Drazen Kusjanovic Ivanovic

**Carrera / Grado:** Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

**Campus:** Casa Central Valparaiso; **Departamento:** Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Patricio Catalán, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 29-08-25


**; Firma:**

  
Patricio Catalán

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 29-08-25

**; Firma:**



*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres que siempre me apoyaron y dieron todo lo posible para que yo pudiera cumplir mis sueños, a mi hermana que siempre cuidó de mí, a mis profesores que me transmitieron sus enseñanzas tanto académicas como de la vida misma, y a mis amigos y compañeros que de alguna u otra forma me ayudaron a culminar esta etapa. A todos los que siguen formando parte de mi vida y a los que no, les estaré agradecidos desde el fondo de mi corazón por todas las veces que estuvieron dispuestos a ayudarme. Su compañerismo y amabilidad las guardare para siempre.

## RESUMEN

Los estuarios representan ecosistemas de alto valor ecológico, funcional y social, ya que desempeñan un papel clave en la regulación de procesos biofísicos y la provisión de procesos ecosistémicos esenciales. Sin embargo, el creciente cambio climático y presión antrópica de la zona costera ha generado una degradación progresiva de la morfología de estos ambientes. En este estudio se analiza la evolución morfológica de la desembocadura de 12 estuarios de tipo barrera ubicados en la zona central de Chile durante el periodo de 1985-2024, con el objetivo de caracterizar sus transformaciones morfológicas y evaluar su relación con el caudal fluvial aportante. Para ello, se implementó una metodología basada en teledetección y el procesamiento automatizado de imágenes satelitales para estimar el estado de conexión estuario-océano y el ancho efectivo de desembocadura.

Los resultados muestran una tendencia general al aumento en la frecuencia de cierres y al estrechamiento de las desembocaduras, asociadas a la disminución sostenida del caudal fluvial. Se observa además que, si bien la acción del oleaje actúa de forma constante en la dinámica morfológica, su capacidad en el cierre de desembocaduras a través de la deriva litoral depende críticamente de la magnitud del caudal fluvial, lo que refuerza el rol del régimen hidrológico como variable moduladora crítica de la morfología estuarina. Este trabajo aporta evidencia sobre el impacto de la crisis hídrica en la estabilidad de estuarios intermitentes y destaca el potencial de las herramientas satelitales para su monitoreo a largo plazo.

# Índice de Contenidos

<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos y Alcance.....	2
1.3 Organización del documento .....	2
<b>2. Antecedentes</b> .....	4
<b>3. Marco Teórico</b> .....	6
3.1 Introducción.....	6
3.2 Definición de Estuario .....	6
3.3 Criterios de Clasificación de Estuarios.....	7
3.4 Modelo Geomorfológico de Dalrymple.....	9
3.5 Morfología y Transporte de Sedimentos en Estuarios.....	14
3.6 Mecanismos de Cierre de Estuarios.....	17
3.7 Forzantes Hidrodinámicas .....	18
3.7.1 Mareas .....	18
3.7.2 Oleaje.....	19
3.7.3 Caudal de Río Aportante .....	22
<b>4. Sitios de Estudio</b> .....	24
4.1 Introducción.....	24
4.2 Antecedentes.....	24
<b>5. Metodología</b> .....	32
5.1 Introducción.....	32
5.2 Teledetección.....	32
5.3 Índices Espectrales.....	33
5.4 InletTracker.....	34
5.4.1 Sitios de Entrada.....	34
5.4.2 Registros Satelitales.....	35
5.4.3 Método de Rutas de Menor Costo .....	36
5.5 Estado de Conexión .....	39
5.6 Ancho de Desembocaduras.....	40

5.6.1	Método de Detección Automática de Anchos .....	40
5.6.2	Calibración y Validación de los Resultados .....	42
5.7	Análisis Estadístico.....	45
5.8	Correlación de Anchos con Forzantes Hidrodinámicas.....	46
<b>6.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>50</b>
6.1	Introducción.....	50
6.2	Estuario del Río Aconcagua .....	51
6.2.1	Geometría Espacial.....	51
6.2.2	Registro Satelital .....	51
6.2.3	Estado de Conexión.....	52
6.2.4	Ancho de Desembocadura.....	57
6.2.5	Correlación con Forzantes Hidrodinámicas .....	64
6.3	Geometría Espacial de los Sitios de Análisis.....	68
6.4	Registros Satelitales.....	69
6.5	Estado de Conexión .....	71
6.6	Ancho de Desembocadura .....	78
6.7	Correlación con Caudal de Río Aportante .....	90
6.8	Resumen .....	92
<b>7.</b>	<b>Discusión</b> .....	<b>94</b>
7.1	Introducción.....	94
7.2	Estado de Conexión .....	94
7.2.1	Naturaleza dinámica de los sistemas estuarinos .....	94
7.2.2	Estacionalidad .....	95
7.2.3	Evolución en el estado de conexión .....	96
7.2.4	Consideraciones metodológicas .....	97
7.3	Ancho de Desembocaduras.....	98
7.3.1	Valores característicos y jerarquía espacial.....	98
7.3.2	Estacionalidad .....	99
7.3.3	Evolución en el ancho de desembocadura.....	100
7.3.4	Análisis de parámetros de calibración y validación de resultados .....	101
7.3.5	Consideraciones metodológicas .....	102
7.4	Correlación con Forzantes Hidrodinámicas.....	103
7.4.1	Caudal de río aportante.....	103
7.4.2	Forzantes marítimas.....	104
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>106</b>
	Referencias.....	109
	Anexo .....	114

---

A.0.1.	Estados de conexión determinados por año.....	114
A.0.2.	Comportamiento estacional de sitios de estudio.....	115
A.0.2.1	Estuario Río Elqui.....	126
A.0.2.2	Estuario Río Limarí.....	127
A.0.2.3	Estuario Río Choapa.....	128
A.0.2.4	Estuario Río Petorca – La Ligua.....	129
A.0.2.5	Estuario Río Aconcagua.....	130
A.0.2.6	Estuario Río Maipo.....	131
A.0.2.7	Estuario Río Rapel.....	132
A.0.2.8	Estuario Estero Nilahue (Cáhuil).....	133
A.0.2.9	Estuario Río Mataquito.....	134
A.0.2.10	Estuario Río Maule.....	135
A.0.2.11	Estuario Río Itata.....	136
A.0.2.12	Estuario Río Biobío.....	137

# Índice de Tablas

Tabla 4.1: Inventario de sistemas estuarinos identificados sobre la extensión de clima mediterráneo en Chile. Se indica distribución geográfica, administrativa y ubicación en cuencas y subcuencas hidrográficas.....	25
Tabla 6.1: Registros satelitales disponibles para el estuario del Río Aconcagua. ....	52
Tabla 6.2: Resumen estadístico de la duración de los periodos consecutivos del estado de conexión del estuario del Río Aconcagua. ....	56
Tabla 6.3: Matrices de transición de estados de conexión para el estuario del Río Aconcagua. ....	57
Tabla 6.4: Parámetros de calibración utilizados para el método de cálculo de ancho de desembocaduras y el error absoluto medio obtenido para el estuario del Río Aconcagua.....	58
Tabla 6.5: Estadísticos por periodo para el ancho de la desembocadura del estuario del Río Aconcagua.....	60
Tabla 6.6: Resultados Prueba de Mann - Kendall para anchos mensuales medianos registrados para la desembocadura del estuario del Río Aconcagua. ....	60
Tabla 6.7: Registros satelitales disponibles para los diferentes sitios de estudio. ....	69
Tabla 6.8: Índice ECI anual promedio para cada sitio de estudio dentro de los diferentes periodos de análisis.....	73
Tabla 6.9: Resumen estadístico de la duración de los periodos consecutivos del estado de conexión. ....	75
Tabla 6.10: Matrices de transición de estados de conexión para los distintos sitios. ....	76
Tabla 6.11: Parámetros de calibración utilizados para el método de cálculo de ancho de desembocaduras y el error absoluto medio determinado para los sitios de estudio. ....	78
Tabla 6.12: Ancho de desembocadura promedio y mediano para cada sitio de estudio dentro de los diferentes periodos de análisis.....	84
Tabla 6.13: Resultados Prueba de Mann - Kendall para los anchos mensuales medianos registrados en los doce sitios de estudio. ....	85
Tabla 6.14: Estaciones fluviométricas del Sistema Nacional de Información de Agua de la DGA consultadas para cada sitio de estudio. ....	90
Tabla 6.15: Resumen resultados para los 12 sitios en estudio. Se indican valor del índice ECI y de ancho de desembocadura promedio para los distintos periodos indicados, estadístico Z de la prueba de Mann-Kendall, y coeficiente de correlación de Spearman $\rho$ entre caudal fluvial y ancho de desembocadura. ....	92

# Índice de Figuras

Figura 3.1: Elementos que constituyen un estuario según Dionne 1963 y Perillo 1995 (Perillo, 1995). .....	7
Figura 3.2: Clasificación fisiográfica de estuarios según Pritchard (Valle-Levinson, 2010). .....	8
Figura 3.3: Clasificación evolutiva de medioambientes costeros. El eje longitudinal del prisma tridimensional representa el tiempo relativo en referencia a cambios en el nivel relativo del mar y el aporte de sedimento (transgresión y progradación). Las tres esquinas del prisma corresponden las condiciones dominantes por procesos fluviales, de oleaje y de marea (Dalrymple, et al., 1992). .....	9
Figura 3.4: Sección transversal del prisma de clasificación costera (Dalrymple, et al., 1992). .....	10
Figura 3.5: A) Representación esquemática de la definición de estuario de Pritchard (1967) y Dalrymple et al. (1992), y la zonificación tripartita de facies resultante. B) Distribución esquemática en términos energéticos de los procesos físicos que operan dentro de un estuario (Dalrymple, et al., 1992). .....	11
Figura 3.6: Distribución de A) Tipos de energía, B) Componentes morfológicos en vista en planta, y C) dacies sedimentarias en una sección longitudinal dentro de un estuario dominado por el oleaje idealizado (Dalrymple, et al., 1992). .....	12
Figura 3.7: Distribución de A) Tipos de energía, B) Componentes morfológicos en vista en planta, y C) Facies sedimentarias en una sección longitudinal dentro de un estuario dominado por la marea idealizado (Dalrymple, et al., 1992). .....	13
Figura 3.8: Diagrama idealizado de mareas de inundación y refluo sobre un estuario (O'Brien, 1969). .....	14
Figura 3.9: A) Modelo de marea de inundación (Hayes, 1975). B) Modelo de marea de refluo (FitzGerald, 1976) (Modificado de FitzGerald (1996)). .....	15
Figura 3.10: Diagrama de modelo de balance de masas para la migración de desembocaduras propuesto por Nienhuis y Ashton (Nienhuis & Ashton, 2016). .....	16
Figura 3.11: Esquema de mecanismos de cierre de desembocaduras mediante procesos litorales y transversales (Ranasinghe & Pattiaratchi, 2003). .....	18
Figura 3.12: Zonas de generación del oleaje de mar de fondo y de viento que inciden sobre el borde costero chileno (Modificado de Atlas de Oleaje UV (2016)). .....	21
Figura 4.1: Distribución de sistemas estuarinos identificados sobre la extensión del clima mediterráneo en la costa chilena. ....	29
Figura 4.2: Distribución espacial de sistemas estuarinos estudiados. ....	30
Figura 5.1: Imagen y configuración de polígonos referencial para la desembocadura del Río Rapel. El punto A es ubicado en el océano abierto y el punto B al interior del estuario, mientras que los puntos C y D son ubicados en lados opuestos de la desembocadura. Se indican también las máscaras para delimitar la búsqueda de rutas formadas por A-B y C-D. ....	35

Figura 5.2: Ejemplo de aplicación del método de rutas de menor costo. Se muestran las rutas de menor y mayor costo generadas a partir de la amplificación del índice mNDWI. (Modificado de Heimhuber et al. (2021)).	37
Figura 5.3: Ilustración de método utilizado para generación automática de transectos a lo largo y a través de la barrera de arena con InletTracker. En (a) registro satelital L8 para la desembocadura del Río Aconcagua durante un estado de conexión abierto. Se muestran los puntos semilla A y B, los puntos receptores C y D, y los transectos generados. En (b) y (c) se presenta el transecto mNDWI <sup>(-1)</sup> a través y a lo largo de la barrera de arena respectivamente.	37
Figura 5.4: Ilustración de método utilizado para generación automática de transectos a lo largo y a través de la barrera de arena con InletTracker. En (a) registro satelital S2 para la desembocadura del Río Aconcagua durante un estado de conexión cerrado. Se muestran los puntos semilla A y B, los puntos receptores C y D, y los transectos generados. En (b) y (c) se presenta el transecto mNDWI <sup>(-1)</sup> a través y a lo largo de la barrera de arena respectivamente.	38
Figura 5.5: Interfaz de clasificación de estado de desembocadura de InletTracker.	39
Figura 5.6: Ilustración de método de detección automática de ancho de desembocaduras. En azul se muestra el perfil de valores del índice mNDWI <sup>(-1)</sup> a lo largo del transecto. La línea punteada roja indica el valor de la mediana del transecto $M_{mNDWI}$ . Se indica el cálculo del parámetro $\Delta$ como la diferencia entre la mediana y el valor mínimo del transecto. La línea punteada verde corresponde al umbral adaptativo $U$ , calculado como la diferencia entre $M_{mNDWI}$ y $\Delta P$ .	41
Figura 5.7: a) Ilustración de método de detección automática de ancho de desembocaduras. En azul se muestra el perfil de valores del índice mNDWI <sup>(-1)</sup> a lo largo de la barrera. Se indica el cálculo del parámetro $\Delta$ como la diferencia entre la mediana y el valor mínimo del transecto. La línea punteada verde corresponde al umbral relativo $U$ . b) Validación de resultados a partir de anchos estimados con Google Earth Pro.	45
Figura 5.8: Ejemplo serie de tiempo de caudales medios mensuales de río obtenidos para el estuario del Río Aconcagua a partir de la estación fluviométrica Río Aconcagua en Romeral (BNA 05423003-6).	47
Figura 5.9: Ejemplo serie de tiempo de caudales medios mensuales de marea obtenidos para el estuario del Río Aconcagua a partir de datos de rango de marea de SHOA para Valparaíso.	47
Figura 5.10: Ejemplo serie de tiempo de caudal total de desembocadura para el estuario del Río Aconcagua a partir de la suma de los caudales de río y de marea.	48
Figura 5.11: Ejemplo de series de tiempo de variables de clima de oleaje para el Nodo 8 del Atlas de Oleaje de Chile, asociado a la localidad de Valparaíso. En a) Altura significativa mensual promedio, en b) periodo de oleaje mensual promedio, en c) expresión de transporte LST mensual promedio y en d) expresión de transporte CST mensual promedio.	49
Figura 6.1: Distribución espacial de los polígonos utilizados en el análisis de rutas de menor costo para la desembocadura del Río Aconcagua utilizados en coordenadas UTM (Zona 19S, datum WGS84). En el panel izquierdo se presenta una vista de contexto regional con el punto de ubicación de la desembocadura. En el panel derecho detalle de los polígonos definidos. La línea roja discontinua externa representa el polígono full_bounding_box. Los polígonos intermedios muestran las máscaras A-B y C-D utilizadas como regiones de búsqueda para las rutas transversal y longitudinal a la barra de arena, respectivamente. Se muestran también los puntos semilla A y C y los puntos receptores B y D.	51
Figura 6.2: Número total de registros satelitales procesados por año natural para el estuario del Río Aconcagua.	52
Figura 6.3: Estado de conexión de la desembocadura del Río Aconcagua inferido visualmente a lo largo del registro satelital. Los puntos representan una imagen individual procesada indicando su	

estado. En sombreado azul se indica cada vez que se registran estados de conexión abiertos consecutivos, mientras que en sombreado rojo, cuando se registran estados de conexión cerrados consecutivos. Las secciones no sombreadas indican que no existen dos estados iguales consecutivos o que el estado de conexión fue indeterminado. ....	53
Figura 6.4: Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Aconcagua determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura registrado durante el mes: En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante un mismo mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales. ....	54
Figura 6.5: Entrance Closure Index (ECI) anual calculado para el registro satelital de la desembocadura del Río Aconcagua. En las barras de color rojo se indica el valor de ECI mientras que en color azul se indica el valor de 1-ECI. ....	55
Figura 6.6: Estacionalidad registrada del índice ECI para el registro satelital del periodo de 1985 a 2024 de la desembocadura del Río Aconcagua. En las barras de color rojo se indica el valor de ECI mientras que en color azul se indica el valor de 1-ECI. ....	56
Figura 6.7: Regresión lineal simple sobre las proporciones anuales de estados abiertos ( $1 - ECI$ ). Se presenta recta de tendencia junto a su pendiente $m$ y valor $p$ . ....	57
Figura 6.8: Ancho del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua registrado a través del método de detección automática de anchos. Cada punto representa un registro satelital procesado. En azul se indican los registros de estuario abierto, mientras que en rojo se indican episodios de cierre de la desembocadura. ....	58
Figura 6.9: Ancho mediano mensual del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua registrado a través del método de detección automática de anchos. Cada punto representa la mediana mensual del ancho de desembocadura. ....	58
Figura 6.10: Ancho promedio anual calculado del canal de desembocadura a partir del registro satelital para la desembocadura del Río Aconcagua. ....	59
Figura 6.11: Ancho mediano anual calculado del canal de desembocadura a partir del registro satelital para la desembocadura del Río Aconcagua. ....	59
Figura 6.12: Ancho mediano semestral calculado del canal de desembocadura a partir del registro satelital para la desembocadura del Río Aconcagua. Se presentan los resultados con valores medianos centrados en los meses de enero y julio. ....	60
Figura 6.13: Ancho mensual promedio calculado del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua para los periodos indicados. ....	61
Figura 6.14: Ancho mensual mediano calculado del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua para los periodos indicados. ....	62
Figura 6.15: Ancho mensual promedio y desviación estándar calculada del canal de desembocadura a partir del registro satelital indicado para los sitios de estudio. ....	62
Figura 6.16: Rango intercuartílico mensual calculado para el ancho del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua. La línea central de cada caja corresponde a la mediana del ancho mensual, mientras que los bordes inferior y superior de cada caja representan el primer y tercer cuartil respectivamente, delimitando el rango intercuartílico (IQR). Los bigotes se extienden hasta los valores mínimo y máximo que se encuentran dentro de 1,5 veces el IQR a partir de los cuartiles. Los puntos rojos indican valores atípicos. ....	63
Figura 6.17: Rango intercuartílico calculado para el ancho del canal de desembocadura del Estuario del Río Aconcagua para los diferentes periodos indicados. La línea central de cada caja corresponde a la mediana del ancho del periodo indicado, mientras que los bordes inferior y superior de cada	

caja representan el primer y tercer cuartil respectivamente, delimitando el rango intercuartílico (IQR). Los bigotes se extienden hasta los valores mínimo y máximo que se encuentran dentro de 1,5 veces el IQR a partir de los cuartiles. Los puntos rojos indican valores atípicos.....	64
Figura 6.18: Ancho mensual promedio de desembocadura del estuario vs caudal mensual promedio del Río Aconcagua en Romeral. Se indican variables de regresión lineal, coeficiente $\rho$ de correlación de Spearman y valor $p$ asociado. ....	65
Figura 6.19: Ancho mensual promedio de desembocadura del estuario vs a) caudal mensual promedio marea y b) caudal mensual promedio de desembocadura. Se indican ajuste lineal, coeficiente $\rho$ de correlación de Spearman y valor $p$ asociado.....	66
Figura 6.20: Ancho mensual promedio de desembocadura del estuario vs a) altura significativa mensual promedio, b) periodo de oleaje mensual promedio, c) expresión de transporte LST mensual promedio y d) expresión de transporte CST mensual promedio. Se indica ajuste lineal, coeficiente $\rho$ de correlación de Spearman y valor $p$ asociado.....	67
Figura 6.21: Distribución espacial de los polígonos utilizados en el análisis de rutas de menor costo para los 12 sitios de estudio. Se muestran las máscaras A-B y C-D utilizadas como regiones de búsqueda para las rutas transversal y longitudinal a la barra de arena, respectivamente, además de los puntos semillas A y C y los puntos receptores B y D. Los sitios se presentan de norte a sur y se identifican como (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.....	68
Figura 6.22: Número total de registros satelitales procesados por año natural para los sitios de estudio. ....	70
Figura 6.23: Estado de conexión inferido visualmente a lo largo del registro satelital para los doce sitios en estudio. Los sitios se presentan de norte a sur: (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.....	71
Figura 6.24: <i>Entrance Closure Index</i> (ECI) anual calculado para el registro satelital de los doce sitios en estudio. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	72
Figura 6.25: Estacionalidad registrada del índice ECI para el registro satelital de los doce sitios en estudio. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.....	74
Figura 6.26: Regresión lineal simple sobre las proporciones anuales de estados abiertos ( $1 - ECI$ ). Se presenta recta de tendencia junto a su pendiente $m$ y valor $p$ . Se muestran solamente aquellos sitios que presentan al menos un cambio en su estado de conexión durante el registro estudiado. (a) Elqui, (b) Choapa, (c) Petorca-La Ligua, (d) Aconcagua, (e) Maipo, (f) Cahuil, (g) Mataquito y (h) Itata.....	77
Figura 6.27: Ancho del canal de las desembocaduras para cada registro satelital procesado. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.....	79
Figura 6.28: Ancho mensual mediano del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	80
Figura 6.29: Ancho promedio anual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	81

Figura 6.30: Ancho mediano anual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	82
Figura 6.31: Ancho mensual semestral del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	83
Figura 6.32: Ancho promedio mensual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	86
Figura 6.33: Ancho mediano mensual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	87
Figura 6.34: Ancho promedio y desviación estándar mensual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	88
Figura 6.35: Rango intercuartílico de ancho de desembocadura para los diferentes periodos de interés. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío. ....	89
Figura 6.36: Ancho mensual promedio de desembocadura vs caudal fluvial mensual promedio. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Cáhuil, (h) Mataquito, (i) Maule, (j) Itata y (k) Biobío. ....	91
Figura 6.37: Rango intercuartílico del ancho de desembocadura para los 12 sitios de estudio dentro del periodo de 1985 a 2024. ....	92
Figura 6.38: Área de la cuenca vs ancho de desembocadura promedio para cada sitio de estudio... ..	93
Figura 6.39: Caudal medio vs ancho de desembocadura promedio para los sitios de estudio indicados. ....	93

# 1. Introducción

## 1.1 Motivación

El territorio chileno cuenta con una costa de más de 6.400 kilómetros de longitud continental, extendiéndose de norte a sur a lo largo del borde occidental de Sudamérica. Esta franja litoral se caracteriza por su alto grado de exposición oceánica, una notable diversidad climática y por la abundancia de sistemas de deposición costera, como los estuarios (Perillo, et al., 1999; Dussaillant, et al., 2009; McSweeney, et al., 2017). Los estuarios son cuerpos de agua costeros donde el agua de mar se mezcla con el agua dulce proveniente del drenaje terrestre (Pritchard, 1952), constituyéndose como zonas de transición entre ecosistemas terrestres y marinos. Estos sistemas representan un alto valor ecológico y social, aportando hábitat para diversas especies, facilitando el intercambio de nutrientes y sedimentos, y contribuyendo significativamente a la productividad de las zonas costeras.

Los sistemas estuarinos se encuentran en zonas de un alto dinamismo, en la cual convergen una gran variedad de condiciones oceanográficas, fluviales, atmosféricas y topográficas, las cuales interactúan entre sí llevando a cabo procesos físicos que inducen variabilidad en el comportamiento y configuración geomorfológica de los estuarios (Dalrymple, et al., 1992; FitzGerald, 1996; Ranasinghe, et al., 1999).

En particular, en la zona central de Chile, caracterizada por un clima mediterráneo, es común la presencia de pequeños estuarios de tipo barrera (Behrens, et al., 2013; McSweeney, et al., 2017), los cuales se distinguen por la formación de bancos de arena en su desembocadura formando barreras transversales que obstruyen la conexión del estuario con el océano. La acreción y erosión de estas barreras pueden llevar a este tipo de estuarios a presentar una conexión intermitente con el océano, alternando su estado entre abierto y cerrado (Day, 1980).

El estudio de estuarios en Chile ha cobrado una gran relevancia científica en los últimos años debido al reciente registro de cierres prolongados inéditos en algunas desembocaduras de la zona central (Martinez, 2023). El cierre anómalo de estos sistemas resulta problemático, ya que puede generar una serie de impactos negativos tanto en su funcionamiento natural como en los servicios ecosistémicos que proveen. Por otro lado, considerando la importancia de la fluvimetría en la morfología de la desembocadura de estuarios, este fenómeno adquiere una especial relevancia en un contexto nacional de crisis hídrica (Garreaud, et al., 2019), donde se ha documentado una disminución sostenida en los aportes fluviales de numerosos ríos exorreicos a lo largo de los últimos años (Bozkurt, et al., 2018)

A pesar de esta problemática, la evolución morfológica de estuarios ha sido pobremente cuantificada a nivel nacional, donde la mayoría de los estudios existentes se han enfocado en el

análisis de eventos puntuales o en periodos de tiempo acotados, lo que ha dejado una brecha importante en el entendimiento de sus transformaciones a largo plazo. De tal forma, se sugiere que la comprensión de la evolución morfológica de estos sistemas y su relación con el aporte fluvial resulta una tarea fundamental para anticipar escenarios futuros, gestionar de forma sostenible los sistemas estuarinos y proteger los servicios ecosistémicos que brindan.

Esta investigación tiene por objetivo evaluar la morfodinámica de la desembocadura de los principales sistemas estuarinos en la zona central de Chile en el periodo de los últimos 40 años. Esto se lleva a cabo mediante el uso de técnicas de teledetección y procesamiento automatizado de imágenes satelitales para el registro de la evolución temporal de parámetros morfológicos. Este enfoque representa una oportunidad para monitorear y analizar estos cambios a escalas espaciales y temporales anteriormente inabordables, ofreciendo nuevas herramientas para la gestión integrada de la zona costera.

## 1.2 Objetivos y Alcance

- Objetivo General:

Caracterizar la evolución morfológica de los principales sistemas estuarinos en la zona central de Chile y evaluar su correlación con sus aportes fluviales.

- Objetivos Específicos:

1. Identificar los principales sistemas estuarinos y sus características morfológicas en la zona central de Chile mediante el análisis de registros satelitales históricos
2. Evaluar la evolución temporal del estado de conexión de estuarios intermitentes.
3. Evaluar la evolución temporal del ancho de desembocaduras de estuarios de tipo barrera.
4. Analizar la influencia del caudal de río aportante sobre los parámetros morfológicos de los sistemas estuarinos en estudio.

## 1.3 Organización del documento

El presente documento se estructura en ocho capítulos. En el capítulo 1. se introduce el tema de investigación, se establece el problema abordado, se detallan sus objetivos y se justifica su relevancia científica.

En el capítulo 2. se realiza una revisión de antecedentes clave sobre los estuarios en Chile, su vulnerabilidad y relevancia ecológica, proporcionando un marco regional para el estudio.

El capítulo 3. corresponde al marco teórico de este trabajo. Se explora la definición de estuario y se presentan los principales criterios de clasificación morfológica. Se explica la importancia relativa

de los procesos físicos involucrados en la morfología de un estuario. Además, se presentan los mecanismos de cierre de desembocaduras de estuarios.

En el capítulo 4. se presentan los sistemas estuarinos identificados en la zona central de Chile y se describen los sitios de estudio seleccionados para esta investigación.

El capítulo 5. corresponde a una presentación de la metodología empleada, en la que se describen el enfoque de teledetección y de uso de índices espectrales, los métodos de rastreo de rutas de estuarios y detección automatizada de ancho de desembocaduras, y procedimientos de validación y análisis.

En el capítulo 6. se muestran los resultados obtenidos de los estuarios estudiados. Se presentan los estados de conexión y anchos de desembocaduras históricos y sus características estadísticas principales. Además, se evalúa la correlación del aporte fluvial con los parámetros morfológicos descritos.

El capítulo 7. presenta un análisis y discusión de los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 8. se exponen las conclusiones generales, junto con recomendaciones para investigaciones futuras y aplicaciones en la gestión costera.

## 2. Antecedentes

Los estuarios representan ecosistemas de alta relevancia ecológica, funcional y social, ya que desempeñan un papel clave en la regulación de procesos biofísicos, el mantenimiento de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales. Su ubicación en la interfaz entre ambientes fluviales y marinos los convierte en sistemas naturalmente complejos, altamente dinámicos y vulnerables frente a perturbaciones externas. En el caso chileno, la presencia de estos ecosistemas es particularmente significativa en la zona central, donde los estuarios de tipo barrera suelen asociarse a humedales costeros que actúan como zonas de amortiguamiento de marejadas y oleaje, hábitats de especies endémicas y migratorias, y filtros naturales de contaminantes. Además, cumplen funciones clave como la regulación del régimen hidrológico, el control de inundaciones y la estabilización de sedimentos.

Desde una perspectiva socioeconómica, estos sistemas costeros han sido históricamente utilizados por comunidades locales para actividades como la pesca artesanal, la recolección de mariscos, el turismo de naturaleza y el abastecimiento de agua. En diversas localidades, la salud de los ecosistemas estuarinos condiciona directamente la seguridad hídrica, alimentaria y cultural de sus habitantes. Esta relación estrecha entre comunidad y territorio ha motivado en los últimos años el reconocimiento oficial de numerosos humedales urbanos y estuarios como santuarios de la naturaleza, bajo esquemas de gobernanza colaborativa entre organizaciones sociales, universidades y municipios.

Sin embargo, la creciente presión antrópica ha generado una degradación progresiva de estos ambientes. La expansión urbana desregulada, la extracción de áridos en cauces fluviales, las intervenciones sobre la desembocadura, y la contaminación por aguas servidas o residuos agrícolas han alterado los patrones naturales de circulación de agua y sedimentos, provocando efectos como la eutrofización, la pérdida de biodiversidad y cierre artificial de canales. En algunos casos, estas alteraciones han requerido intervenciones de emergencia por parte de las autoridades para reabrir las desembocaduras, restaurar el flujo de agua y mitigar los impactos sobre la flora y fauna locales.

A estos factores de presión se suma el impacto del cambio climático, el cual se manifiesta de forma aguda en la zona central del país a través de una prolongada crisis hídrica. La megasequía que afecta a Chile desde 2010 ha reducido drásticamente los caudales fluviales, disminuyendo el volumen de agua dulce que alimenta los estuarios y aumentando la frecuencia de cierres prolongados de desembocaduras. Esta situación compromete la conectividad estuarina, favorece la intrusión salina, altera los gradientes ecológicos y pone en riesgo la resiliencia de los sistemas frente a eventos extremos.

En este contexto, resulta evidente la necesidad de profundizar en el conocimiento sobre la evolución morfológica de estuarios chilenos y su relación con las condiciones hidrológicas. Si bien existen investigaciones puntuales en el ámbito de la ecología, la sedimentología y la ingeniería

costera, todavía se observa una cantidad limitada de estudios que aborden la dinámica morfológica de desembocaduras desde una perspectiva multitemporal y a escala regional. La mayoría de los trabajos disponibles se enfocan en estudios de caso, generalmente acotados en el tiempo y en su cobertura espacial, lo que dificulta comprender los patrones de evolución estuarina a largo plazo. Asimismo, se carece de indicadores estandarizados que permitan monitorear la estabilidad de las desembocaduras o anticipar su comportamiento frente a cambios en el caudal fluvial.

Esta investigación busca contribuir al cierre de dicha brecha mediante el análisis evolutivo de estuarios de barrera en la zona central de Chile, considerando como variable clave el caudal de río aportante y reconociendo la importancia de otras forzantes como el oleaje y la marea. Al centrar el enfoque en el comportamiento de las desembocaduras y su relación con el régimen hídrico, se espera generar conocimiento útil para la gestión integrada de zonas costeras, fortaleciendo la toma de decisiones en escenarios de creciente vulnerabilidad socioambiental.

## 3. Marco Teórico

### 3.1 Introducción

Dentro de este capítulo se presenta el marco teórico sobre el cual se desarrolla la presente investigación. Este consta de una revisión de las características morfológicas de los estuarios y de las forzantes hidrodinámicas que se encuentra involucradas en la conformación de estos sistemas

La primera parte de esta sección se centra en estudiar los estuarios a un nivel conceptual, donde se revisa las principales definiciones presentes en la literatura y los diferentes criterios de clasificación morfológicos.

Luego, se presentan los procesos de transporte de sedimentos que controlan la morfología de estuarios para, posteriormente, revisar los mecanismos de cierre de sistemas intermitentes.

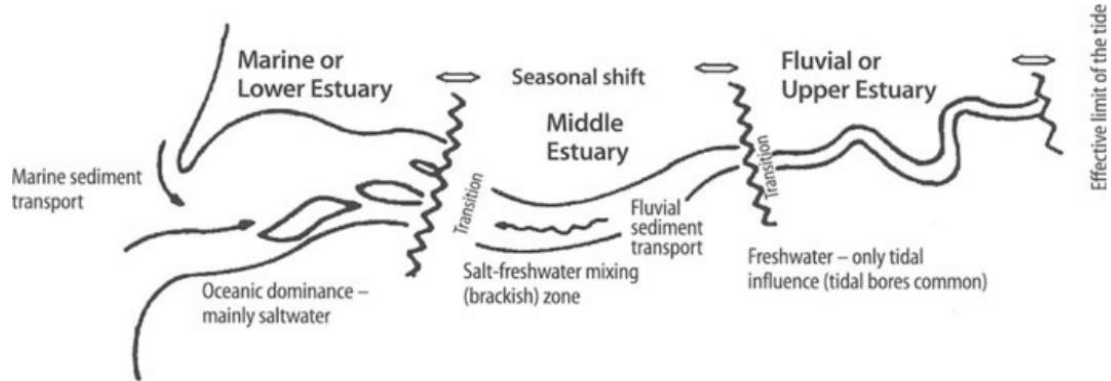
Finalmente, se revisan las forzantes hidrodinámicas involucradas en la configuración morfológica de estuarios y sus principales características en el caso litoral chileno.

### 3.2 Definición de Estuario

Dentro del área de la ingeniería hidráulica en aguas marítimas se distinguen dos entornos principales: las aguas profundas en el mar abierto, cuyas propiedades físicas son relativamente estables, y las aguas someras costeras, caracterizadas por una alta variabilidad hidrodinámica debido a la acción combinada de corrientes de marea, oleaje, escorrentía fluvial y fricción de fondo (Stommel, 1951). Esta complejidad física, junto con el alto valor social y ecológico de la franja litoral, convierte al territorio costero en un área prioritaria de investigación. Dentro de las regiones costeras destacan los estuarios como sistemas clave, cuerpos de agua someros que sirven como conexión ecológica entre los ecosistemas terrestres y marinos.

A partir de diversos estudios multidisciplinarios de los sistemas estuarinos, se han propuesto múltiples definiciones para su caracterización. Una de las primeras definiciones que se puede encontrar en la literatura es la de Ketchum (1951), quien describe a un estuario como un cuerpo de agua en el cual el agua de río se mezcla y diluye mensurablemente con el agua de mar. Posteriormente, Cameron y Pritchard (1963) definen a un estuario como un cuerpo de agua costero semicerrado con conexión libre con el mar abierto y en el cual el agua de mar es diluida mensurablemente con el agua dulce proveniente del drenaje terrestre (definición modificada de la original de Pritchard (1952)), siendo una de las definiciones más aceptadas y utilizadas en la literatura. Dionne (1963) por otro lado, extiende el concepto de estuario al referirse a este como un brazo de mar que penetra dentro de un valle fluvial hasta el límite superior de la influencia de la marea y el cual se puede dividir en tres

sectores (Figura 3.1:). Más adelante, Day (1980) incorpora la propiedad de intermitencia al redefinir la conexión libre con el océano de un estuario la cual puede ser permanente o intermitente. Además de estas definiciones, existen diversas investigaciones que describen a los sistemas estuarinos según diferentes enfoques (Dyer, 1973; Kjerfve, 1989; Dalrymple, et al., 1992).



**Figura 3.1:** Elementos que constituyen un estuario según Dionne 1963 y Perillo 1995 (Perillo, 1995).

Todas estas definiciones resultan de gran interés y pueden tener características útiles, sin embargo, estas pueden presentar ciertas deficiencias y contradicciones que impiden llegar a una mejor generalización. En este sentido, Perillo (1995) propone una definición más completa y comprensiva que pueda ser utilizada en diferentes disciplinas involucradas en la investigación de estuarios:

*“Un estuario es un cuerpo de agua costero semicerrado que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de mareas, dentro del cual el agua de mar que ingresa por una o más conexiones con el mar abierto o cualquier otro cuerpo costero de agua salada, es significativamente diluida por agua dulce derivada del drenaje terrestre, y puede sustentar especies biológicas eurihalinas por una parte o la totalidad de su ciclo de vida”.*

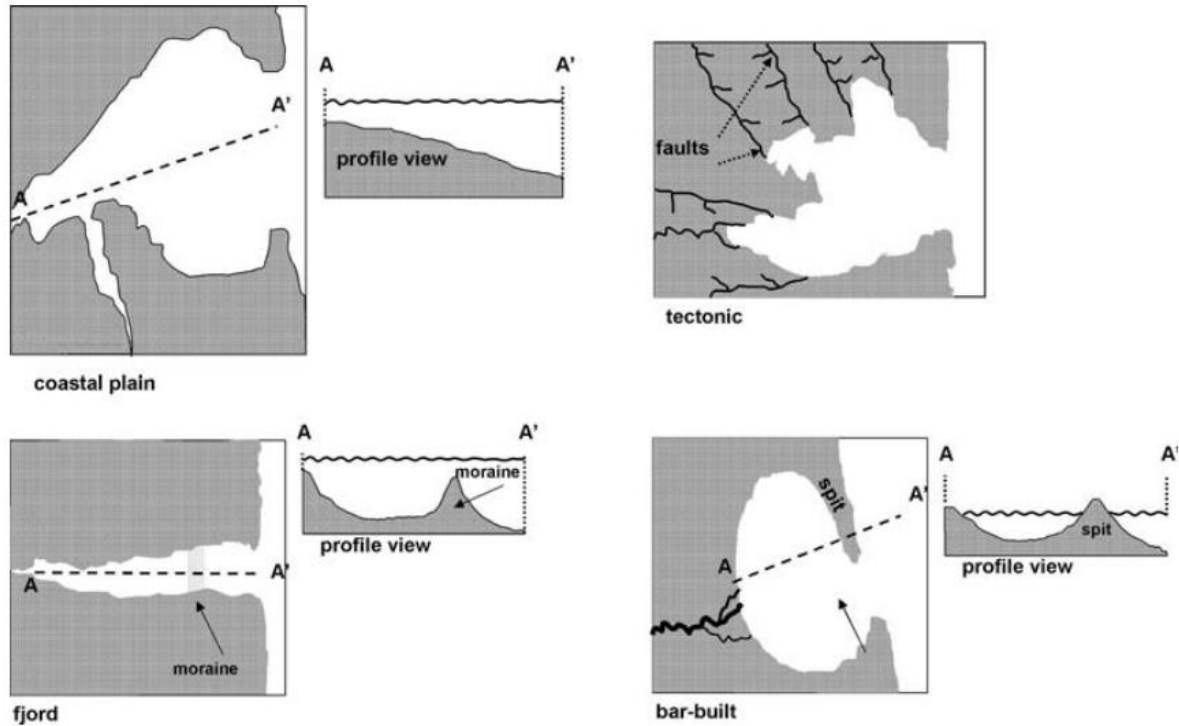
### 3.3 Criterios de Clasificación de Estuarios

Los estuarios son sistemas ubicados en zonas altamente dinámicas como lo es el territorio costero, donde convergen diversas condiciones oceanográficas, hidrológicas, topográficas y climáticas las cuales interactúan entre sí. Esta interacción da lugar a diversos procesos físicos que inducen una alta variabilidad en el comportamiento de los sistemas estuarinos. Frente a esto, surge la necesidad de establecer criterios de clasificación e indicar principios que sean generalmente aplicables a distintos estuarios, permitiendo que estos puedan ser estudiados de una manera similar y contrastar sus diferencias (Stommel, 1951; Ketchum, 1952).

A lo largo del estudio de sistemas estuarinos se han desarrollado diversos criterios de clasificación según el enfoque disciplinario adoptado. De tal forma, es posible encontrar clasificaciones basadas en diferentes aspectos hidrodinámicos, fisicoquímicos, sedimentológicos, o geomorfológicos (Valle-Levinson, 2010). Debido a la permanencia y relativa estabilidad en el tiempo de la morfología en estuarios, los criterios de clasificación geomorfológicos son de especial utilidad para el desarrollo estudios históricos. A diferencia de ciertas variables hidrodinámicas o

fisicoquímicas, la morfología de un estuario tiende a cambiar más lentamente, por lo cual, este se convierte en un parámetro más estable para la clasificación y el análisis comparativo a largo plazo.

El primer autor en implementar un punto de vista geomorfológico en la clasificación de estuarios fue Pritchard (1960), el cual distingue cuatro grupos de estuarios en función de su origen geológico: *valles fluviales ahogados*, *fiordos*, *estuarios tectónicos* y *estuarios de barrera* (Figura 3.2).



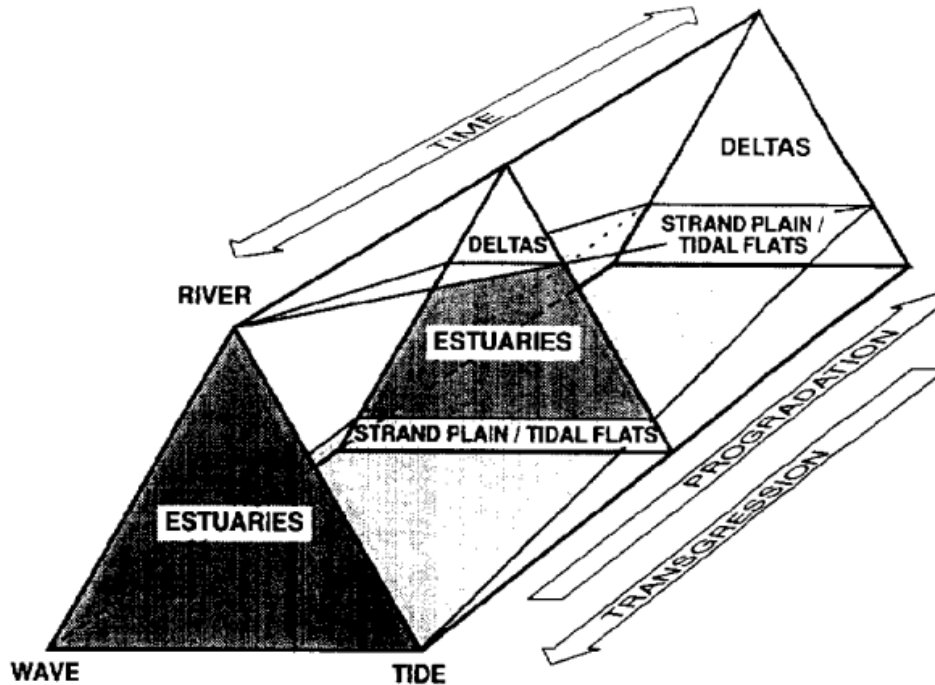
**Figura 3.2:** Clasificación fisiográfica de estuarios según Pritchard (Valle-Levinson, 2010).

En particular, los estuarios de barrera se caracterizan por la formación de bancos de arena sobre la desembocadura, los cuales conforman una barrera transversal la cual obstruye de manera parcial (o total) la conexión del estuario con el océano. Además, se suelen diferenciar de los demás tipos de estuarios por presentar un área transversal más pequeña en su desembocadura (del orden de unos pocos cientos de metros;  $< 100-500$  [m] de ancho), una menor profundidad en su interior y rangos de marea y descargas fluviales de menor escala. A partir de los procesos físicos involucrados en la erosión y acreción de las barreras de arena, este tipo de estuarios puede presentar una conexión intermitente con el océano (Day, 1980), alternando el estado de su desembocadura entre abierta y cerrada. Esto implica alteraciones en la estabilidad del estuario, es decir, en su capacidad natural para conservar su morfología a lo largo del tiempo, sin sufrir cambios significativos.

Otro criterio de clasificación basado en la morfología y de amplia aplicación es el introducido por Hayes (1975). Este utiliza el rango mareal como parámetro de correlación con la morfología de depósitos de arena asociados a estuarios. Siguiendo el esquema de clasificación de costas implementado por Davies (1964), Hayes define tres tipos de estuario: *micromareales* – rango mareal  $< 2$  m; *mesomareales* – rango mareal 2-4 m; *macromareales* – rango mareal  $> 4$  m.

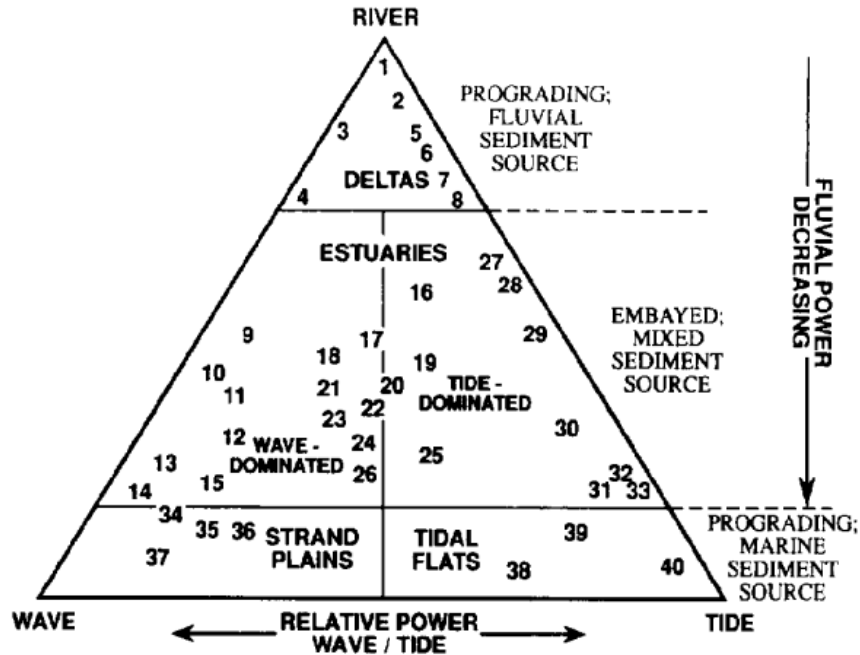
### 3.4 Modelo Geomorfológico de Dalrymple

Dalrymple et al. (1992) implementan un modelo de clasificación geomorfológico en donde propone una estructura conceptual para la clasificación de estuarios a partir de su relación con otros sistemas costeros de depositación y la importancia relativa de los procesos físicos que operan y su evolución en el tiempo. Este modelo da como resultado el siguiente prisma (Figura 3.3), en donde se combinan los procesos físicos involucrados (caudal de río aportante, marea y oleaje) y aspectos temporales expresados en términos de los fenómenos de transgresión y progradación.



**Figura 3.3:** Clasificación evolutiva de medioambientes costeros. El eje longitudinal del prisma tridimensional representa el tiempo relativo en referencia a cambios en el nivel relativo del mar y el aporte de sedimento (transgresión y progradación). Las tres esquinas del prisma corresponden las condiciones dominantes por procesos fluviales, de oleaje y de marea (Dalrymple, et al., 1992).

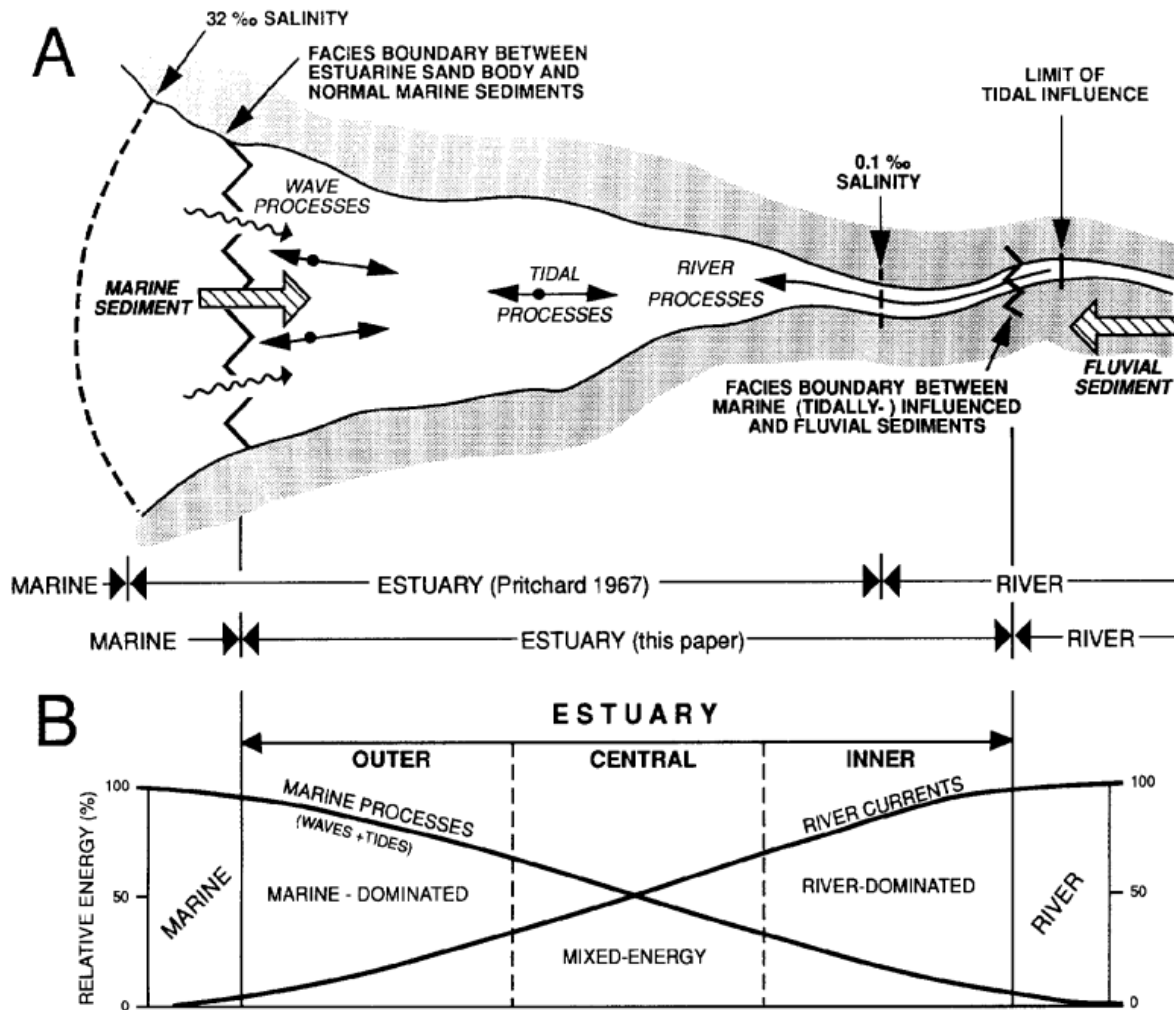
La sección vertical del prisma se utiliza para clasificar el sistema de depositación costera (Figura 3.4); la parte superior del triángulo corresponde a sistemas deltaicos, en donde el aporte sedimentario es principalmente de origen fluvial. La franja inferior en la base del triángulo indica llanuras de cordones litorales en progradación o planicies intermareales, sistemas en los que el principal aporte sedimentario tiene su origen en procesos relacionados a la marea y al oleaje. Finalmente, el área trapezoidal en el centro proporciona una estructura de clasificación de estuarios.



**Figura 3.4:** Sección transversal del prisma de clasificación costera (Dalrymple, et al., 1992).

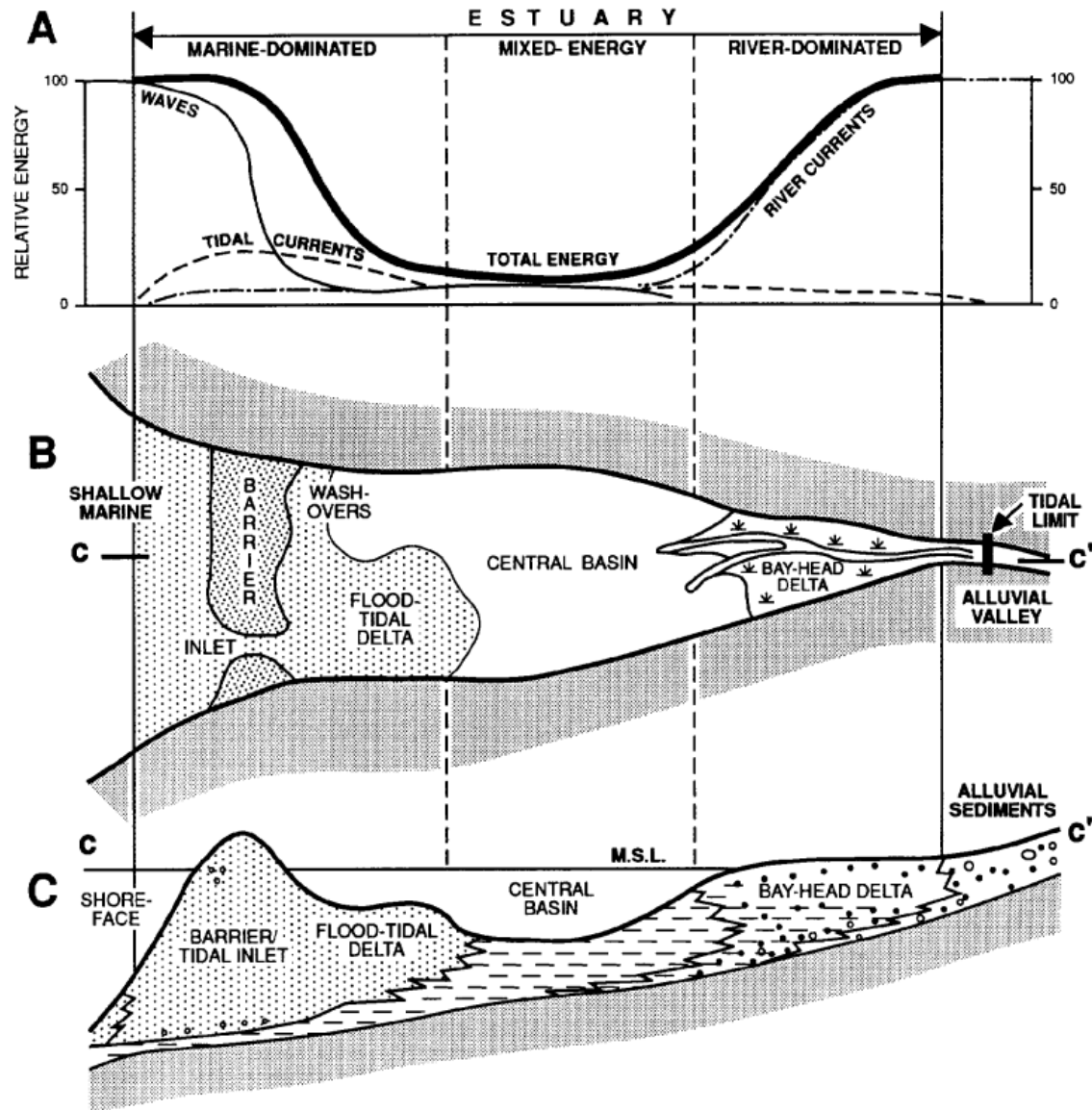
Siguiendo la clasificación de costas de Hayes (1979) y de Davis y Hayes (1984), Dalrymple divide a los estuarios en dominados por el oleaje y dominados por la marea, donde el grado de influencia del río varía de débil a fuerte en cada categoría. De esta forma, se considera que una categoría dominada por efectos fluviales sería innecesaria, ya que la influencia relativa del río determina principalmente el rango en que el estuario se llena y no altera la morfología fundamental del sistema.

Mediante este enfoque, Dalrymple et al. (1992) desarrollan un modelo conceptual de estuarios basado en términos energéticos el cual se divide en tres zonas: una zona externa, dominada por procesos marinos (oleaje o marea), una zona central de baja energía relativa y una zona interna, dominada por procesos del río (Figura 3.5).



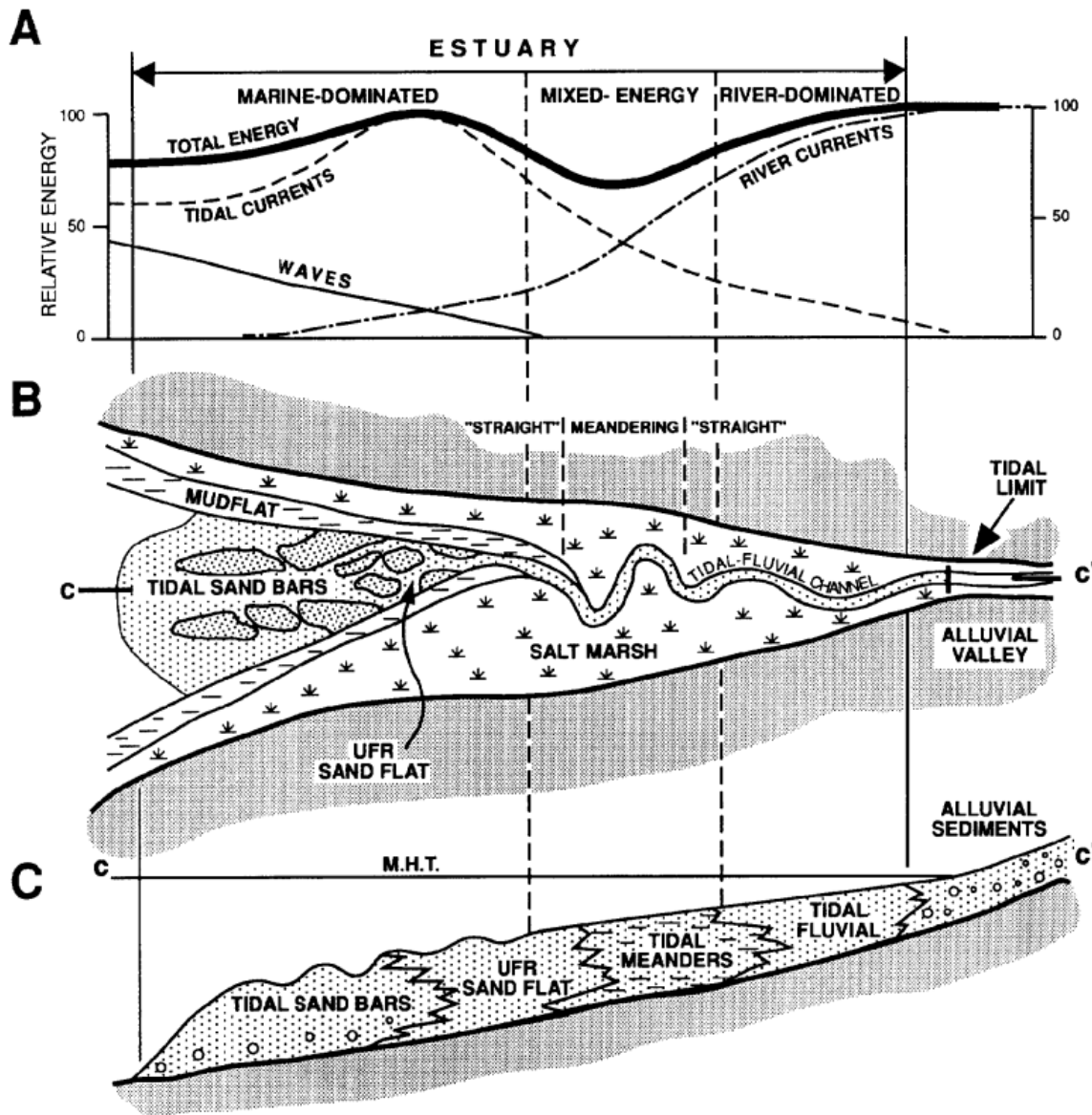
**Figura 3.5:** A) Representación esquemática de la definición de estuario de Pritchard (1967) y Dalrymple et al. (1992), y la zonificación tripartita de facies resultante. B) Distribución esquemática en términos energéticos de los procesos físicos que operan dentro de un estuario (Dalrymple, et al., 1992).

En los estuarios dominados por el oleaje, la influencia de la marea se considera de menor escala y la boca del sistema presenta una alta energía de oleaje. Este superávit energético induce un transporte de sedimentos a lo largo y a través de la costa hacia la boca del estuario, formando bancos o barreras de arena. Por otro lado, la energía fluvial derivada del caudal de río aportante presenta un máximo en la cabecera del sistema, decreciendo en dirección al mar debido a la disminución del gradiente hidráulico (Figura 3.6).



**Figura 3.6:** Distribución de A) Tipos de energía, B) Componentes morfológicos en vista en planta, y C) dacies sedimentarias en una sección longitudinal dentro de un estuario dominado por el oleaje idealizado (Dalrymple, et al., 1992).

Por otro lado, en estuarios dominados por la marea, la energía de corrientes mareales será superior a la energía de oleaje en la boca del estuario. Al ingresar al estuario, la marea de inundación se comprime progresivamente a una sección transversal más pequeña, dada su geometría en forma de embudo, característica de este tipo de estuarios (Wright, et al., 1973). Esto genera un aumento relativo de la energía de marea, la cual, tras superar una cierta distancia, se disipa por efectos de fricción, alcanzando el cero en el límite mareal. La energía fluvial disminuye en dirección al mar al igual que en un sistema dominado por el oleaje (Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Distribución de A) Tipos de energía, B) Componentes morfológicos en vista en planta, y C) Facies sedimentarias en una sección longitudinal dentro de un estuario dominado por la marea idealizado (Dalrymple, et al., 1992).

Siguiendo el modelo conceptual propuesto por Dalrymple et al. (1992), se deja en evidencia que la morfología de los estuarios se encuentra íntimamente relacionada con la interacción entre los distintos procesos hidrodinámicos que los afectan (caudal de río, oleaje y marea). Estos forzantes no solo determinan la distribución energética del estuario, sino que también condicionan los patrones de transporte y depositación de sedimentos, así como la evolución geomorfológica de sus componentes internos. En este contexto, resulta fundamental comprender cómo estos mecanismos físicos influyen en la configuración y dinámica de las unidades morfológicas presentes en estuarios. De tal forma, es necesario abordar en detalle los procesos que controlan la morfología y el transporte de sedimentos en sistemas estuarinos, con énfasis en su vínculo con los forzantes hidrodinámicos que los gobiernan.

### 3.5 Morfología y Transporte de Sedimentos en Estuarios

La morfología de los estuarios de barrera y de su desembocadura está gobernada por un balance de sedimentos, en el cual existe una importación de material hacia la barrera costera y una erosión de esta misma. El transporte de sedimentos se encuentra controlado por el movimiento de las mareas, el caudal de río aportante y el oleaje y viento que afectan al sistema estuarino, así como la interacción misma entre estos fenómenos.

Los primeros estudios de intrusiones mareales y desembocaduras de estuarios indican que estas se mantendrían abiertas a lo largo de la barra costera principalmente por el efecto de las mareas (Escoffier, 1940). El aumento de la marea en el océano provoca un flujo hacia el interior del estuario, conocido como marea de inundación (flood-tide). Luego, cuando la marea vuelve a descender, invierte la dirección del flujo desde el interior del estuario hacia el mar, generando una marea conocida como de refluo (ebb-tide). O'Brien (1969) presenta un diagrama idealizado de este fenómeno (Figura 3.8) en donde manifiesta que las corrientes cercanas a la costa convergen desde todas las direcciones hacia el interior y el exterior del estuario durante las mareas de inundación y de refluo respectivamente, esto sin considerar los efectos de las condiciones de oleaje inducidas por vientos locales, o el efecto de circulaciones oceánicas mayores. Estas corrientes mareales, tanto de inundación como de refluo, son responsables de la remoción continua de sedimentos que pueden encontrarse en la desembocadura (Hayes, 1975; FitzGerald, 1976) (Figura 3.9). Durante la marea de inundación, es posible que los sedimentos acumulados en la entrada al estuario sean transportados hacia su interior, mientras que la marea de refluo puede transportar los sedimentos hacia el exterior, en ambos casos formando bancos de arena sedimentados o "deltas", ya sea sobre la laguna costera o a las orillas del océano. De esta forma, la marea es considerada como el principal agente erosivo en la desembocadura de estuarios dado el flujo que se produce en el canal de conexión.

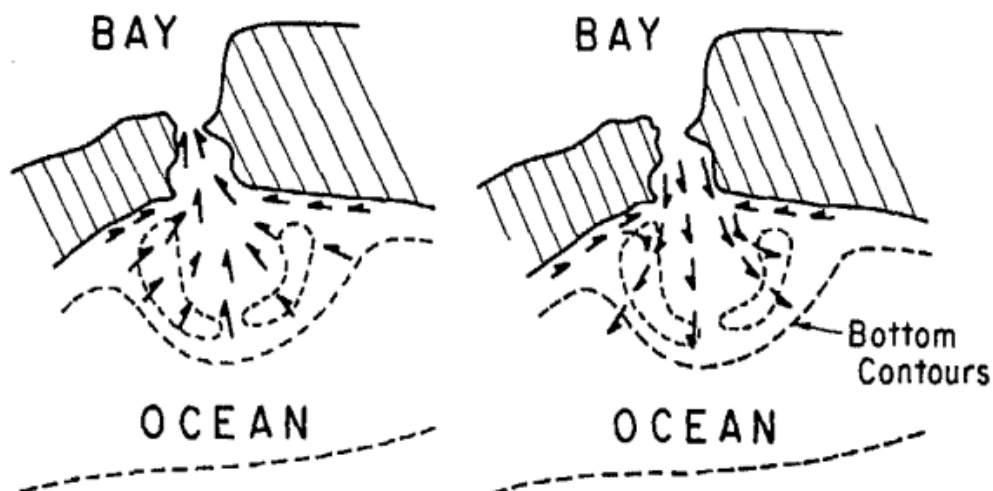
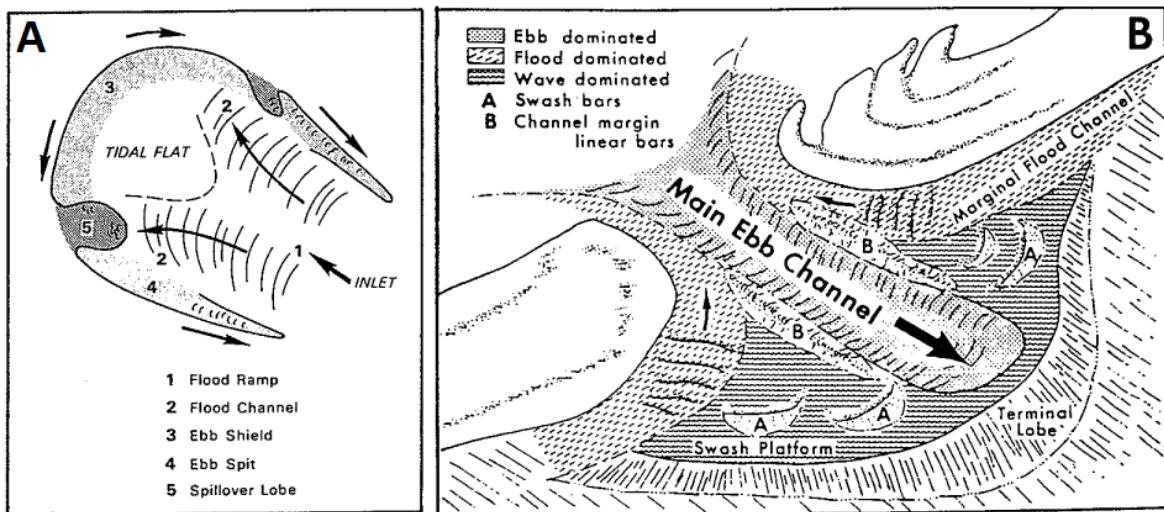


Figura 3.8: Diagrama idealizado de mareas de inundación y refluo sobre un estuario (O'Brien, 1969).



**Figura 3.9:** A) Modelo de marea de inundación (Hayes, 1975). B) Modelo de marea de reflujo (FitzGerald, 1976) (Modificado de FitzGerald (1996)).

Además del flujo marea a través del canal de conexión del estuario con el océano, otro componente que puede llegar a ser fundamental en la morfología de estos sistemas es el caudal aportante por el río asociado. En algunos estuarios de mayor tamaño, la contribución del drenaje terrestre no tiene una mayor relevancia en la morfología del sistema, ya que el caudal del río simplemente se suma al reflujo marea que es transportado hacia el océano y es el comportamiento de la marea o el del oleaje el que sigue dominando el proceso. Sin embargo, en desembocaduras relativamente pequeñas, el caudal de descarga puede llegar a ser más importante que el flujo de mareas en la definición de la morfología del estuario y su barra de arena. Esto ha sido demostrado especialmente en estuarios con caudales aportantes de alta variabilidad, en donde las altas descargas incluso llegan a impedir la entrada de mareas a través de la desembocadura hacia el estuario (Largier, 1992; Ranasinghe, et al., 1999).

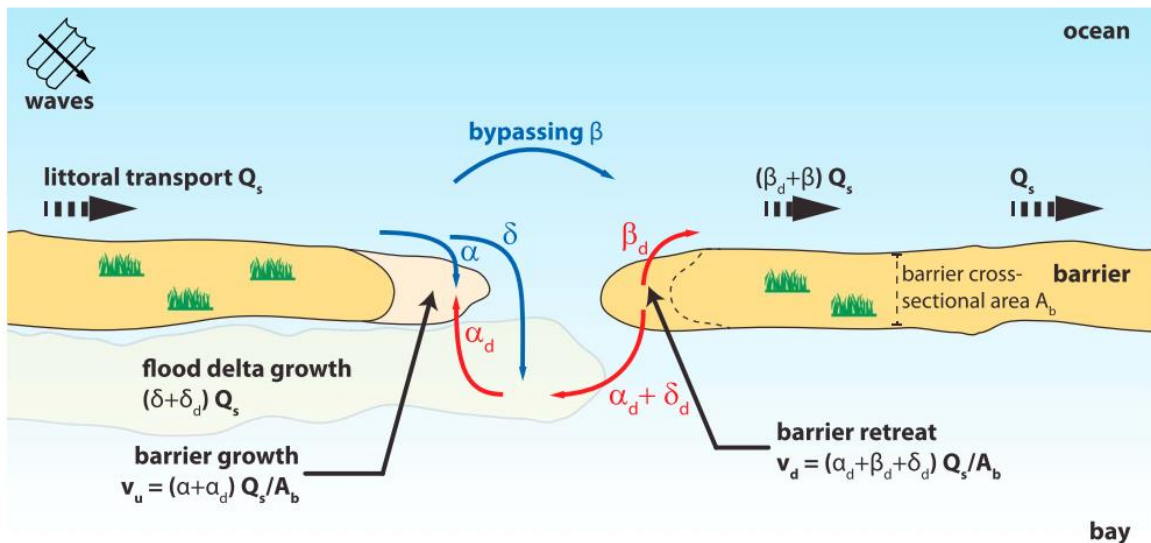
Sumado a esto, para sistemas estuarinos más pequeños, las descargas de agua dulce provenientes de los ríos que se originan en cuencas de una alta pendiente son de gran importancia en el transporte de sedimentos y son consideradas como los principales contribuyentes de sedimentos a los océanos de todo el mundo (Syvitski, et al., 2003). El transporte de sedimentos en ríos dependerá de su modo de transporte, el cual puede ser por suspensión o por arrastre de fondo, y del tipo de sedimento, sin embargo, este sedimento, tal como se mencionó anteriormente, suele ser transportado directamente al océano y no contribuiría en la acreción de desembocaduras. De esta forma, el caudal de río aportante se considera más bien una componente erosiva en las desembocaduras debido a su flujo en dirección al océano (FitzGerald, 1996; Perillo & Piccolo, 2011). Esta componente resulta sumamente variable ya que dependerá de una sumatoria de procesos hidrológicos e incluso antropogénicos que se llevan a cabo aguas arriba de la descarga del río, por lo cual, su variación en el tiempo puede ser fundamental en la evolución que presente la desembocadura de un estuario.

Por otro lado, el oleaje, generado por la acción del viento sobre la superficie del mar, es otro fenómeno que desempeña un rol fundamental en el transporte sedimentario a lo largo de las zonas costeras. El oleaje es el agente principal en lo que se conoce como deriva litoral, que corresponde a un movimiento longitudinal de sedimentos paralelo a la costa, impulsado por la incidencia oblicua

del oleaje. Este fenómeno proporciona una componente más bien sedimentológica, en la cual su interacción con las corrientes de mareas que ingresan a la laguna costera será fundamental para definir la morfología del estuario y el estado de conexión que presente su desembocadura con el océano (Escoffier, 1977; FitzGerald, 1996; Valle-Levinson, 2010). En algunos estuarios puede ocurrir lo que se conoce en la literatura como *bypassing*, donde parte de la deriva litoral puede sobrepasar la desembocadura y seguir su curso a lo largo de la corriente costera (O'Brien, 1969).

Dado que los estuarios de barrera se caracterizan por la presencia de una barra de arena que se interpone entre el cuerpo estuarino y el océano abierto, es razonable que este tipo de sistemas se desarrolle preferentemente en costas micromareales dominadas por el oleaje. De esta forma, en dichos entornos, el oleaje, a través de la deriva litoral, se convierte en el principal agente responsable de la formación de barreras de arena (Hayes, 1975; FitzGerald, 1996; Ranasinghe & Pattiaratchi, 2003).

Otro fenómeno interesante de abordar en la morfología de estuarios es la “migración” de desembocaduras, la cual se encuentra dominada por la deriva litoral provocada por el oleaje (Johnson, 1919). El mecanismo de migración de desembocaduras a lo largo de la costa se explica por un proceso en el cual el oleaje y la deriva litoral provocan una sedimentación en la barra de arena del extremo superior a la desembocadura, y otro proceso de erosión sobre la barra de arena del extremo inferior a la desembocadura, esto debido a las corrientes mareales sobre el canal de conexión del estuario con el océano (Bruun, 1978; Inman & Dolan, 1989). Para un mejor entendimiento de este proceso se presenta el siguiente diagrama (Figura 3.10) del modelo de balance de masas en la migración de desembocaduras propuesto por Nienhuis y Ashton (2016). Este fenómeno se presenta en la mayoría de los casos mediante una migración en dirección de la corriente litoral, sin embargo, existen algunos casos en los cuales la migración de desembocaduras se manifiesta en la dirección contraria. Los estudios al respecto han demostrado que la presencia de este fenómeno coincide con un aumento en la frecuencia de tormentas y un marcado *bypassing* del delta de reflujos (Aubrey & Speer, 1984).



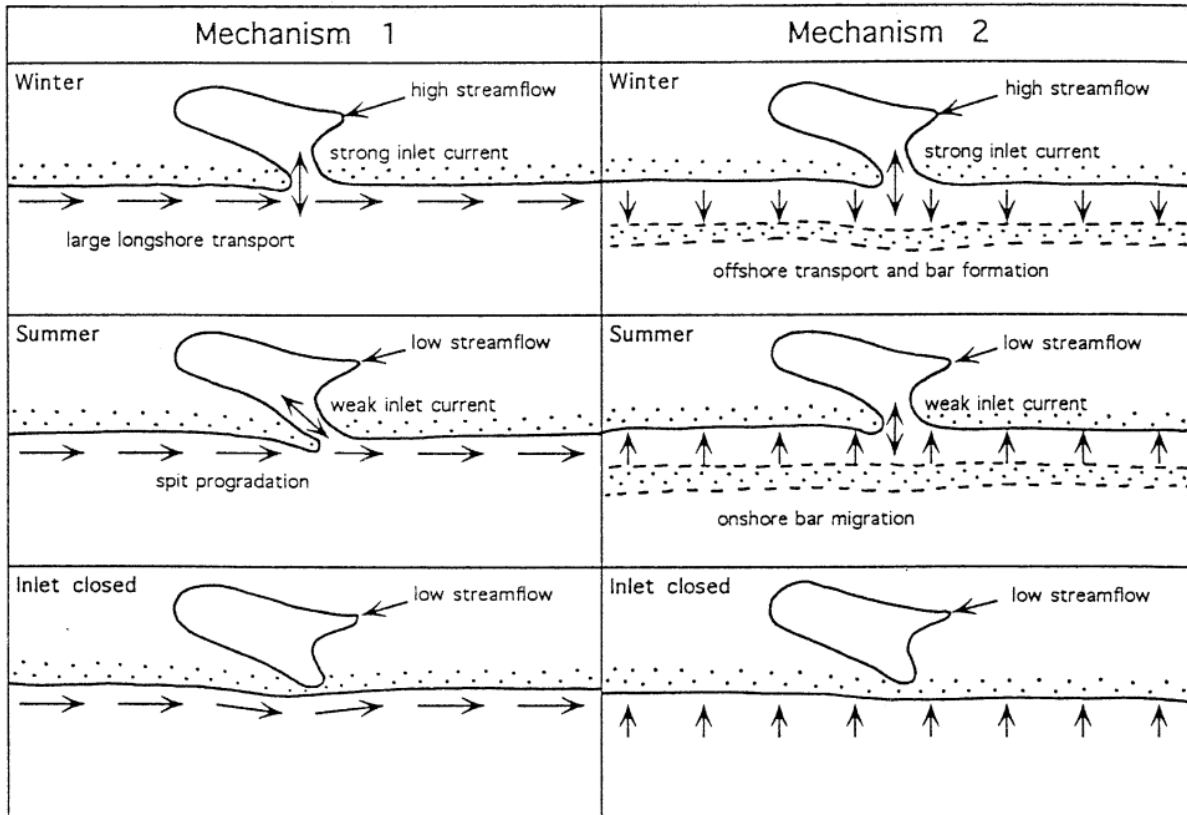
**Figura 3.10:** Diagrama de modelo de balance de masas para la migración de desembocaduras propuesto por Nienhuis y Ashton (Nienhuis & Ashton, 2016).

### 3.6 Mecanismos de Cierre de Estuarios

La gran variedad de procesos involucrados en el transporte de sedimentos y evolución morfológica de sistemas estuarinos plantea la necesidad de implementar diferentes modelos morfodinámicos. Existen diferentes estudios que han hecho un intento por explicar la variabilidad en la morfología de intrusiones mareales y estuarios (Galvin, 1971; Oertel, 1975; Nummedal & Fischer, 1978; Hubbard, et al., 1979; Penland, et al., 1988), sin embargo, ninguna de estas investigaciones se centra en el entendimiento de los procesos que generan el cierre e intermitencia de desembocaduras. Ranasinghe (1999; 2003) aborda, de manera más detallada, las causas y efectos del cierre de la desembocadura de estuarios.

Con el objetivo de identificar los procesos morfodinámicos que gobiernan este fenómeno y su intermitencia, Ranasinghe y Pattiaratchi (2003) proponen dos categorías principales de mecanismos de cierre de desembocaduras. El primer mecanismo, considerado el más frecuente, se refiere a la interacción entre la corriente que se presenta a lo largo del canal de desembocadura y la corriente a lo largo de la costa. Este se desarrolla a partir de una corriente del canal de gran escala el cual interrumpe el flujo paralelo a la costa y su deriva litoral. Esto genera un embancamiento de arena en la barrera que se encuentra antes de la desembocadura, luego, este embancamiento y acumulación de sedimento seguirán creciendo a partir de la deriva litoral hasta generar una elongación de la barrera la cual se atravesará sobre la desembocadura (Figura 3.11). La interrupción de la conexión del estuario con el océano dependerá de la fuerza del flujo a través de la desembocadura. Si esta es lo suficientemente fuerte, no existirá una elongación de la barrera superior debido a que esta sería erosionada. Sin embargo, si el flujo de la desembocadura no es el suficiente, la acreción y elongación de la barrera seguirán en aumento hasta llegar a cerrar por completo la desembocadura.

El segundo mecanismo mencionado es con respecto a la interacción entre la corriente del canal de desembocadura y el transporte de sedimentos que se encuentra frente a la costa. Para entender este mecanismo, es importante señalar el origen de los bancos de arena que se forman longitudinalmente frente a la desembocadura de un estuario. Estos bancos de arena se suelen formarse de manera paralela a la línea de la costa debido a la refracción del oleaje, que transporta arena erosionada y provoca sedimentación en la zona de rompiente. Luego, si la corriente de refluo presente en la desembocadura del estuario no es suficiente, la presencia de condiciones de oleaje tipo *swell* intensificará el transporte de arena paralela a la costa hasta avanzar hacia a la entrada de la desembocadura y eventualmente cerrarla (Figura 3.11).



**Figura 3.11:** Esquema de mecanismos de cierre de desembocaduras mediante procesos litorales y transversales (Ranasinghe & Pattiaratchi, 2003).

### 3.7 Forzantes Hidrodinámicas

Tal como se ha visto, la morfología de estuarios se encuentra en gran parte influenciada por diferentes forzantes hidrodinámicas, siendo estas la marea, el oleaje y el caudal de río aportante. Entender las características de dichas forzantes para el litoral chileno, resulta una tarea fundamental para la caracterización de los sistemas estuarinos.

#### 3.7.1 Mareas

Las mareas son oscilaciones periódicas del nivel del mar generadas por la interacción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol, de tal manera que la posición relativa de estos tres cuerpos establece la variación en la amplitud de las mareas. Cuando la Luna, el Sol y la Tierra se encuentran alineados, las fuerzas gravitacionales solar y lunar se suman, generando un rango de marea máximo, lo que se denomina marea viva. En estos eventos, las pleamares (mareas altas) alcanzan niveles más altos y las bajamares descienden más de lo habitual. Por el contrario, cuando la Luna y el Sol se encuentran en un ángulo recto respecto a la Tierra, sus fuerzas se contrarrestan, reduciendo el rango mareal. Este fenómeno se denomina marea muerta, caracterizado por pleamares más bajas y bajamares menos profundas.

Desde el enfoque de ciclos diarios, las mareas se clasifican según la cantidad y desigualdad de pleamares y bajamares en un día, distinguiéndose tres regímenes mareales: diurno, semidiurno y

mixto. La marea diurna se caracteriza por presentar una pleamar y una bajamar diaria, La marea semidiurna, en cambio, presenta dos pleamares y dos bajamares diarias con alturas similares, mientras que la marea mixta también presenta dos ciclos diarios, pero con diferencias notorias entre las alturas de cada ciclo.

En particular, en la costa continental chilena predomina la presencia de un régimen mixto, caracterizado por dos mareas altas y bajas al día, con desigualdades significativas entre ellas (SHOA, 2002). El rango mareal que presentan costas expuestas como el litoral central chileno es relativamente reducido, usualmente menor a 2 metros, lo que lo clasifica como un ambiente micromareal según la topología de Hayes (1975).

En los sistemas estuarinos, el rango de marea determina el prisma mareal, volumen de agua que entra y sale del estuario en cada ciclo mareal. Este volumen se calcula como el producto del área de la superficie del cuerpo estuarino por el rango mareal. Un prisma mareal alto favorece corrientes más intensas de inundación y vaciante, lo que facilita la movilización de sedimentos y la erosión del canal de desembocadura, pudiendo evitar su cierre prolongado. Por el contrario, un prisma mareal reducido limita la capacidad de renovación de aguas y aumenta la posibilidad de acumulación de sedimentos en la barrera arenosa, promoviendo la posibilidad de cierres temporales del sistema estuarino.

Siguiendo a Keulegan (1967), el caudal resultante transportado a través del canal de desembocadura se puede estimar a través de un balance de masa que involucra tanto a la marea como al caudal del río aportante:

$$Q_d = -A_s \frac{d\eta_e}{dt} + Q_r \quad (3.1)$$

donde  $A_s [L^2]$  indica la superficie del estuario,  $\eta_e [L]$  es el nivel de agua al interior del estuario, y  $Q_r [L^3T^{-1}]$  es el caudal del río aportante. En este contexto, la variación del nivel de agua  $\eta_e$  se encuentra directamente relacionada con el ciclo mareal, pudiendo aproximarse a partir del rango de marea, es decir, la diferencia entre el nivel de pleamar y bajamar, y el intervalo de tiempo que transcurre entre ambos eventos. De esta forma, si se conoce el rango mareal  $h_t$  y el tiempo transcurrido entre pleamar y bajamar  $\Delta t$ , se puede estimar una tasa de cambio del nivel de agua promedio.

En general, el rango mareal se considera relativamente constante en el tiempo, especialmente en comparación con otras forzantes que presentan una mayor variabilidad. Existe evidencia de variaciones estacionales e interanuales del nivel medio del mar (Doughty, et al., 2016; Thorne, et al., 2021), sin embargo, estas oscilaciones no modificarían significativamente el rango mareal, lo cual justifica que, en el análisis de sistemas estuarinos a escala de décadas, pueda considerarse una variable relativamente estable en comparación con el caudal de río o el oleaje.

### 3.7.2 Oleaje

El oleaje corresponde a perturbaciones de la superficie del mar generadas principalmente por la acción del viento sobre el agua. Las olas son propagadas a través de la superficie marina y pueden clasificarse dos tipos principales según su origen y características: oleaje de mar de viento (sea) y de

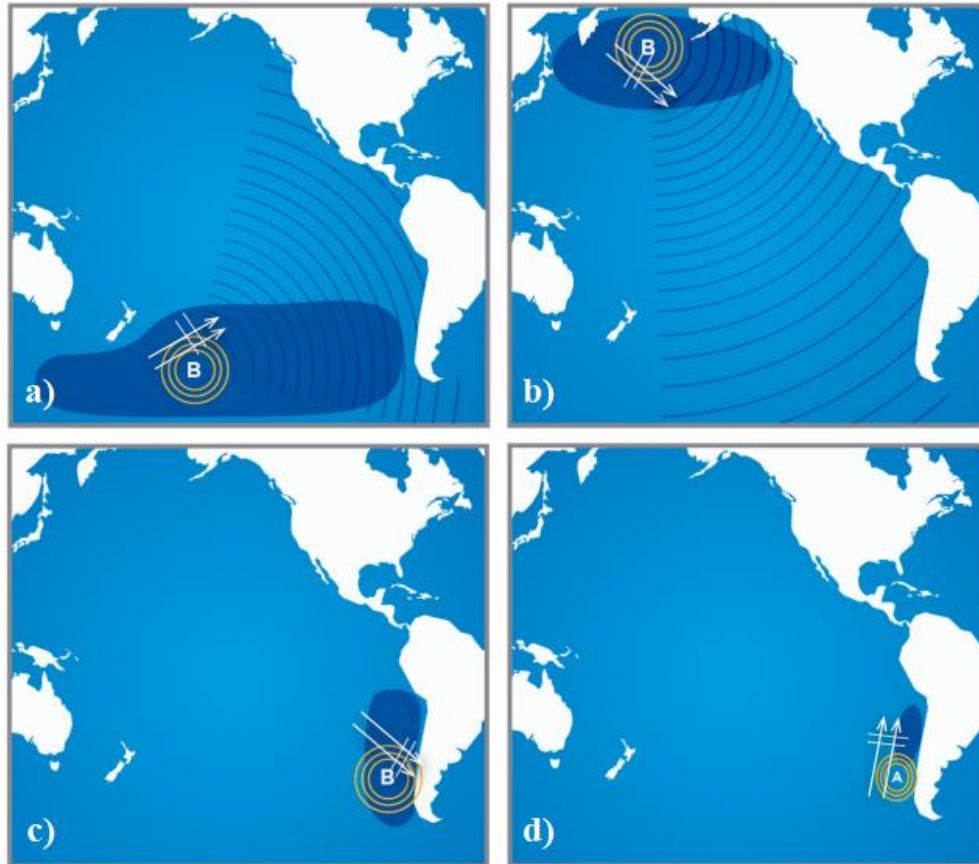
mar de fondo (*swell*). El primer tipo es generado por vientos locales y suele estar compuesto por ondas desordenadas y de corto período, mientras que el segundo se origina en tormentas distantes, dando lugar a trenes de olas más ordenados, de mayor período y con mayor capacidad de transporte de energía (Holthuijsen, 2007).

Entre los parámetros fundamentales para caracterizar el oleaje se encuentran: la altura significativa, medida que representa la altura promedio del tercio más alto de olas registradas en un intervalo de tiempo, el período de olas, tiempo de paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto, y la dirección de propagación, es decir, el rumbo desde donde proviene el oleaje. Estos elementos son esenciales para comprender los procesos de interacción del oleaje con la costa y los sistemas estuarinos.

La costa chilena se encuentra expuesta al océano Pacífico suroriental, donde el clima de oleaje está controlado por un mar de fondo reinante proveniente del suroeste, el cual se origina en el cinturón de vientos Oeste ( $40^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{S}$ ) en el Pacífico sur (Figura 3.12a). Dada la vasta extensión del territorio chileno, el mar de fondo reinante presenta diferentes características a distintas latitudes. En el caso de la zona central de Chile, más alejada de la zona de generación del oleaje, el decaimiento y dispersión angular y de frecuencias de la energía del oleaje implican alturas significativas medias menores ( $H_S \sim 2\text{ m}$ ) y períodos medios levemente superiores ( $T_m \sim 9\text{ s}$ ) respecto a la zona más austral, y una incidencia en el oleaje desde la dirección suroeste de escasa dispersión (Beyá, et al., 2016).

Además del mar de fondo del suroeste, en las costas chilenas se presenta el mar de fondo del noroeste, generado por ciclones extratropicales en el Pacífico norte (Figura 3.12b). Este presenta una mayor relevancia en los meses de primavera y verano e incide desde la dirección noroeste, lo que contribuye a la formación de un oleaje de características multimodales.

Por otro lado, los intensos vientos cercanos a la costa dan origen a un oleaje oceánico local de viento, el cual afecta a la zona central del país principalmente por dos procesos. El primero se encuentra asociado a ciclones extratropicales (Figura 3.12c) y se caracteriza por fuertes vientos provenientes del noroeste e intensas marejadas, siendo estos más frecuentes durante los meses de invierno. El segundo hace referencia a lo que se denomina como “surazo” (Figura 3.12d), un chorro atmosférico costero proveniente del sur el cual genera mar de viento local de alta frecuencia, especialmente en los meses de primavera y verano.



**Figura 3.12:** Zonas de generación del oleaje de mar de fondo y de viento que inciden sobre el borde costero chileno (Modificado de Atlas de Oleaje UV (2016))

El oleaje desempeña un rol fundamental en la morfodinámica de los sistemas estuarinos, donde este podría influir en la apertura y cierre de la desembocadura de estuarios. El oleaje incidente desde mar abierto transporta sedimento hacia la desembocadura del estuario, contribuyendo a la acreción de la barrera de arena asociada. Como se vio en la sección 3.6, existen dos mecanismos de importación de sedimento hacia la desembocadura de un estuario: el transporte transversal de bancos de arena formados paralelos a la línea de la costa (cross-shore transport, CST) y el transporte longitudinal de sedimentos a través de la deriva litoral (longshore transport, LST).

Diversos estudios (Bowen, 1980; Sallenger, 2000; Dean & Dalrymple, 2004) han desarrollado un marco teórico en el cual el transporte cross-shore resulta del desequilibrio entre flujos de sedimento hacia la costa (onshore), impulsados por la oscilación del *swash*, y hacia mar adentro (offshore), generados por corrientes de retorno. El transporte neto tenderá a ser hacia mar adentro durante condiciones de tormenta y hacia la costa bajo condiciones de oleaje de baja energía (*swell*). Cooper (1990) demostró que este mecanismo de transporte sedimentario adquiere una mayor relevancia inmediatamente después de eventos de apertura de desembocaduras.

Este tipo de transporte de sedimentos es menos frecuente y, dada su fuerte dependencia en las condiciones de oleaje, la morfología de la playa y los eventos de tormenta, presenta una alta variabilidad tanto temporal y como espacial. Por esta razón, resulta difícil establecer fórmulas estandarizadas para su estimación. Sin embargo, a partir del análisis conceptual de diferentes estudios

(Bowen, 1980; Masselink & Hughes, 2003), se desprende que el transporte cross-shore ( $Q_{CST}$ ) se encuentra controlado principalmente por la energía del oleaje, el período de las olas y la pendiente de la playa, siendo generalmente proporcional a la altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) e inversamente proporcional al periodo ( $T$ ):

$$Q_{CST} \sim \frac{H_s}{T} \quad (3.2)$$

Por otro lado, el transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa ( $Q_{LST}$ ), conocido como deriva litoral, es generado principalmente por la acción del oleaje que incide oblicuamente sobre la línea de la costa. Esta incidencia angular induce una componente de flujo de energía paralela a la costa la cual provoca el desplazamiento neto de sedimentos en dirección de la corriente litoral. En zonas con exposición predominante al oleaje, este proceso se convierte en el principal mecanismo de redistribución de arena a lo largo del litoral (Komar, 1998; Dean & Dalrymple, 2004).

Siguiendo un enfoque energético, el flujo de sedimentos transportados hacia la desembocadura de estuarios mediante este mecanismo se considera proporcional a la componente longitudinal de la potencia de oleaje por unidad de longitud ( $P_l$ ), la cual se puede estimar a través de la siguiente ecuación (U.S. Army Corps of Engineers, 1984):

$$Q_{LST} \sim P_l = \frac{1}{16} \rho_o g H_s^2 C_g \sin(2\theta_b) \quad (3.3)$$

donde  $\rho_o$  [ $ML^{-3}$ ] es la densidad del agua de mar,  $g$  [ $LT^{-2}$ ] indica la aceleración de gravedad,  $H_s$  [ $L$ ] es la altura significativa,  $C_g$  [ $LT^{-1}$ ] es la velocidad de grupo de las olas incidentes y finalmente  $\theta_b$  [ $^\circ$ ] indica el ángulo incidente sobre la costa.

Una característica distintiva del transporte litoral es su persistencia en el tiempo, especialmente en costas rectilíneas y expuestas a oleajes dominantes, lo cual favorece la formación de estructuras sedimentarias como espigas, bancos litorales o incluso el desplazamiento progresivo de barras de arena. No obstante, su magnitud puede variar significativamente en función de la estacionalidad del clima de oleaje, siendo más intenso durante épocas de mayor energía y más débil en condiciones dominadas por oleaje tipo *swell* de baja energía.

### 3.7.3 Caudal de Río Aportante

El caudal de río se define como el volumen de agua que influye a través de una sección transversal del cauce por unidad de tiempo, y se expresa comúnmente en metros cúbicos por segundo. Este parámetro hidrológico refleja el comportamiento de la escorrentía superficial generada por precipitaciones, deshielos o aporte subterráneo de la cuenca de drenaje del río. El caudal determina en gran medida la cantidad de agua dulce que ingresa al estuario, influenciando procesos como la estratificación salina, el transporte de sedimentos y nutrientes, y la posición de la interfaz de mezcla entre agua dulce y salada.

En la zona central de Chile, el régimen hidrológico de los ríos se encuentra fuertemente influenciado por la estacionalidad climática mediterránea, con precipitaciones concentradas en los meses de otoño e invierno, y extensos periodos secos durante primavera y verano. Esta condición genera un patrón de caudales altamente estacionales, con valores altos a mitad del año por efecto de

las lluvias invernales y, en algunos casos, un segundo peak en primavera o verano debido al deshielo de nieve acumulada en la alta cordillera. Durante el verano, los caudales pueden disminuir drásticamente, en algunos casos hasta niveles mínimos o nulos, especialmente en cuencas con alta intervención antrópica. Esta variabilidad podría intensificarse de forma interanual debido a fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

En los sistemas estuarinos, el caudal de río cumple múltiples funciones hidrodinámicas y morfológicas. En primer lugar, representa el principal forzante fluvial que contribuye al vaciamiento de la laguna estuarina durante la bajamar, generando corrientes de vaciante que favorecen la erosión de la barrera de arena en la desembocadura. Un caudal alto y sostenido puede mantener la conexión abierta con el mar, mientras que valores bajos persistentes de caudal favorecen el cierre del estuario, al no poder oponerse al transporte litoral de sedimentos inducidos por el oleaje.

## 4. Sitios de Estudio

### 4.1 Introducción

Este capítulo presenta y describe los sistemas estuarinos que son analizados en esta investigación. Se estudió un total de 12 estuarios presentes en la zona central de Chile, en donde para cada uno de estos se describen las características generales de su cuenca hidrográfica y de las condiciones pluviales y fluviométricas que se identifican.

### 4.2 Antecedentes

Los sistemas estuarinos se encuentran a lo largo de todo el mundo en una gran variedad de configuraciones geológicas y oceanográficas (Gierloff-Emden, 1961; McSweeney, et al., 2017). Sin embargo, se ha determinado como característica prevalente que el número de estuarios que se encuentran por unidad de longitud de costa será mayor a lo largo de márgenes continentales activos (Inman & Nordstrom, 1971) y sobre plataformas continentales de un mayor ancho (Nummedal, et al., 1977). Estas características hacen del territorio costero de Chile una zona geográfica ideal para la proliferación de estos sistemas (Perillo, et al., 1999), en donde es posible encontrar estuarios de diversas morfologías a lo largo de sus más de 6.400 kilómetros de longitud de costa.

Siguiendo el sistema de clasificación de Pritchard (1960), la presencia de un clima mediterráneo favorece la presencia de estuarios de tipo barrera (Behrens, et al., 2013; McSweeney, et al., 2017). En este contexto, el sistema de clasificación bioclimática de Rivas-Martínez (1993) definido por la temperatura y el régimen de precipitaciones, permite identificar en Chile un macrobioclima mediterráneo que se extiende aproximadamente entre los 23°S hasta 37°S (Amigo & Ramírez, 1998). Dentro de este rango latitudinal, los principales sistemas costeros de características estuarinas identificados se presentan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Inventario de sistemas estuarinos identificados sobre la extensión de clima mediterráneo en Chile.  
Se indica distribución geográfica, administrativa y ubicación en cuencas y subcuencas hidrográficas.

ID	Sitio	Lat. (S)	Long. (O)	Región	Comuna	Cuenca	Subcuenca
1	Río Copiapó	27°18'	70°55'	Atacama	Caldera	Río Copiapó	Río Copiapó Bajo
2	Humedal Carrizal Bajo	28°04'	71°08'	Atacama	Huasco	Q. Carrizal y Costeras hasta Río Huasco	Quebradas Carrizal y Carrizalillo
3	Río Huasco	28°26'	71°12'	Atacama	Huasco	Río Huasco	Río Huasco
4	Humedal Los Choros	29°18'	71°21'	Coquimbo	La Higuera	Río Los Choros	Q. Los Choros entre Q. del Pelicano y desembocadura
5	Humedal Punta Teatinos	29°49'	71°17'	Coquimbo	La Serena	Río Elqui	Río Elqui Bajo
6	Río Elqui	29°53'	71°16'	Coquimbo	La Serena	Río Elqui	Río Elqui Bajo
7	Humedal El Culebrón	29°57'	71°19'	Coquimbo	Coquimbo	Costeras entre Río Elqui y Río Limarí	E. El Culebrón – Q. El Romeral
8	Laguna Adelaida	30°06'	71°22'	Coquimbo	Coquimbo	Costeras entre Río Elqui y Río Limarí	E. El Culebrón – Q. El Romeral
9	Estero Tongoy	30°15'	71°29'	Coquimbo	Coquimbo	Costeras entre Río Elqui y Río Limarí	Quebrada Camarones
10	Humedal Salinas Chicas	30°16'	71°30'	Coquimbo	Coquimbo	Costeras entre Río Elqui y Río Limarí	Quebrada Camarones
11	Humedal Los Litres	30°17'	71°32'	Coquimbo	Coquimbo	Costeras entre Río Elqui y Río Limarí	Quebrada Camarones
12	Humedal El Pachingo	30°18'	71°34'	Coquimbo	Coquimbo	Costeras entre Río Elqui y Río Limarí	Quebrada Camarones
13	Río Limarí	30°43'	71°41'	Coquimbo	Ovalle	Río Limarí	Río Limarí
14	Quebrada San Pedro	31°00'	71°38'	Coquimbo	Ovalle	Costeras entre Río Limarí y Río Choapa	E. El Teniente y E. El Almendro
15	Río Choapa	31°37'	71°33'	Coquimbo	Canela	Río Choapa	Río Choapa Bajo
16	Estero Conchalí	31°52'	71°29'	Coquimbo	Los Vilos	Costeras entre Río Choapa y Río Quilimarí	Estero Pupío
17	Río Quilimarí	32°07'	71°30'	Coquimbo	Los Vilos	Río Quilimarí	Río Quilimarí hasta Muro Embalse Culimo
18	Humedal Los Molles	32°14'	71°30'	Valparaíso	La Ligua	Costeras entre Río Quilimarí y Río Petorca	Costeras entre Río Quilimarí y Río Petorca
19	Río Petorca – La Ligua	32°24'	71°24'	Valparaíso	Papudo	Río Petorca – Río La Ligua	Río Petorca Bajo – Río La Ligua Bajo

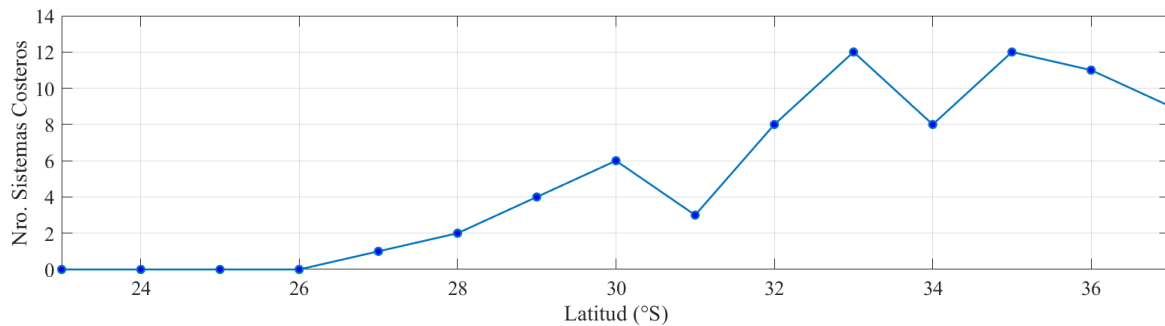
20	Quebrada Cruz de Piedra	32°30'	71°26'	Valparaíso	Papudo	Costeras Ligua – Aconcagua	Costeras entre E. Ligua y E. Catapilco
21	Estero Catapilco	32°37'	71°25'	Valparaíso	Zapallar	Costeras Ligua – Aconcagua	Estero Catapilco
22	Estero Puchuncaví	32°44'	71°29'	Valparaíso	Puchuncaví	Costeras Ligua – Aconcagua	Costeras entre E. Catapilco y Río Aconcagua
23	Estero Mantagua	32°53'	71°30'	Valparaíso	Quintero	Costeras Ligua – Aconcagua	Costeras entre E. Catapilco y Río Aconcagua
24	Río Aconcagua	32°55'	71°30'	Valparaíso	Concón	Río Aconcagua	Río Aconcagua Bajo
25	Estero Marga Marga	33°01'	71°33'	Valparaíso	Viña del Mar	Costeras entre Aconcagua y Maipo	Estero Marga Marga
26	Estero El Sauce	33°06'	71°40'	Valparaíso	Valparaíso	Costeras entre Aconcagua y Maipo	Lago Peñuelas
27	Humedal de Tunquén	33°16'	71°39'	Valparaíso	Algarrobo	Costeras entre Aconcagua y Maipo	E. Casablanca y E. San Jerónimo
28	Estero El Membrillo	33°20'	71°39'	Valparaíso	Algarrobo	Costeras entre Aconcagua y Maipo	E. Casablanca y E. San Jerónimo
29	Estero San Jerónimo	33°21'	71°39'	Valparaíso	Algarrobo	Costeras entre Aconcagua y Maipo	E. Casablanca y E. San Jerónimo
30	Estero del Rosario de Córdova	33°26'	71°40'	Valparaíso	El Quisco – El Tabo	Costeras entre Aconcagua y Maipo	E. del Rosario a R. Maipo
31	Humedal de Cartagena	33°31'	71°36'	Valparaíso	Cartagena	Costeras entre Aconcagua y Maipo	E. del Rosario a R. Maipo
32	Río Maipo	33°36'	71°37'	Valparaíso	San Antonio	Río Maipo	Río Maipo Bajo
33	Estero Yali	33°46'	71°44'	Valparaíso	Santo Domingo	Costeras entre Maipo y Rapel	Estero Yali
34	Estero Maitenlahue	33°50'	71°48'	Valparaíso	Santo Domingo	Costeras entre Maipo y Rapel	Estero Yali
35	Río Rapel	33°54'	71°49'	O'Higgins	Navidad	Río Rapel	Río Rapel
36	Estero la Vega de Pupuya	33°59'	71°53'	O'Higgins	Navidad	Costeras entre Rapel y E. Nilahue	Costeras entre Rapel y E. Topocalma
37	Estero Topocalma	34°07'	71°59'	O'Higgins	Litueche	Costeras entre Rapel y E. Nilahue	Estero Topocalma
38	Laguna Petrel	34°23'	72°00'	O'Higgins	Pichilemu	Costeras entre Rapel y E. Nilahue	Costeras entre E. Topocalma y E. Nilahue
39	Estero Nilahue	34°28'	72°01'	O'Higgins	Pichilemu	Costeras entre Rapel y E. Nilahue	Estero Nilahue
40	Humedal de Bucalemu	34°38'	72°02'	O'Higgins	Paredones	Costeras entre Rapel y E. Nilahue	Costeras entre E. Nilahue y Límite Regional
41	Estero San Pedro de Alcántara	34°41'	72°03'	O'Higgins – Maule	Paredones - Vichuquén	Costeras entre Rapel y E. Nilahue	Costeras entre E. Nilahue y Límite Regional

42	Estero Llico	34°45'	72°04'	Maule	Vichuquén	Costeras entre Límite Regional y Río Mataquito	Lago Vichuquén
43	Estero Iloca	34°57'	72°11'	Maule	Licantén	Costeras entre Límite Regional y Río Mataquito	Lago Vichuquén
44	Río Mataquito	34°58'	72°10'	Maule	Licantén – Curepto	Río Mataquito	Río Mataquito
45	Río Huenchullami	35°07'	72°12'	Maule	Curepto – Constitución	Costeras entre Río Mataquito y Río Maule	Río Huenchullami
46	Estero Cañete	35°11'	72°20'	Maule	Constitución	Costeras entre Río Mataquito y Río Maule	Costeras entre Río Huenchullami y Río Maule
47	Río Maule	35°19'	72°24'	Maule	Constitución	Río Maule	Río Maule Bajo
48	Estero Quebrada Honda	35°24'	72°29'	Maule	Constitución	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre Quebrada Honda y Río Reloca
49	Estero Malhueco	35°27'	72°29'	Maule	Constitución	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre Quebrada Honda y Río Reloca
50	Río Loanco	35°33'	72°37'	Maule	Constitución – Chanco	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre Quebrada Honda y Río Reloca
51	Río Reloca	35°41'	72°35'	Maule	Chanco	Costeras entre Maule y Limite Regional	Río Reloca
52	Estero Rahue	35°45'	72°33'	Maule	Chanco – Pelluhue	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre Río Reloca y Río Curanilahue
53	Río Curanilahue	35°48'	72°34'	Maule	Pelluhue	Costeras entre Maule y Limite Regional	Río Curanilahue
54	Río Curanipe	35°50'	72°38'	Maule	Pelluhue	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre R. Curanilahue y Limite Regional
55	Río Chovellén	35°52'	72°40'	Maule	Pelluhue	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre R. Curanilahue y Limite Regional
56	Estero Tregualemu	35°57'	72°45'	Maule	Pelluhue	Costeras entre Maule y Limite Regional	Costeras entre R. Curanilahue y Limite Regional
57	Estero Buchupureo	36°04'	72°47'	Ñuble	Cobquecura	Costeras entre Limite Regional y Río Itata	Costeras entre Limite Regional y R. Taucú
58	Río Taucú	36°09'	72°48'	Ñuble	Cobquecura	Costeras entre Limite Regional y Río Itata	Costeras entre Limite Regional y R. Taucú
59	Estero Colmuyao	36°16'	72°48'	Ñuble	Cobquecura	Costeras entre Limite Regional y Río Itata	Costeras entre Río Taucú y Río Itata
60	Estero Mela	36°21'	72°51'	Ñuble	Cobquecura – Treguaco	Costeras entre Limite Regional y Río Itata	Costeras entre Río Taucú y Río Itata

61	Río Itata	36°23'	72°52'	Ñuble	Treguaco – Coelemu	Río Itata	Río Itata Bajo
62	Río Pingueral	36°31'	72°55'	Biobío	Tomé	Costeras e Islas entre R. Itata y R. Biobío	Costeras entre R. Itata y R. Pingueral
63	Estero Coliumo	36°33'	72°57'	Biobío	Tomé	Costeras e Islas entre R. Itata y R. Biobío	Costeras entre R. Pingueral y R. Andalien
64	Río Andalien	36°44'	73°01'	Biobío	Tomé – Talcahuano	Costeras e Islas entre R. Itata y R. Biobío	Río Andalien
65	Río Lengua	36°46'	73°10'	Biobío	Hualpén	Costeras e Islas entre R. Itata y R. Biobío	Costeras entre Río Andalien Y Río Biobío
66	Río Biobío	36°48'	73°09'	Biobío	Hualpén - San Pedro de La Paz	Río Biobío	Río Biobío Bajo
67	Humedal Boca Maule	36°59'	73°11'	Biobío	Coronel	Costeras e Islas entre Ríos Biobío y Carampangue	Costeras Ríos Biobío y Río Manco
68	Estero Manco	37°02'	73°08'	Biobío	Coronel	Costeras e Islas entre Ríos Biobío y Carampangue	Costeras R. Manco y R. Laraquete
69	Estero Colcura	37°06'	73°09'	Biobío	Lota	Costeras e Islas entre Ríos Biobío y Carampangue	Costeras R. Manco y R. Laraquete
70	Estero Chivilingo	37°08'	73°10'	Biobío	Lota	Costeras e Islas entre Ríos Biobío y Carampangue	Costeras R. Manco y R. Laraquete
71	Río Laraquete	37°09'	73°11'	Biobío	Arauco	Costeras e Islas entre Ríos Biobío y Carampangue	Costeras R. Laraquete y R. Carampangue
72	Río Carampangue	37°13'	73°17'	Biobío	Arauco	Río Carampangue	R. Carampangue entre arriba R. Colorado y desembocadura
73	Río Tubul	37°14'	73°26'	Biobío	Arauco	Costeras entre Ríos Carampangue y Lebu	Costeras entre Río Carampangue y Punta Lavapie
74	Estero Quidico	37°22'	73°37'	Biobío	Arauco	Costeras entre Ríos Carampangue y Lebu	Costeras entre Punta Lavapie y Río Quiapo
75	Río Quiapo	37°26'	73°35'	Biobío	Arauco - Lebu	Costeras entre Ríos Carampangue y Lebu	Río Quiapo
76	Río Lebu	37°26'	37°26'	Biobío	Lebu	Río Lebu	R. Lebu entre junta ríos Curanilahue y Pilpilco y desembocadura

La distribución de estos sistemas según su latitud es la siguiente se presenta en la Figura 4.1. Como es posible observar, solamente entre los paralelos 23°S y 38°S del territorio chileno se determina la presencia de más de 70 sistemas costeros de características estuarinas. Esto considera

las desembocaduras de los principales ríos, esteros y arroyos de la extensión especificada, además de múltiples lagunas y humedales costeros.



**Figura 4.1:** Distribución de sistemas estuarinos identificados sobre la extensión del clima mediterráneo en la costa chilena.

Debido a la necesidad de realizar un análisis detallado de la dinámica morfológica de estuarios en la zona central de Chile, es seleccionado un conjunto reducido de estuarios representativos. Para la selección de estos sistemas se considera la disponibilidad continua de registros satelitales, la relevancia hidrológica de las cuencas hidrográficas a las que pertenecen, una distribución geográfica representativa dentro del área de estudio y la evidencia documentada de intermitencia en la conexión del estuario con el océano. Teniendo esto en consideración, los sistemas estuarinos analizados y su distribución espacial es presentada en la Figura 4.2. En la Tabla 4.2 se resumen los sitios de estudio seleccionados, el área de las cuencas a las que pertenecen y el caudal medio registrado



**Figura 4.2:** Distribución espacial de sistemas estuarinos estudiados.

**Tabla 4.2:** Sistemas estuarinos estudiados en este trabajo. Se indica distribución geográfica y administrativa, área de cuenca hidrográfica y caudal medio anual de río en estación fluviométrica más cercana. [1] = Inventario de Cuencas de Chile (DGA). [2] = Sistema Nacional de Información de Agua (DGA).

Sitio	Lat. (S)	Long. (O)	Región	Área Cuenca <sup>[1]</sup> (km <sup>2</sup> )	Caudal Medio <sup>[2]</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Río Elqui	29°53'	71°16'	Coquimbo	9.826	4,7
Río Limarí	30°43'	71°41'	Coquimbo	11.697	7,8
Río Choapa	31°37'	71°33'	Coquimbo	7.654	10,8
Río Petorca – La Ligua	32°24'	71°24'	Valparaíso	3.969	2,4
Río Aconcagua	32°55'	71°30'	Valparaíso	7.334	18,9
Río Maipo	33°36'	71°37'	Valparaíso	15.274	107,0
Río Rapel	33°54'	71°49'	O'Higgins	13.767	-
Estero Nilahue	34°28'	72°01'	O'Higgins	3.397	8,7
Río Mataquito	34°58'	72°10'	Maule	6.332	109,0
Río Maule	35°19'	72°24'	Maule	21.054	457,8
Río Itata	36°23'	72°52'	Ñuble	11.327	323,3
Río Biobío	36°48'	73°09'	Biobío	24.371	913,9

# 5. Metodología

## 5.1 Introducción

Este capítulo describe los detalles de metodología de teledetección, procesamiento y cálculo de parámetros morfológicos utilizados en esta investigación, entregando al lector una descripción detallada de toda la información de la bases de datos utilizada para la obtención de los resultados.

En primer lugar, se describen los métodos de teledetección que son utilizados para la obtención de registros satelitales de los sistemas estuarinos en estudio. Luego, se describe el procesamiento que es realizado sobre estos registros para el rastreo automático de rutas a lo largo y ancho de desembocaduras de estuarios. Finalmente, se detalla el método utilizado para la obtención de estados de conexión y ancho de desembocaduras a partir de los transectos generados.

Las siguientes secciones explican los métodos utilizados para el análisis estadístico de series temporales generadas de estado de conexión y ancho de desembocaduras.

## 5.2 Teledetección

Para determinar el estado de conexión y estimar el ancho de las desembocaduras de estuarios en la zona central de Chile durante las últimas décadas, se propone el uso de imágenes satelitales de mediana resolución y libre acceso, disponibles a través de programas de observación terrestre como Landsat y Sentinel-2.

La técnica de análisis mediante teledetección se basa en el uso de instrumentos de escaneo para capturar información espectral de una región de interés en el planeta. La detección remota puede ser de dos clases: pasiva y activa. La teledetección pasiva emplea sensores ópticos los cuales miden la energía solar reflejada por la superficie terrestre, mientras que la teledetección activa utiliza sensores de radar los cuales emiten su propia energía y permiten obtener registros sin necesidad de una emisión solar. Tanto Landsat como Sentinel-2 son satélites de teledetección pasiva, por lo que los registros obtenidos estarán limitados a condiciones diurnas y sin cobertura nubosa significativa.

Para este estudio se utilizarán registros satelitales provenientes de las misiones Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+), Landsat 8 (OLI) y Sentinel-2 (MSI), las cuales ofrecen un registro histórico continuo para el monitoreo de la zona costera. En términos espaciales, las imágenes Landsat cuentan con una resolución de 30 metros por píxel en la mayoría de sus bandas espectrales, mientras que Sentinel-2 ofrece resoluciones de 10, 20 y 60 metros, según la banda utilizada. En cuanto a la cobertura temporal, Landsat 5 dispone de imágenes desde 1984 hasta 2013, Landsat 7 desde 1999

hasta la actualidad (con limitaciones por falla de escáner desde 2003), y Landsat 8 desde 2013 en adelante. Por su parte, Sentinel-2 cuenta con datos disponibles desde 2015 a la actualidad, con una alta frecuencia de revisita (cada 5 días combinando los sensores S2A y S2B), lo cual permite un análisis multitemporal de alta densidad para identificar patrones de variabilidad estacional e interanual en las desembocaduras estuarinas.

Los datos registrados por misiones Landsat cuentan una frecuencia teórica de revisita de 16 días. Sin embargo, en la práctica, el registro satelital útil entre los periodos 1985 a 2014 presenta una densidad significativamente menor. Esto se debe principalmente a que, durante las primeras décadas de operación, la adquisición de imágenes no era sistemática a nivel global, sino que dependía de requerimientos específicos, lo que reducía la cobertura en regiones sin demandas activas. A esto se suman las limitaciones de los sensores y a las condiciones atmosféricas locales, como la frecuente nubosidad costera en la zona central de Chile. Como consecuencia, si bien existe información disponible desde mediados de los 80, la continuidad y resolución temporal del análisis multitemporal mejoran sustancialmente a partir de 2017 con la incorporación del programa Sentinel.

Los resultados obtenidos mediante teledetección corresponden a archivos de tipo ráster. Este tipo de datos consiste en una matriz regular de píxeles en la que cada celda contiene un valor numérico que representa una propiedad medida de la superficie terrestre, como la reflectancia de una banda espectral específica. Los archivos raster multiespectrales incluyen varias bandas, cada una asociada a una porción del espectro electromagnético, lo cual permite aplicar índices espectrales y realizar análisis espaciales detallados.

La teledetección se presenta como una gran alternativa para la recopilación de información de la zona costera y el estudio de fenómenos de una a mayor escala espacial y temporal como lo es la dinámica morfológica de sistemas estuarinos, debido a su amplia cobertura espacial, al monitoreo temporal continuo que presenta y a su rentabilidad con respecto a otros enfoques que requieren de mediciones llevadas a cabo en campañas en terreno o el uso de modelos físicos en laboratorio (Kelly, et al., 2018; Bishop-Taylor, et al., 2019; Vos, et al., 2019a).

### 5.3 Índices Espectrales

Para encontrar la desembocadura de un estuario mediante teledetección es necesario identificar los cuerpos de agua y zonas húmedas que la componen. Esta tarea se lleva a cabo mediante métodos basados en índices espectrales, los que corresponden a operaciones matemáticas de bandas espectrales que realzan el contraste entre el agua y otros tipos de cobertura terrestre.

Entre los índices espectrales que pueden ser utilizados se encuentra el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), introducido por McFeeters (1996) como método para resaltar cuerpos de agua al maximizar la reflectancia de estos. Este índice se calcula a través de la siguiente operación matemática de bandas espectrales:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (5.1)$$

Donde *Green* indica la banda espectral de color verde, la cual ayuda a la detección de agua debido a su alta reflectancia en este rango espectral, y *NIR* al espectro infrarrojo cercano, el cual es fuertemente absorbido por el agua, lo que ayuda a resaltar su presencia al generar valores negativos en áreas sin agua.

Posteriormente, Xu (2006) propone el Índice Diferencial de Agua Normalizado Modificado (mNDWI) como una mejora del índice NDWI, reduciendo la interferencia de áreas urbanas, zonas húmedas y de vegetación en la detección del cuerpo de agua. Este índice se calcula a través de la siguiente operación matemática de bandas espectrales:

$$mNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (5.2)$$

Donde, en este caso, la banda de infrarrojo cercano *NIR* es reemplazada por la banda de infrarrojo de onda corta *SWIR*, la cual presenta una mayor absorción por el agua respecto a la anterior.

Los valores de estos índices varían entre -1 y 1, donde el 0 indica el valor de referencia para discriminar la superficie inundada. Los valores positivos indican superficies de agua mientras que los valores de cero y negativos indican suelo y vegetación terrestre.

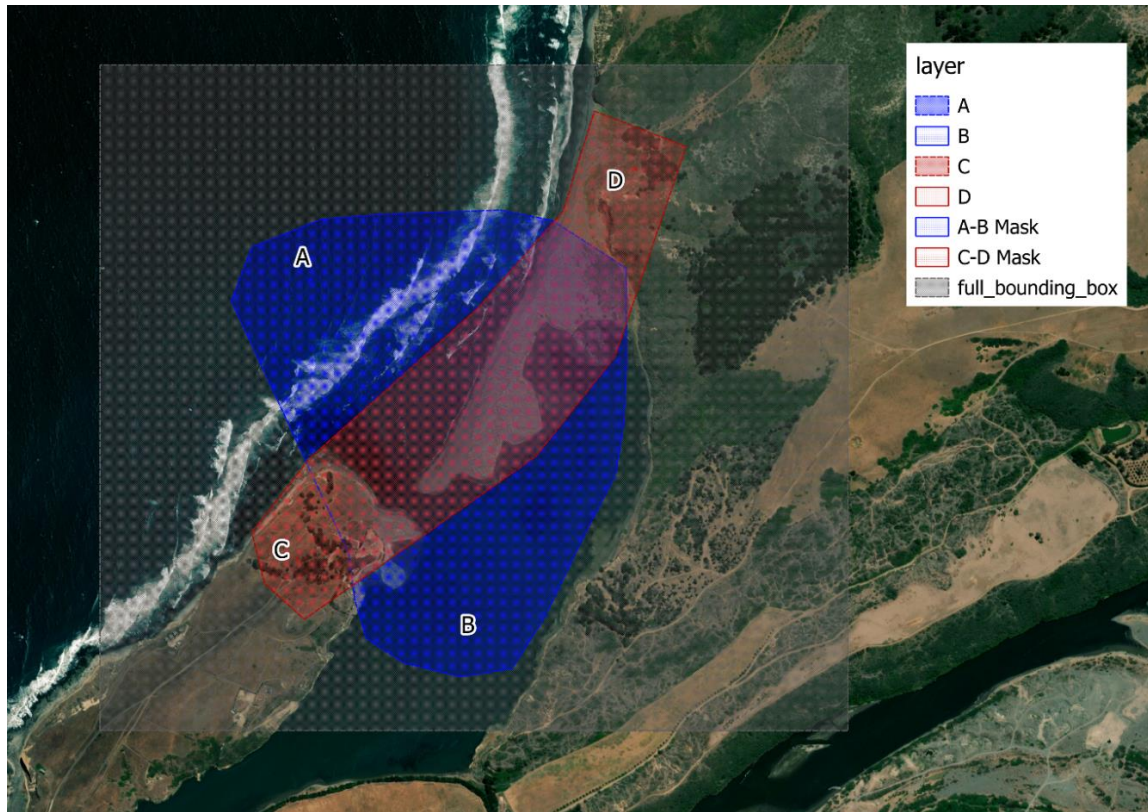
## 5.4 InletTracker

La idea de análisis de sistemas estuarinos mediante detección remota fue profundizada por Heimhuber et al. (2021) con la herramienta InletTracker, un toolkit de Python de código abierto el cual permite el rastreo automático de desembocaduras de estuarios mediante transectos georreferenciados a lo largo y ancho de estas utilizando índices espectrales. Esta metodología permite un registro de la evolución temporal y espacial de desembocaduras y del estado de conexión de un estuario con el océano.

### 5.4.1 Sitios de Entrada

Para la aplicación de este método es necesario definir previamente las regiones de estudio. Esto se lleva a cabo utilizando softwares de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como QGIS o ArcGIS. Estos programas permiten la edición y construcción de archivos vectoriales que representan la geometría espacial del sitio de análisis.

En particular, InletTracker requiere que cada sitio sea ingresado dentro de un archivo tipo *shapefile*, el cual debe incluir siete polígonos por cada sitio de estudio. Cada uno de estos polígonos debe estar correctamente nombrado en el campo de atributo denominado *layer*, utilizando las siguientes etiquetas específicas: *full\_bounding\_box*, *A-B Mask*, *C-D Mask*, *A*, *B*, *C*, y *D* (Figura 5.1).



**Figura 5.1:** Imagen y configuración de polígonos referencial para la desembocadura del Río Rapel. El punto A es ubicado en el océano abierto y el punto B al interior del estuario, mientras que los puntos C y D son ubicados en lados opuestos de la desembocadura. Se indican también las máscaras para delimitar la búsqueda de rutas formadas por A-B y C-D.

El polígono `full_bounding_box` es empleado para seleccionar y recortar las imágenes satelitales desde Google Earth Engine (GEE). Los puntos A y C funcionan como puntos semilla para la determinación automatizada de las rutas sobre la barrera de arena (*across-berm*) y a lo largo de la barrera (*along-berm*) respectivamente, mientras que los puntos B y D actúan como puntos receptores. Los puntos A, B, C y D deben ser representados como pequeños triángulos, dado que los *shapefiles* no permiten mezclar puntos y polígonos en una misma capa. En este caso, el primer vértice del triángulo se interpreta como el punto de análisis real.

#### 5.4.2 Registros Satelitales

InletTracker utiliza la funcionalidad del paquete de herramientas de Python CoastSat (Vos, et al., 2019b) para el acceso a registros satelitales de acceso público mediante Google Earth Engine.

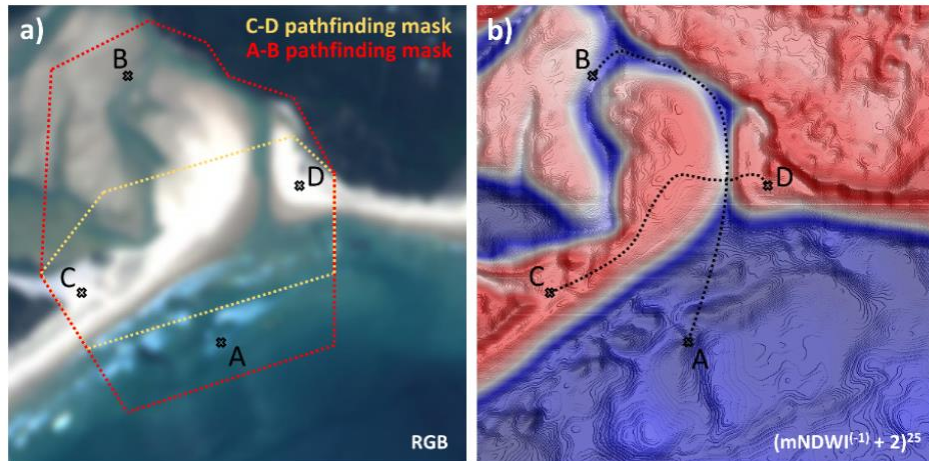
Las imágenes satelitales obtenidas (L5, L7, L8 y S2) son recortadas a una región de interés, para luego ser procesadas enmascarando píxeles nublados y mejorando su resolución espacial. Para ello, se utilizan técnicas como el refinado pancromático (*pansharpening*), que mejora la resolución de las bandas multispectrales mediante el uso de una banda pancromática, y submuestreo (*downsampling*), que consiste en reducir la resolución de bandas de mayor detalle para igualarlas con otras de menor resolución. Estas técnicas permiten establecer una resolución común de 15 metros por píxel para todas las bandas de Landsat y de 10 metros por píxel para Sentinel-2.

### 5.4.3 Método de Rutas de Menor Costo

Una vez descargadas y procesadas las imágenes satelitales, se utiliza un algoritmo de búsqueda de rutas de menor costo, basado en el módulo de gráficos de scikit-image (Van der Walt, et al., 2014). Este método genera de manera automática dos transectos en cada imagen satelital, a lo largo y a través de la barrera de arena, los cuales permiten definir la ubicación de la desembocadura de un estuario. La generación de transectos a lo largo y a través de la barrera de arena permite acotar la información espectral sobre el área de estudio solo a lo que es relevante para la determinación del estado de conexión del estuario y el ancho de su desembocadura.

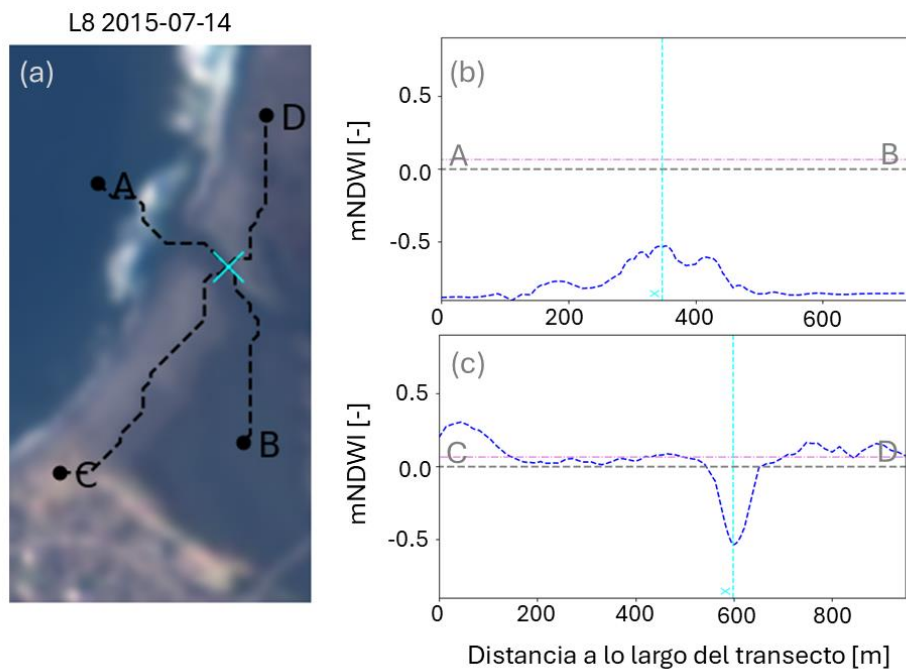
El algoritmo recorre de forma iterativa una superficie de coste definida a partir del valor del índice espectral seleccionado (NDWI o mNDWI). Para identificar la ruta de menor coste, se invierte el signo del índice espectral, asignando valores negativos a cuerpos de agua y valores positivos a suelo y vegetación terrestre. De esta forma, los valores del índice utilizado serán proporcionales a la profundidad de agua como superficie de coste. Para evitar que el algoritmo trace atajos sobre partes de barrera de arena, la superficie de coste se eleva a un factor de 25. Esta elevación exagera el coste que tiene cruzar píxeles secos, favoreciendo trayectos a través de píxeles húmedos, incluso si esto implica una ruta más extensa.

La generación de transectos se realiza desde los puntos semillas (A) y (C) hasta los puntos receptores (B) y (D), acumulando el coste de cada pixel a lo largo del camino trazado. El transecto A-B se dispone de forma transversal a la barrera de arena y representa la ruta de menor coste acumulado dentro de la máscara A-B. Esta ruta identifica el camino más corto y de mayor profundidad que conecta a un punto en el océano abierto (A) con un punto al interior del estuario (B). En cambio, el transecto C-D se dispone a lo largo de la barrera de arena y corresponde a la ruta de mayor coste acumulado dentro de la máscara C-D (Figura 5.2). De esta manera, se identifica la ruta más corta y de menor profundidad que conecta a dos puntos en lados opuestos del canal de desembocadura. La intersección entre las rutas A-B y C-D permite localizar el segmento más estrecho y somero de la desembocadura, comúnmente conocido como “cuello de botella” o zona de estrangulamiento de la desembocadura.

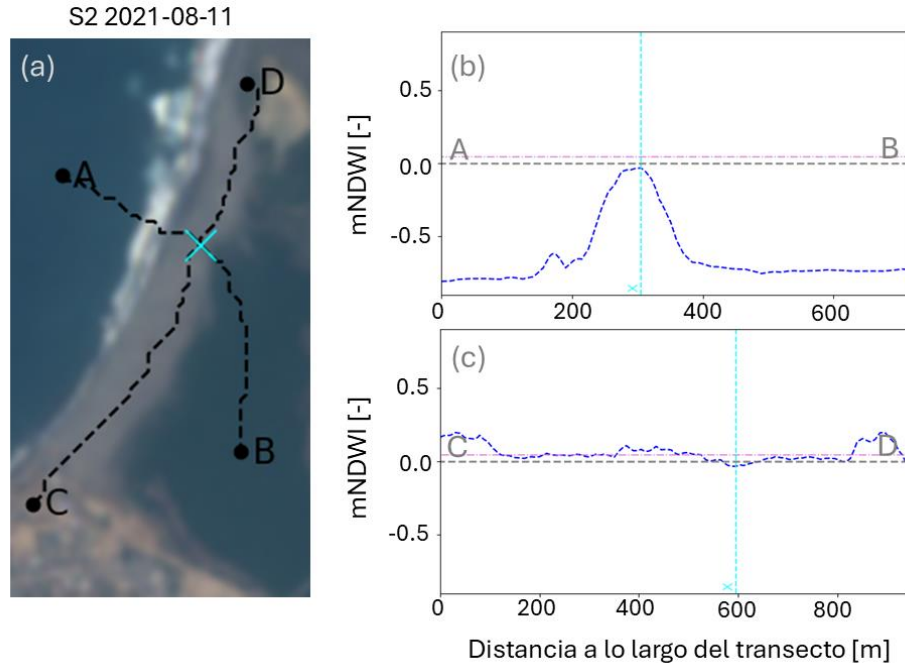


**Figura 5.2:** Ejemplo de aplicación del método de rutas de menor costo. Se muestran las rutas de menor y mayor costo generadas a partir de la amplificación del índice mNDWI. (Modificado de Heimhuber et al. (2021)).

La ejecución del algoritmo de búsqueda de rutas de menor costo permite extraer el valor del índice espectral, de signo invertido pero sin elevar, a lo largo de los transectos generados en intervalos de 1 metro. La aplicación de este método se ilustra a modo de ejemplo en la Figura 5.3 y Figura 5.4, en donde se presenta una desembocadura de estuario intermitente (Río Aconcagua) durante un estado de conexión abierto y otro cerrado respectivamente.



**Figura 5.3:** Ilustración de método utilizado para generación automática de transectos a lo largo y a través de la barrera de arena con InletTracker. En (a) registro satelital L8 para la desembocadura del Río Aconcagua durante un estado de conexión abierto. Se muestran los puntos semilla A y B, los puntos receptores C y D, y los transectos generados. En (b) y (c) se presenta el transecto  $mNDWI^{(-1)}$  a través y a lo largo de la barrera de arena respectivamente.



**Figura 5.4:** Ilustración de método utilizado para generación automática de transectos a lo largo y a través de la barrera de arena con InletTracker. En (a) registro satelital S2 para la desembocadura del Río Aconcagua durante un estado de conexión cerrado. Se muestran los puntos semilla A y B, los puntos receptores C y D, y los transectos generados. En (b) y (c) se presenta el transecto  $mNDWI^{(-)}$  a través y a lo largo de la barrera de arena respectivamente.

Como es posible observar, las características de los transectos generados presentan diferencias para los distintos estados de conexión del estuario. Cuando la desembocadura se encuentra abierta (Figura 5.3), el transecto a través de la barra A-B se caracteriza por valores negativos muy bajos en su inicio en el océano abierto (punto A), para luego mostrar un máximo local, también negativo, cercano a la intersección con el transecto a lo largo de la barrera. Este máximo representará al punto de menor profundidad de agua en la desembocadura. Siguiendo el transecto al interior del estuario, se vuelven a presentar valores bajos pero sujetos a una mayor variabilidad debido a una menor profundidad y la presencia de bancos de arena cercanos a la desembocadura. Por el contrario, el transecto a lo largo de la barra C-D se caracteriza por valores positivos en sus extremos y en la mayoría de su extensión, asociados a áreas de suelo y arena, con un mínimo local negativo cercano a la intersección con el transecto transversal a la barrera. Este mínimo representará el centro de la hendidura de la barra de arena formada por la desembocadura del estuario.

Cuando la desembocadura se encuentra cerrada (Figura 5.4), el transecto a través de la barra A-B presentará valores negativos muy bajos pero con tramo de valores positivos o más cercanos a cero en la intersección con el transecto a lo largo de la barrera. Este tramo de mayor valor representará a la barrera de arena formada entre el océano y el interior del estuario. Por otro lado, el transecto a lo largo de la barra C-D se caracteriza por valores positivos en la mayoría de su extensión, solamente presentando valores negativos en secciones potencialmente húmedas dentro de la barrera de arena.

La ruta C-D a lo largo de la barrera de arena resulta de especial importancia para esta investigación, dado que reproduce de manera aproximada la morfología de la desembocadura para

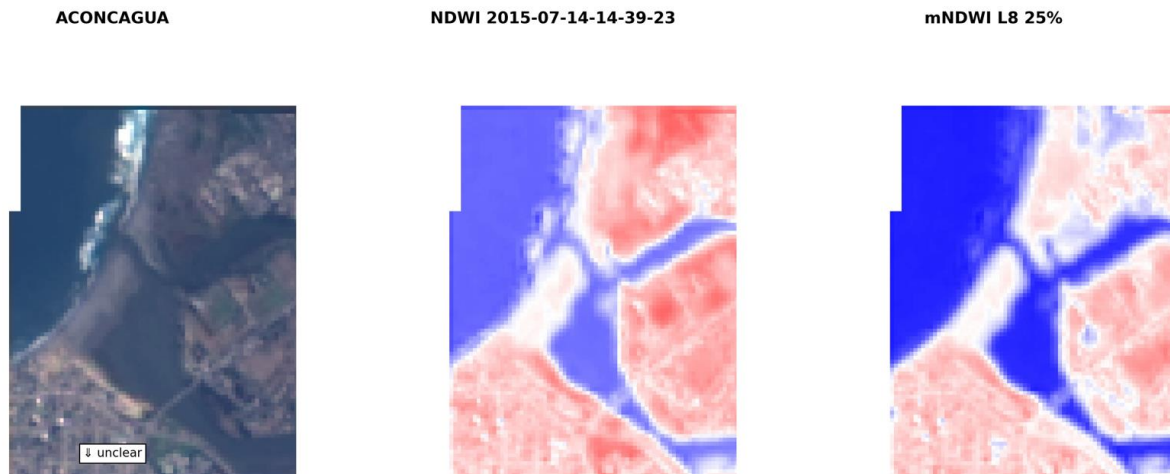
cada imagen del registro satelital, posibilitando así la construcción de una serie temporal de trazados transversales.

## 5.5 Estado de Conexión

El estado de conexión de un estuario queda determinado por la presencia o ausencia de un canal de agua que atraviesa la barrera de arena y conecta al océano con el interior del estuario.

El paquete de herramientas de InletTracker incorpora una función destinada a la inferencia automática del estado de conexión, basada en el análisis espectral de los transectos generados a lo largo y a través de la barrera de arena, evaluando la diferencia entre sus valores extremos (mínimo y máximo local para los transectos a lo largo y a través de la barrera respectivamente) y la mediana del transecto a lo largo de la barra. Heimhuber et al. (2021) identifican esta mediana como un parámetro representativo del índice mNDWI de suelo y arena seca en una amplia variedad de configuraciones estuarinas, de modo que esta diferencia se emplea como indicador del estado de la desembocadura. Si bien este método ha demostrado presentar resultados aceptables, para esta investigación se opta por una inspección visual del registro satelital para una determinación más precisa y detallada del estado de conexión del estuario.

Esta clasificación se realiza mediante la interfaz de clasificación de estado de imágenes presente en InletTracker (Figura 5.5). Dicha interfaz permite al usuario inspeccionar cada registro satelital en estudio en sus formatos RGB, NDWI y mNDWI, asignando un estado de conexión a cada imagen, es decir, abierto, cerrado, indeterminado o calidad insuficiente (descartado del análisis). Este procedimiento da como resultado una serie temporal binaria que representa la evolución del estado de conexión del estuario en el tiempo.



**Figura 5.5:** Interfaz de clasificación de estado de desembocadura de InletTracker.

A partir de esta serie, se calcula el parámetro *Entrance Closure Index* (ECI) (Haines, 2006), definido como la razón entre el número de observaciones en que el estuario estuvo cerrado y el total de observaciones validadas dentro de un periodo representativo, el cual permite caracterizar la

frecuencia relativa de cierre de desembocadura. Con el fin de identificar patrones estacionales, también se calcula la frecuencia mensual de cada estado.

Con el objetivo de caracterizar la dinámica y estabilidad del sistema, se realiza además un análisis de la duración media de estados, entendida como el tiempo promedio en que el estuario permanece consecutivamente en un mismo estado antes de cambiar. De esta forma, se calculan las duraciones media, mediana y máxima para los periodos de apertura y de cierre, permitiendo evaluar si el sistema presenta una alta estabilidad morfológica o si, por el contrario, tiende a alternar con mayor frecuencia entre ambos estados.

De manera complementaria, se construye una matriz de transición de primer orden, la cual resume las probabilidades condicionales de pasar de un estado a otro en la observación siguiente. Esta matriz incluye las transiciones entre estados abiertos y cerrados, y permite identificar parcialmente la inercia del sistema, es decir, su tendencia a permanecer en un estado dado o a cambiar. La construcción de dicha matriz se realiza a partir de la secuencia temporal de estados observados de la desembocadura, contabilizando las frecuencias de ocurrencia de cada transición de un estado  $i$  en la fecha  $t$  a un estado  $j$  en la fecha  $t + 1$ . Si  $N_{ij}$  representa el número de veces que se observa una transición desde el estado  $i$  hacia el estado  $j$ , la probabilidad condicional de transición se calcula como:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_j N_{ij}} \quad (5.3)$$

De esta manera, cada fila de la matriz resume las probabilidades de pasar de un estado inicial  $i$  hacia los posibles estados siguientes  $j$ , garantizando que la suma de probabilidades en cada fila sea igual a 1. Esto permite obtener una representación probabilística del comportamiento dinámico del sistema, capturando tanto su persistencia, cuando  $i = j$ , como su propensión al cambio, cuando  $i \neq j$ .

Finalmente, con el objetivo de identificar tendencias a largo plazo en la frecuencia de aperturas o cierres, se aplica un test de tendencia basado en regresión lineal sobre la proporción anual de estados abiertos. Esta prueba evalúa si existe una variación sistemática en el tiempo en la probabilidad de que el estuario se encuentre abierto.

## 5.6 Ancho de Desembocaduras

Para determinar el ancho efectivo de la desembocadura de estuarios se emplea un algoritmo de procesamiento del perfil espectral de transectos a lo largo de la barrera de arena, generados a través del método de rutas de menor costo de InletTracker. Este método permite un análisis cuantitativo de la evolución espacial de la desembocadura de estuarios y su ancho.

### 5.6.1 Método de Detección Automática de Anchos

El procedimiento de detección automática del ancho de desembocadura se basa en identificar el tramo activo del canal abierto sobre la barra de arena del estuario, mediante un umbral espectral adaptativo. Para ello, en primer lugar se calcula la mediana del perfil espectral de mNDWI a lo largo

del transecto,  $M_{mNDWI}$ , parámetro representativo de suelo y zonas secas (Heimhuber, et al., 2021). A continuación, se identifica el valor mínimo del perfil mNDWI, correspondiente al intervalo con mayor potencial de representar la parte más profunda de la desembocadura. La diferencia entre la mediana y este mínimo define la amplitud relativa  $\Delta$ :

$$\Delta = M_{mNDWI} - \min(mNDWI) \quad (5.4)$$

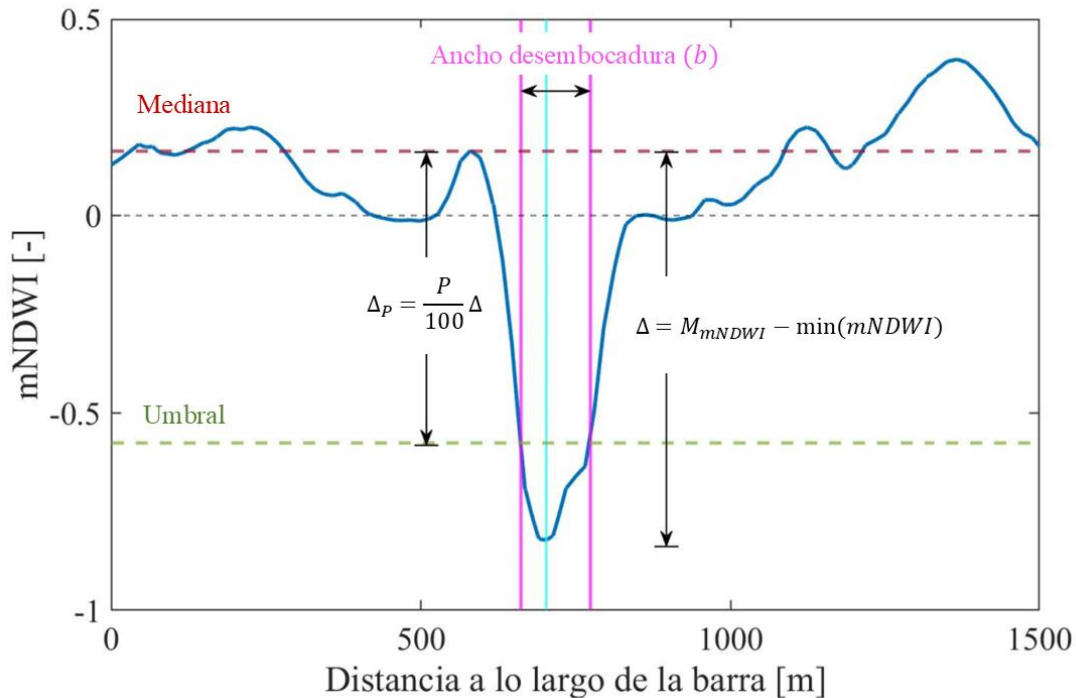
A partir de esta diferencia se calcula una amplitud escalada  $\Delta_P$ , determinada como un porcentaje  $P$  del parámetro  $\Delta$ :

$$\Delta_P = \frac{P}{100} \cdot \Delta \quad (5.5)$$

Finalmente, se determina un umbral adaptativo  $U$ , el cual permite separar los valores de mNDWI pertenecientes al canal activo del resto del perfil. Este umbral se calcula restando el valor  $\Delta_P$  a la mediana:

$$U = M_{mNDWI} - \Delta_P \quad (5.6)$$

Los segmentos cuyo valor de mNDWI sean inferiores a  $U$  son considerados parte activa del canal de desembocadura. De esta manera, el ancho efectivo estimado  $b$  se calcula como la distancia lineal entre el primer y el último punto consecutivo del tramo que cumplen dicha condición (Figura 5.6).



**Figura 5.6:** Ilustración de método de detección automática de ancho de desembocaduras. En azul se muestra el perfil de valores del índice mNDWI<sup>(-1)</sup> a lo largo del transecto. La línea punteada roja indica el valor de la mediana del transecto  $M_{mNDWI}$ . Se indica el cálculo del parámetro  $\Delta$  como la diferencia entre la mediana y el valor mínimo del transecto. La línea punteada verde corresponde al umbral adaptativo  $U$ , calculado como la diferencia entre  $M_{mNDWI}$  y  $\Delta_P$ .

Aunque el índice espectral mNDWI está diseñado para discriminar superficies terrestres de zonas inundadas mediante un umbral rígido en cero, su aplicación directa en cuerpos de agua más pequeños y de mayor dinámica como las desembocaduras, presenta algunas limitaciones prácticas. En primer lugar, la variabilidad espectral del agua hace que segmentos con presencia de aguas poco profundas, turbias o con una alta tasa de sedimentos en suspensión puedan clasificarse erróneamente como suelo seco. Inversamente, suelos muy húmedos o cubiertos por vegetación acuática podrían ser clasificados erróneamente como zonas inundadas. Por otro lado, las variaciones en la iluminación solar y en las condiciones atmosféricas pueden distorsionar los valores de ciertas bandas espectrales empleadas en el cálculo del índice mNDWI. A esto se suma el efecto de los píxeles mixtos en las zonas de transición tierra-agua, donde un mismo píxel contiene porciones de superficie húmeda y seca, generando valores del índice cercanos a cero y dificultando la discriminación precisa mediante un umbral fijo.

Frente a estas limitaciones, el método de detección automática de ancho de desembocaduras propuesto permite aplicar un umbral adaptativo que puede ajustarse a las condiciones específicas del sitio de estudio. De este modo, se corrigen los desvíos espectrales y se asegura que la línea de agua detectada sea coherente con la morfología real de la desembocadura, incluso ante variaciones de turbidez, vegetación o condiciones atmosféricas. Además, a diferencia de enfoques que utilizan clasificadores binarios aplicados sobre índices espectrales, este procedimiento calcula la posición de la línea de agua a nivel de subpíxel, lo que permite representar de forma más continua la interfaz tierra-agua y reducir errores asociados a la discretización espacial.

Al aplicar de forma sistemática el procedimiento de detección automática sobre el conjunto completo de imágenes satelitales disponibles, se obtiene una serie temporal del ancho efectivo de la desembocadura. Esta serie permite analizar la variabilidad espaciotemporal del canal estuarino, identificando patrones de apertura y cierre, así como posibles tendencias estacionales o de largo plazo.

## 5.6.2 Calibración y Validación de los Resultados.

La determinación del umbral dinámico  $U$  se lleva a cabo mediante un proceso de calibración iterativo que ajusta el parámetro  $P$ , correspondiente al porcentaje aplicado a la amplitud relativa  $\Delta$  del perfil espectral mNDWI. Este parámetro determina la sensibilidad del umbral espectral que delimita el canal activo de la desembocadura.

Para llevar a cabo este proceso de calibración, se utilizan mediciones de referencia del ancho de desembocaduras obtenidas a partir de imágenes de alta resolución disponibles para cada sitio. Este proceso comienza con la identificación de fechas en las que coinciden imágenes satelitales (Landsat o Sentinel-2) y capturas históricas de alta resolución disponibles en la plataforma de Google Earth Pro. Para estas fechas, se realiza una medición manual del ancho de desembocadura utilizando la herramienta de medición de distancias, considerando la sección más angosta del canal de desembocadura, comúnmente denominada zona de estrangulamiento o “cuello de botella”.

Una vez obtenidas las mediciones de referencia, se aplica el algoritmo de detección automática de anchos sobre el conjunto de imágenes satelitales correspondientes, generando estimaciones teóricas del ancho de la desembocadura  $b$  para distintos valores naturales de  $P$  menores a 100. En este contexto, un valor de  $P = 100$  implicaría considerar como parte activa de la desembocadura todo tramo del perfil mNDWI con valores inferiores a la mediana  $M_{mNDWI}$ , mientras que valores cercanos a  $P = 1$  restringen dicha zona únicamente al entorno del valor mínimo del perfil.

Para cada valor de  $P$  evaluado, se calcula el error absoluto medio (MAE) entre el registro de anchos teóricos  $b_i$  detectados automáticamente y los anchos de referencia medidos manualmente  $b_i^*$ , según la siguiente expresión.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |b_i - b_i^*| \quad (5.7)$$

De esta forma, se evalúa el desempeño del algoritmo para cada configuración, seleccionando como valor óptimo de  $P$  aquel que minimiza el error respecto a las observaciones de referencia.

Este enfoque ofrece una buena estimación del ancho real de desembocadura a partir de datos satelitales de mediana resolución. Sin embargo, presenta algunas limitaciones asociadas a la resolución espacial y la calidad espectral de las imágenes. Cuando el canal de la desembocadura es más estrecho, su ancho puede situarse por debajo del tamaño de píxel de la imagen generando subestimaciones. Asimismo, factores como la nubosidad residual, reflectancia especular o ruido pueden alterar distorsionar los valores del índice espectral.

Para mitigar estos efectos, se incorpora el uso de tres coeficientes numéricos ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) los cuales corrigen el valor del ancho teórico  $b$ , ponderándolo mediante parámetros espectrales y geométricos correlacionados con el tamaño real de la desembocadura. El ancho corregido  $b'$  se calcula como:

$$b' = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot b \quad (5.8)$$

donde cada coeficiente se define mediante una función exponencial asociada a un parámetro diagnóstico:

- Coeficiente  $\alpha$  – Sensibilidad de la amplitud relativa  $\Delta$ :

$$\alpha = A \cdot e^{B \cdot \Delta} \quad (5.9)$$

Aquí,  $A$  representa un factor de escala general, mientras que  $B$  modula el crecimiento o decrecimiento exponencial del ajuste en función de la amplitud relativa  $\Delta$ , es decir, de la diferencia entre la mediana y el mínimo del perfil mNDWI.

- Coeficiente  $\beta$  – Ajuste por variabilidad espectral:

$$\beta = e^{C \cdot \sigma^2} \quad (5.10)$$

El parámetro  $\sigma^2$  representa la varianza de los valores del índice espectral a lo largo del transecto. El valor  $C$  modula el refuerzo o atenuación del ancho en función de cuán ruidoso o uniforme sea el perfil.

- Coeficiente  $\gamma$  – Dependencia directa del ancho original  $b$ :

$$\gamma = e^{D \cdot b} \quad (5.11)$$

Con  $D$  se calibra un ajuste que crece o decrece exponencialmente según el valor inicial de ancho  $b$ , incorporando así un efecto de escala que puede corregir subestimaciones en canales muy estrechos o sobredetecciones en canales muy anchos.

En conjunto, estos coeficientes permiten optimizar la estimación del ancho efectivo de la desembocadura para cada registro satelital, compensando tanto las variaciones en la respuesta espectral del agua y del suelo como los efectos de resolución y ruido de las imágenes.

La determinación de los términos  $A, B, C$  y  $D$ , que definen las funciones correctivas del ancho estimado  $b'$ , se realiza mediante un proceso de calibración numérica. Para ello, se define una función objetivo que cuantifica el error entre los anchos corregidos  $b'$  obtenidos mediante el modelo y los anchos reales de referencia  $b^*$  obtenidos manualmente. Para este caso se utiliza el error cuadrático medio (ECM) como métrica de ajuste:

$$\text{Error}(A, B, C, D) = \sum_{i=1}^N (b'_i - b_i^*)^2 \quad (5.12)$$

La calibración se desarrolla en dos etapas complementarias. En primer lugar, se implementa una búsqueda exhaustiva sobre un conjunto discreto de valores definidos para cada uno de los parámetros. Esto consiste en generar todas las combinaciones posibles dentro de los rangos preestablecidos para  $A, B, C$  y  $D$ , evaluando el ECM para cada una de ellas. Esta etapa, equivalente a una búsqueda por fuerza bruta sobre una rejilla multidimensional del espacio de parámetros, permite explorar de forma completa y sistemática el dominio de soluciones.

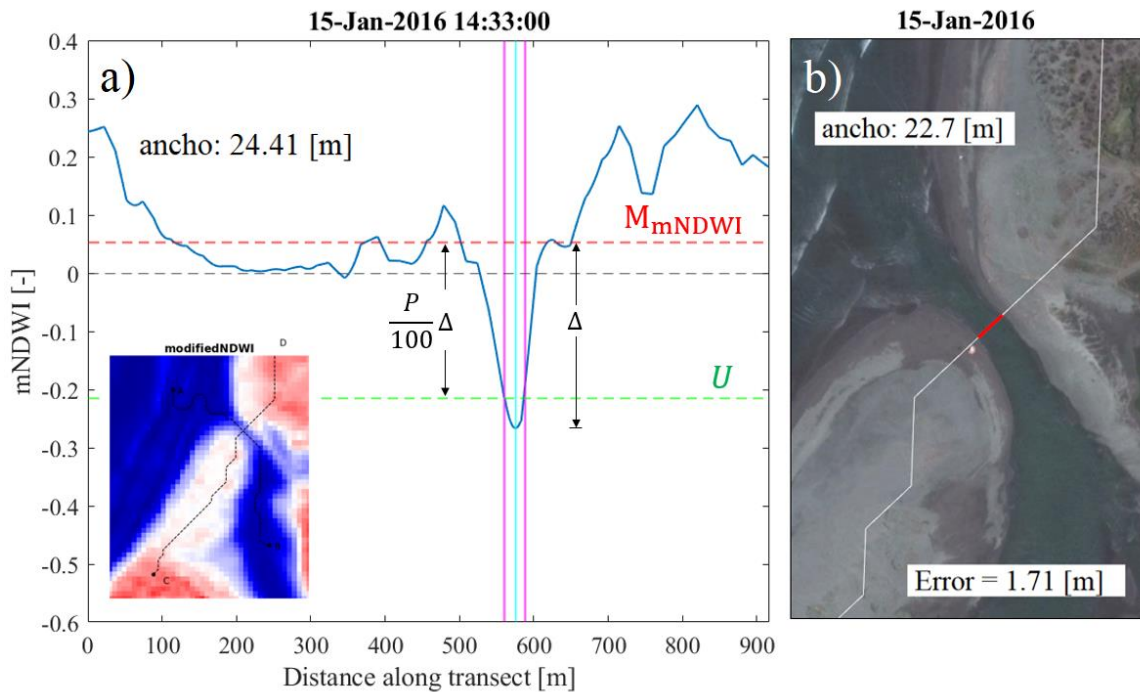
A pesar del alto costo computacional, esta estrategia garantiza la identificación de una combinación inicial robusta de parámetros, lo cual resulta especialmente útil en contextos donde la función de error presenta múltiples mínimos locales.

Una vez obtenida la mejor combinación inicial mediante la búsqueda exhaustiva, se procede a una optimización local continua basada en el algoritmo de Nelder-Mead (Nelder & Mead, 1965), una técnica de optimización no lineal la cual permite refinar la solución inicial mediante la exploración iterativa del espacio de parámetros sin requerir derivadas.

Este enfoque híbrido combina la robustez de la búsqueda global discreta con la precisión de una optimización local continua, maximizando así la posibilidad de encontrar una configuración óptima de parámetros ajustada al conjunto de datos disponibles. El resultado será un conjunto de coeficientes calibrados que mejora la fidelidad del modelo en la estimación automática del ancho de desembocadura, considerando las variaciones naturales y las limitaciones inherentes al uso de imágenes satelitales.

El método de detección automática de anchos de desembocadura es validado al comparar sus resultados con mediciones reales que no se hayan utilizado en la fase de calibración (Figura 5.7). En escenarios donde la disponibilidad de registros satelitales de alta resolución es limitada, se recurre a esquemas de validación cruzada, con el fin de maximizar la utilidad del conjunto reducido de datos de referencia. Particularmente, se implementa la modalidad *leave-one-out* (LOOCV), en la cual cada

registro con medición manual de referencia es excluido del proceso de calibración y es utilizada individualmente como punto de validación, rotando de forma secuencial para cubrir todas las observaciones disponibles.



**Figura 5.7:** a) Ilustración de método de detección automática de ancho de desembocaduras. En azul se muestra el perfil de valores del índice  $mNDWI^{(-1)}$  a lo largo de la barrera. Se indica el cálculo del parámetro  $\Delta$  como la diferencia entre la mediana y el valor mínimo del transecto. La línea punteada verde corresponde al umbral relativo  $U$ . b) Validación de resultados a partir de anchos estimados con Google Earth Pro.

Dado que se trabaja con imágenes de resolución espacial limitada (10 metros por píxel para Sentinel-2 y 15 metros para Landsat), y considerando que algunos anchos de desembocaduras pueden encontrarse dentro de ese mismo orden, se adopta un criterio práctico de validación basado en el error absoluto medio ( $MAE$ ), donde se establece que el método logra una buena capacidad de generalización si el  $MAE$  se encuentra por debajo del tamaño de píxel del sensor de menor resolución (es decir,  $MAE < 15 [m]$ ).

Este criterio permite asegurar que el método no solo ajusta bien los datos utilizados en calibración, sino que conserva un buen desempeño ante nuevas observaciones, validando su aplicabilidad para el análisis temporal de la morfología estuarina.

## 5.7 Análisis Estadístico

Una vez validadas las series temporales de ancho de desembocadura obtenidas mediante la metodología descrita, se procede a su análisis estadístico, con el objetivo de caracterizar su comportamiento temporal tanto en escala interanual como estacional.

Para llevar a cabo esta tarea, es importante señalar que la base de datos presenta una distribución temporal desigual, con una alta densidad de imágenes entre 2017 y 2024, y una cobertura mucho más reducida entre 1985 y 2016, esto producto de la incorporación de plataformas como Sentinel-2 y la mejora en la frecuencia de adquisición de Landsat 8. Esta asimetría puede inducir una sobrerrepresentación de los resultados del periodo de 2017 a 2024 en comparación con los años anteriores y sesgos al calcular tendencias o comparar estadísticos globales. Para evitar sesgos asociados a esta distribución desigual en la base de datos, los análisis estadísticos se calculan a partir de las medianas mensuales en lugar de los registros diarios, lo que permite asegurar una representación más equilibrada de los resultados a lo largo del tiempo.

Adicionalmente, se opta por segmentar el análisis por periodos temporales diferenciados, evitando tratar la serie como un registro homogéneo. Dada la fuerte evidencia de un cambio estructural en el régimen hídrico en la zona central de Chile a partir de 2010 (Bozkurt, et al., 2018; Garreaud, et al., 2019), se optó por dividir el análisis estadístico de las desembocaduras en los periodos de 1985 a 2009 (previo a la crisis hídrica) y 2010 a 2024 (crisis hídrica). Esta segmentación temporal permite evaluar cómo la variabilidad del régimen fluvial ha influido en la evolución morfológica de los estuarios, y al mismo tiempo favorece una mayor consistencia interna dentro de cada periodo para la aplicación de estadísticas descriptivas y comparativas.

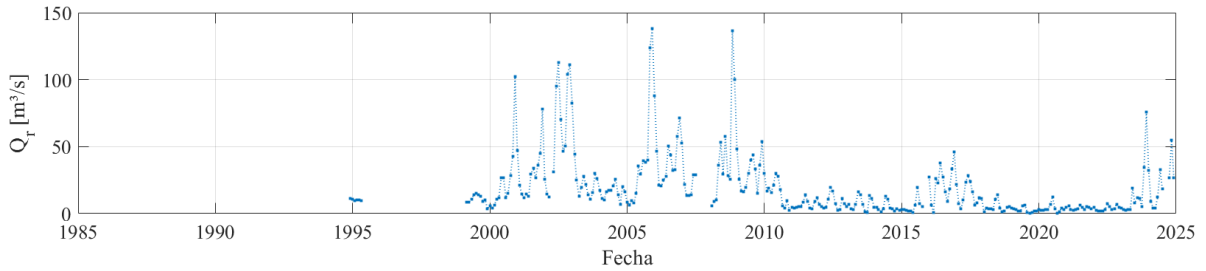
Sobre estas series temporales segmentadas y estandarizadas, se realiza un análisis estadístico descriptivo que incluye medidas de tendencia central (media, mediana), dispersión (desviación estándar), detección de valores atípicos mediante diagramas de cajas, y visualización temporal de la a través de gráficos de líneas.

Finalmente, con el fin de identificar tendencias a largo plazo en la serie temporal estandarizada completa, se aplica la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), la cual permite evaluar la existencia de tendencias significativas sin asumir una distribución específica de los datos.

## 5.8 Correlación de Anchos con Forzantes Hidrodinámicas

Con el objetivo de evaluar los factores que controlan la dinámica morfológica del estuario, se analiza la relación entre el ancho del canal de desembocadura y las principales forzantes hidrodinámicas. Para ello, se utiliza el coeficiente de correlación de Spearman (Spearman, 1904), útil para el análisis de series temporales no lineales. Este análisis permite determinar en qué medida las variaciones en las forzantes hidrodinámicas se asocian con procesos de apertura, cierre o ajuste del canal de desembocadura, aportando evidencia cuantitativa clave para comprender los mecanismos que controlan la evolución morfológica de estuarios de tipo barrera en la zona central de Chile.

El análisis principal se centra en la correlación entre anchos de desembocadura y los caudales medios mensuales del río aportante (Figura 5.8). Estos caudales se obtienen a partir de estaciones fluviométricas ubicadas aguas arriba de cada desembocadura, utilizando datos disponibles en el Explorador de Cuencas CAMELS-CL del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2: <https://camels.cr2.cl/>) y en reportes del Sistema Nacional de Información de Agua de la Dirección General de Aguas (DGA: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>).



**Figura 5.8:** Ejemplo serie de tiempo de caudales medios mensuales de río obtenidos para el estuario del Río Aconcagua a partir de la estación fluviométrica Río Aconcagua en Romeral (BNA 05423003-6).

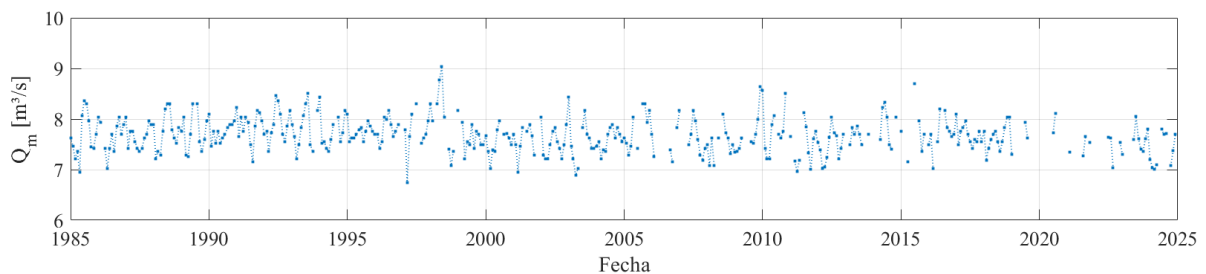
A diferencia de los caudales fluviales, la disponibilidad de datos oceanográficos es más limitada, tanto espacial como temporalmente. Por este motivo, los análisis relacionados con variables de marea y oleaje se realizan de forma complementaria, en la medida que exista información disponible para cada sitio de estudio.

Bajo este contexto, se evalúa la relación entre los anchos de desembocadura y el caudal total de salida, estimado mediante la ecuación de balance de masa formulada por Keulegan (1967) (ver ecuación 3.1). Para estimar el primer término de esta ecuación, correspondiente al caudal de desembocadura inducido por la marea, se utilizan registros horarios de nivel del mar obtenidos desde mareógrafos administrados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA: <https://www.shoa.cl/>).

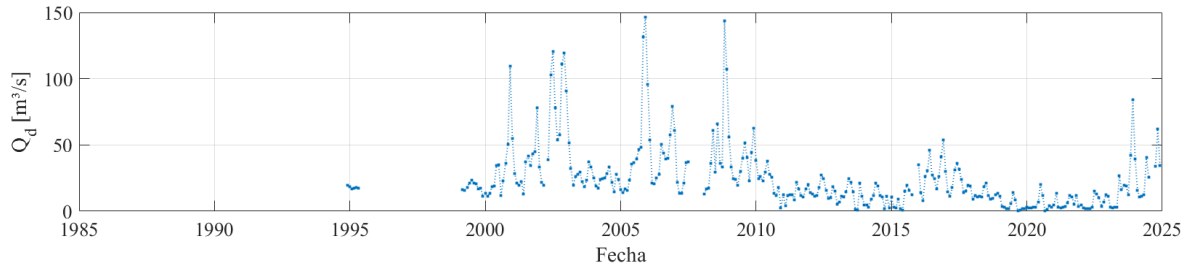
A partir de esta información, se estima el rango de marea diario  $h_t$ , definido en este trabajo como la diferencia entre el valor máximo y mínimo del nivel del mar registrado en un mismo día. Suponiendo que la transición entre pleamar y bajamar ocurre en un intervalo de tiempo aproximado de seis horas ( $\Delta t = 6$  h), se estima la tasa media de cambio del nivel del mar como:

$$\frac{d\eta}{dt} \approx \frac{h_t}{\Delta t} \quad (5.13)$$

Con esta estimación y considerando un valor constante para el área superficial del estuario  $A_s$ , se calcula el caudal de marea  $Q_m$  (Figura 5.9). Sumando a este valor el caudal fluvial  $Q_r$ , se obtiene el caudal total en la desembocadura  $Q_d$  (Figura 5.10), el cual es utilizado en los análisis de correlación con el ancho de desembocadura.

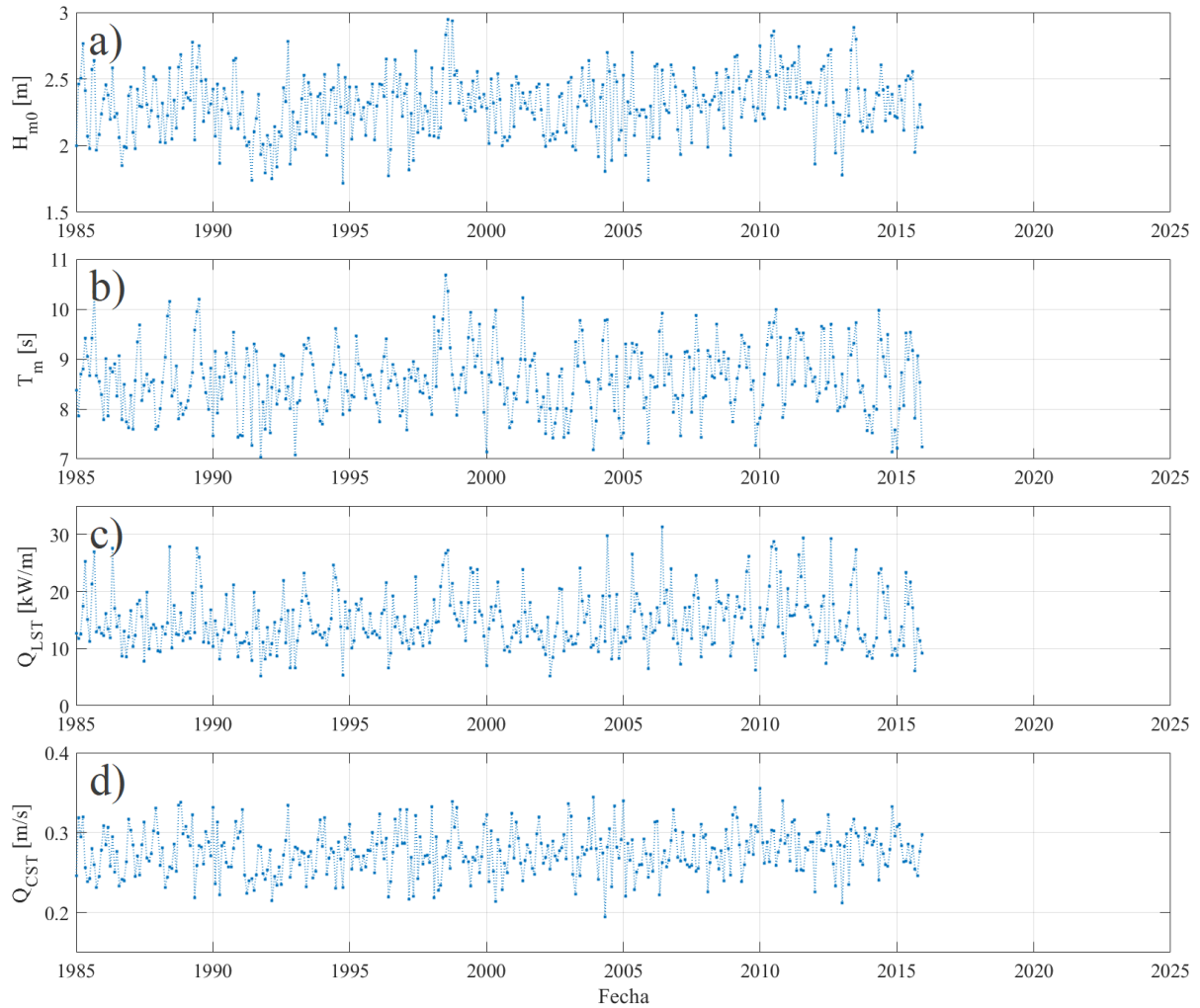


**Figura 5.9:** Ejemplo serie de tiempo de caudales medios mensuales de marea obtenidos para el estuario del Río Aconcagua a partir de datos de rango de marea de SHOA para Valparaíso.



**Figura 5.10:** Ejemplo serie de tiempo de caudal total de desembocadura para el estuario del Río Aconcagua a partir de la suma de los caudales de río y de marea.

Por otro lado, se examina preliminarmente la relación entre el ancho de desembocadura y variables características del oleaje, tales como la altura significativa, el periodo medio y la dirección media del oleaje. Esta información se obtiene del Atlas de Oleaje de Chile de la Universidad de Valparaíso (UV: <https://oleaje.uv.cl/>), el cual entrega series temporales de clima de oleaje en diferentes puntos de la costa chilena generadas a partir de simulaciones del modelo Wavewatch III. A partir de estas variables se calculan, además, expresiones simplificadas de transporte transversal (cross-shore transport, CST) y longitudinal (longshore transport, LST) de sedimentos, con el propósito de evaluar si estos procesos controlados por el oleaje se encuentran asociados a cambios morfológicos en la desembocadura. Las series de tiempo de las variables en estudio se muestran a modo de ejemplo en la Figura 5.11.



**Figura 5.11:** Ejemplo de series de tiempo de variables de clima de oleaje para el Nodo 8 del Atlas de Oleaje de Chile, asociado a la localidad de Valparaíso. En a) Altura significativa mensual promedio, en b) periodo de oleaje mensual promedio, en c) expresión de transporte LST mensual promedio y en d) expresión de transporte CST mensual promedio.

# 6. Resultados

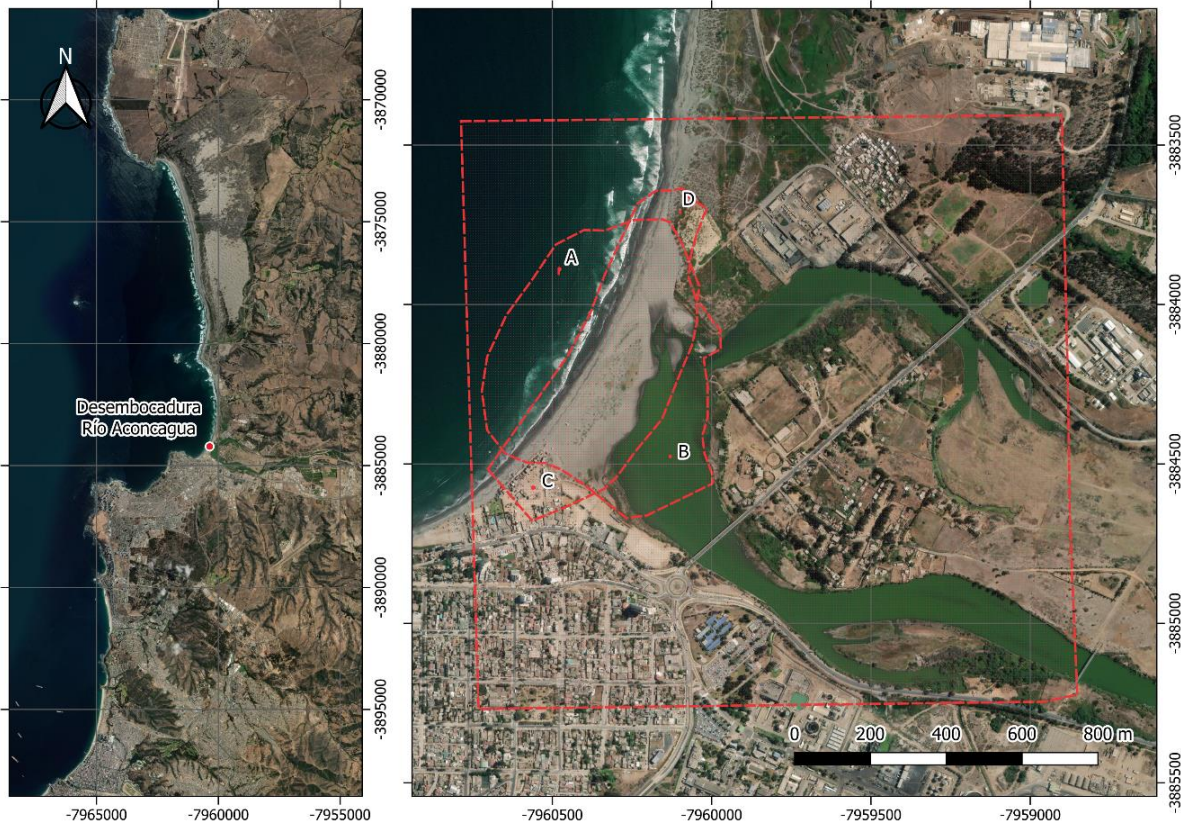
## 6.1 Introducción

En este capítulo se presentan resultados para cada uno de los sitios de estudio, siguiendo la metodología recién descrita. Con el objetivo de ejemplificar de manera detallada el enfoque de análisis utilizado, en la sección 6.2 se expone en primer lugar el caso del estuario del Río Aconcagua. Este análisis preliminar permite ilustrar paso a paso la aplicación de los distintos procedimientos metodológicos, sirviendo como referencia para la presentación de resultados de los demás sitios. En la sección 6.3 se muestra el resto de los resultados para los demás sitios. Finalmente, en la sección 6.4 se muestra un resumen de los resultados a método de comparación entre los diferentes sitios

## 6.2 Estuario del Río Aconcagua

### 6.2.1 Geometría Espacial

Los polígonos definidos para la detección de transectos del método de rutas de menor costo de InletTracker se presentan en la Figura 6.1.



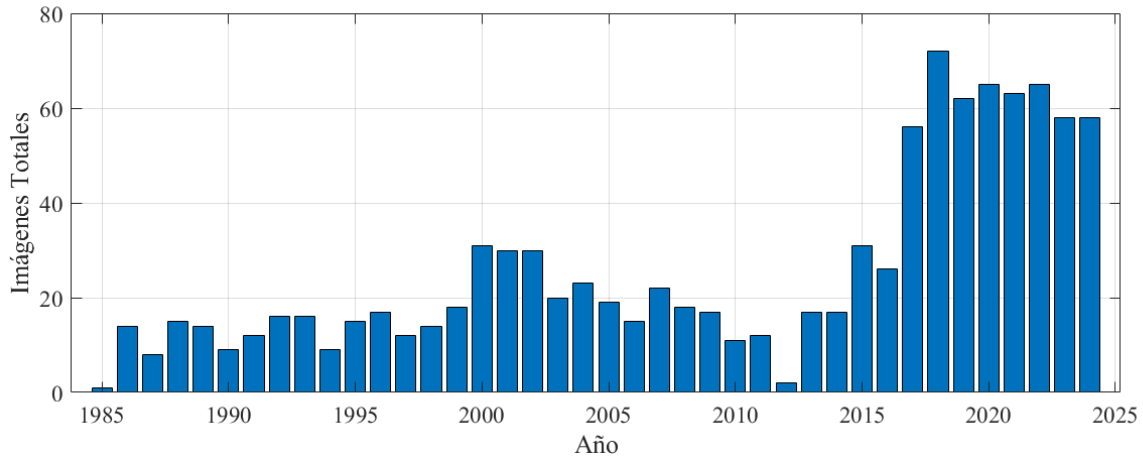
**Figura 6.1:** Distribución espacial de los polígonos utilizados en el análisis de rutas de menor costo para la desembocadura del Río Aconcagua utilizados en coordenadas UTM (Zona 19S, datum WGS84). En el panel izquierdo se presenta una vista de contexto regional con el punto de ubicación de la desembocadura. En el panel derecho detalle de los polígonos definidos. La línea roja discontinua externa representa el polígono `full_bounding_box`. Los polígonos intermedios muestran las máscaras A-B y C-D utilizadas como regiones de búsqueda para la rutas transversal y longitudinal a la barra de arena, respectivamente. Se muestran también los puntos semilla A y C y los puntos receptores B y D.

### 6.2.2 Registro Satelital

Los registros satelitales de acceso público obtenidos para el periodo entre 1985 y 2024 a través de Google Earth Engine se presentan en la Tabla 6.1. El número total de imágenes satelitales por año se presenta en la Figura 6.2. Se recopilaron un total de 2.238 imágenes satelitales para el estuario del Río Aconcagua, de las cuales 1.031 contaban con calidad suficiente para ser procesadas en la determinación del estado de conexión y el ancho de desembocadura del estuario.

**Tabla 6.1:** Registros satelitales disponibles para el estuario del Río Aconcagua.

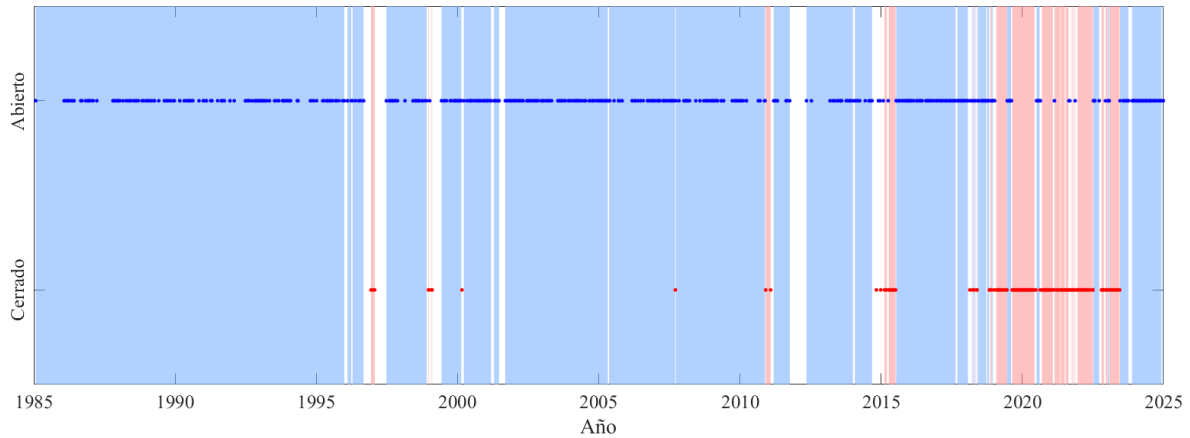
Satélite	Periodo	Imágenes Totales	Imágenes Procesadas
L5	1985 – 2011	589	351
L7	1999 – 2021	788	109
L8	2013 – 2021	345	195
S2	2015 – 2024	516	376

**Figura 6.2:** Número total de registros satelitales procesados por año natural para el estuario del Río Aconcagua.

Tal como se mencionó en la Sección 5.7, a partir del año 2017 se observa un incremento notable en la frecuencia de registros. Con el fin de estandarizar la densidad temporal de las observaciones y evitar que años con una mayor frecuencia de imágenes distorsionen los resultados, se realiza un procesamiento mensual de las series normalizando la densidad temporal. Para cada mes se calcula la mediana de los valores registrados, obteniendo así un único valor por mes y a su vez reduciendo el efecto de observaciones anómalas o ruido en los datos.

### 6.2.3 Estado de Conexión

Las imágenes procesadas son analizadas mediante la interfaz de clasificación del estado de imágenes de InletTracker (Heimhuber, et al., 2021), de acuerdo con la metodología descrita en la Sección 5.5 de este documento. Los resultados se presentan en el gráfico de la Figura 6.3, en donde se indica el estado de conexión (abierto o cerrado) de la desembocadura del estuario inferido visualmente a lo largo del registro satelital.



**Figura 6.3:** Estado de conexión de la desembocadura del Río Aconcagua inferido visualmente a lo largo del registro satelital. Los puntos representan una imagen individual procesada indicando su estado. En sombreado azul se indica cada vez que se registran estados de conexión abiertos consecutivos, mientras que en sombreado rojo, cuando se registran estados de conexión cerrados consecutivos. Las secciones no sombreadas indican que no existen dos estados iguales consecutivos o que el estado de conexión fue indeterminado.

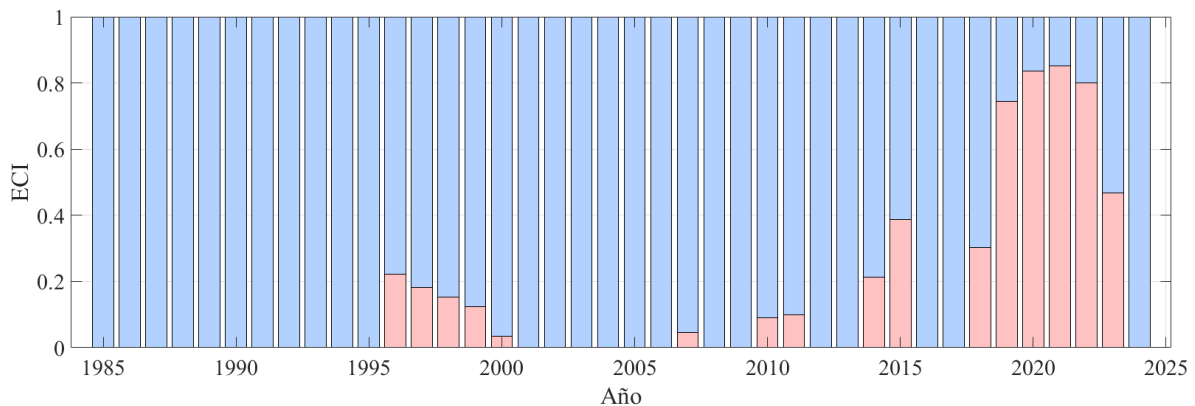
El comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura se presenta en la Figura 6.4. En esta figura se puede observar en color azul a los meses en que solamente se observan desembocaduras abiertas, en rojo los meses en que se observan desembocaduras cerradas y en amarillo a los meses en que se observó una intermitencia, es decir estados abiertos y cerrados, o existen registros indeterminados a lo largo de dicho mes.

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	Blue	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White
1986	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	Blue	Blue
1987	Blue	Blue	Blue	White	White	White	White	White	White	Blue	White	Blue
1988	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
1989	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue
1990	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue	White
1991	Blue	Blue	White	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue
1992	White	Blue	White	White	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue
1993	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue
1994	Blue	Blue	White	White	Blue	White	White	White	White	Blue	Blue	White
1995	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue
1996	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Blue	White	Blue	White	Blue	White	Yellow	Red
1997	Red	White	White	White	White	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue	White
1998	White	Blue	White	White	White	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue	Red
1999	Blue	Red	Yellow	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
2000	Blue	Yellow	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
2001	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Yellow	White	White	Blue	White	Blue	Blue
2002	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
2003	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
2004	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue
2005	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	White	Blue	Blue	Blue	White	White	White
2006	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2007	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	White	Blue	White
2008	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2009	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2010	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	White	Yellow	White
2011	White	Yellow	Blue	Blue	White	White	White	Blue	Blue	Blue	Yellow	White
2012	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
2013	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue
2014	Yellow	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	White	Yellow
2015	Blue	Red	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Blue	White	Blue	Blue	Blue
2016	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2017	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue
2018	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Yellow
2019	Yellow	Red	Red	Red	Red	Yellow	Blue	Yellow	Red	Red	Red	Red
2020	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Blue	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
2021	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
2022	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	White	Blue	Red	Red	Yellow
2023	Yellow	Red	Red	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue
2024	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow

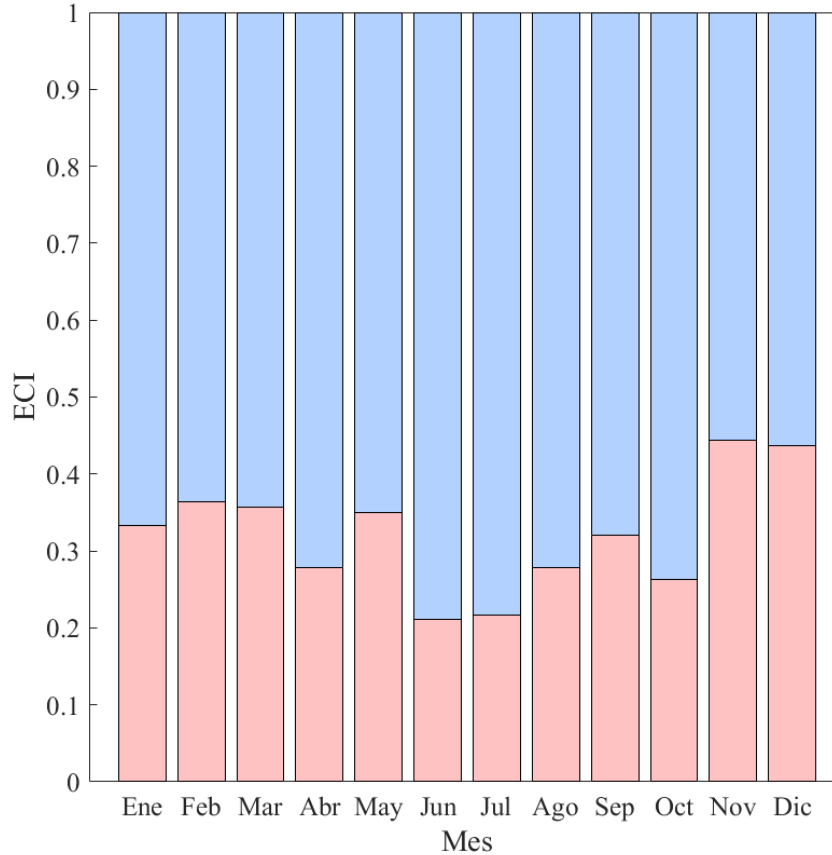
**Figura 6.4:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Aconcagua determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura registrado durante el mes: En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante un mismo mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

Cabe destacar que, tal como se mencionó en la Sección 5.5, dentro del proceso de clasificación del estado de conexión, se contempla la categoría de indeterminado para aquellos registros en que no es posible establecer con certeza si la desembocadura se encuentra abierta o cerrada. En estos casos, y con el fin de mantener rigurosidad en el análisis, se opta por clasificar el registro como indeterminado en lugar de forzar una decisión binaria que podría inducir errores en la serie temporal de estado de conexión. A pesar de esto, tal como se puede ver en la Figura 6.3 y Figura 6.4, los registros clasificados como indeterminados son incluidos en la visualización de los resultados debido a que igualmente aportan información sobre la morfología de la desembocadura. En particular, la presencia recurrente de imágenes con clasificación indeterminada puede interpretarse como evidencia de una desembocadura poco desarrollada o de tamaño reducido, lo cual podría estar asociado a estados transicionales del sistema.

Los resultados de estado de conexión son complementados con el parámetro morfométrico ECI (Haines, 2006), el cual se calcula como la razón entre el número de imágenes satelitales en que la desembocadura se encuentra cerrada y el número total de imágenes validadas sobre este periodo. En la Figura 6.5 se presentan los valores anuales de ECI para todo el registro satelital procesado, en donde se calculó un ECI anual promedio de 0,14 para todo el periodo de estudio. Por otro lado, en la Figura 6.6 se muestra la estacionalidad de este parámetro mediante valores mensuales.



**Figura 6.5:** Entrance Closure Index (ECI) anual calculado para el registro satelital de la desembocadura del Río Aconcagua. En las barras de color rojo se indica el valor de ECI mientras que en color azul se indica el valor de 1-ECI.



**Figura 6.6:** Estacionalidad registrada del índice ECI para el registro satelital del periodo de 1985 a 2024 de la desembocadura del Río Aconcagua. En las barras de color rojo se indica el valor de ECI mientras que en color azul se indica el valor de 1-ECI.

Para caracterizar la estabilidad morfológica e intermitencia del sistema, se analizan los periodos consecutivos de apertura y cierre del estuario mediante el cálculo de su duración media, mediana y máxima registrada. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Tabla 6.2, diferenciados según los distintos periodos temporales considerados.

**Tabla 6.2:** Resumen estadístico de la duración de los periodos consecutivos del estado de conexión del estuario del Río Aconcagua.

Sitio	Periodo	Estado	Media (días)	Mediana (días)	Máximo (días)
Río Aconcagua	1985-2024	Abierto	432	19	4240
		Cerrado	55	25	308
	1985-2009	Abierto	1427	665	4240
		Cerrado	13	7	48
	2010-2024	Abierto	153	11	1273
		Cerrado	66	28	308

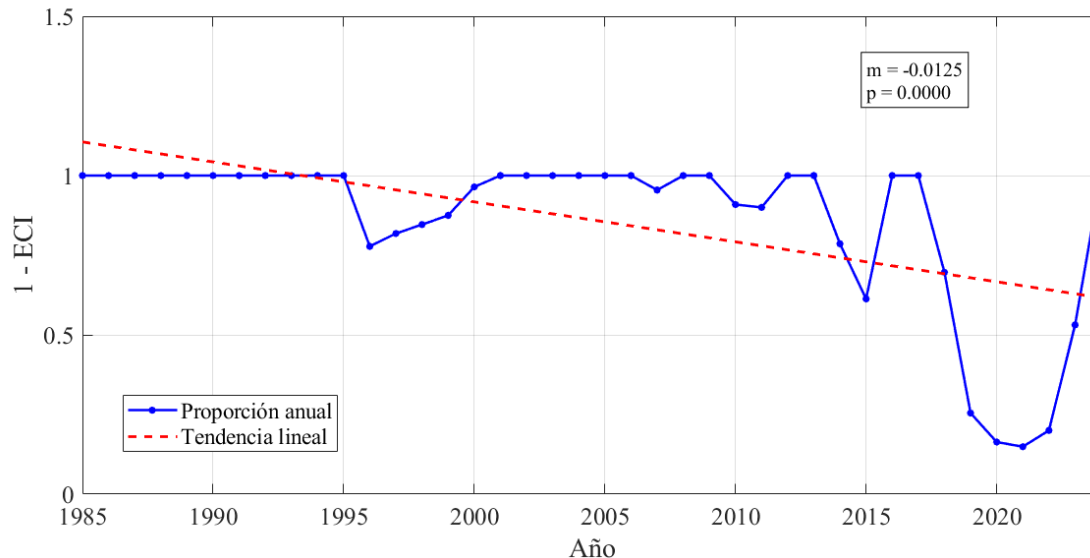
Por otro lado, para abordar la dinámica de cambio, se construye una matriz de transición de primer orden (Tabla 6.3), donde se muestran las probabilidades condicionales de pasar de un estado a otro en la siguiente observación.

**Tabla 6.3:** Matrices de transición de estados de conexión para el estuario del Río Aconcagua.

Sitio	Estado	Abierto	Cerrado
Río Aconcagua	Abierto	0,96	0,04
	Cerrado	0,13	0,87

Finalmente, se evalúa la existencia de una tendencia a largo plazo en el estado de conexión del estuario mediante el análisis de la proporción anual de tiempo en que este se mantuvo abierto, calculada como  $1 - \text{ECI}$ . En este contexto, valores cercanos a 1 indican años predominantemente abiertos, mientras que valores cercanos a 0 reflejan años con predominancia al cierre.

Para estimar esta tendencia, se aplica un modelo de regresión lineal simple, donde la variable dependiente es la proporción anual de aperturas ( $y = 1 - \text{ECI}$ ) y la variable independiente es el año calendario. Los resultados se presentan en la Figura 6.7, junto con la recta de ajuste, la pendiente estimada  $m$  y su correspondiente valor  $p$ . La pendiente estimada de este modelo representa el cambio anual en la proporción de tiempo abierto, mientras que el valor  $p$  asociado permite determinar si dicha tendencia es estadísticamente significativa.



**Figura 6.7:** Regresión lineal simple sobre las proporciones anuales de estados abiertos ( $1 - \text{ECI}$ ). Se presenta recta de tendencia junto a su pendiente  $m$  y valor  $p$ .

#### 6.2.4 Ancho de Desembocadura

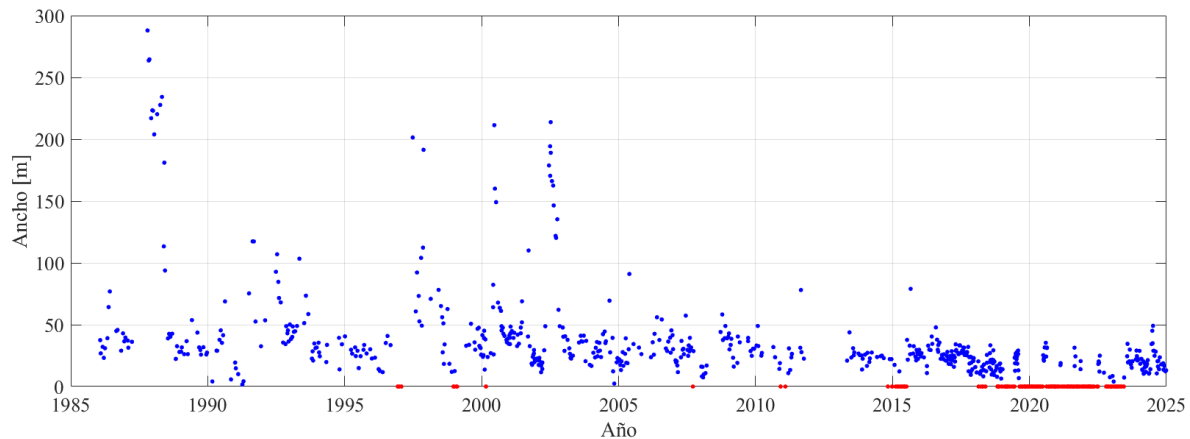
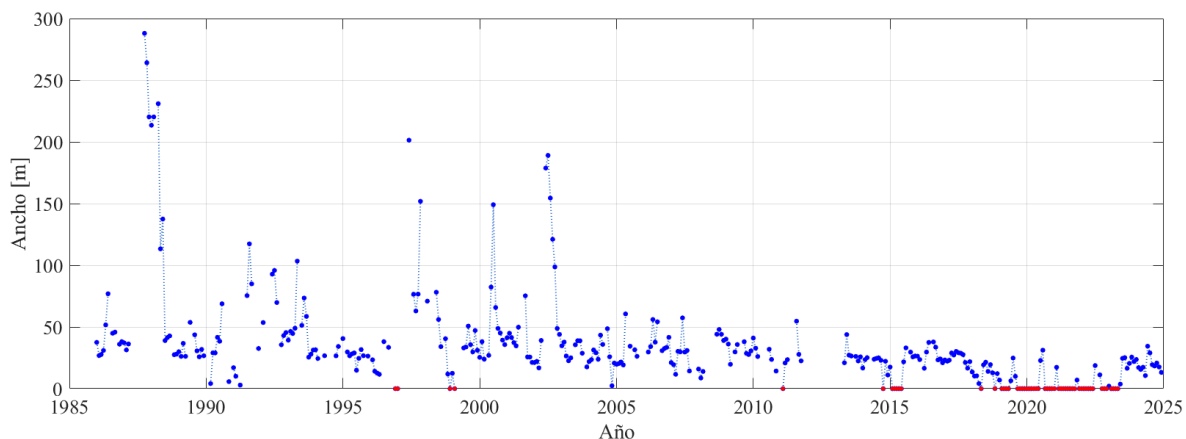
Siguiendo la metodología descrita en la Sección 5.6, se construyeron series de tiempo del ancho de desembocadura para los estuarios en estudio mediante el procesamiento de perfiles espectrales generados a partir de transectos definidos por el método de rutas de menor costo de InletTracker.

En la Tabla 6.4 se presentan los valores óptimos para los coeficiente utilizados ( $P, A, B, C$  y  $D$ ) en el proceso de calibración descrito en la Sección 5.6.2, y el valor del error absoluto medio (MAE) determinado para la validación de los resultados del sitio de estudio.

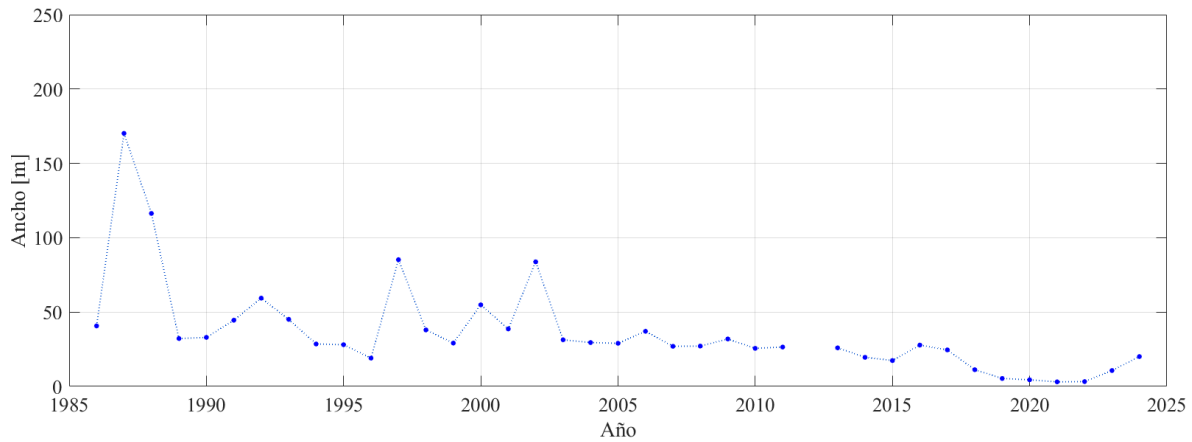
**Tabla 6.4:** Parámetros de calibración utilizados para el método de cálculo de ancho de desembocaduras y el error absoluto medio obtenido para el estuario del Río Aconcagua.

Sitio	P	A	B	C	D	MAE [m]
Río Aconcagua	72	0,9	0,5	9,0	-9,0	4,0

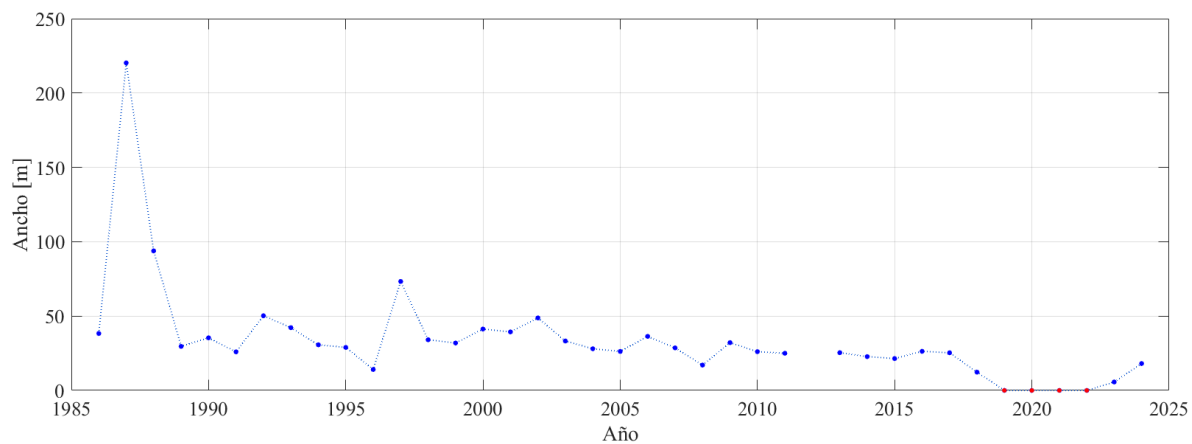
Una vez hecha la calibración y validación de los resultados ( $MAE < 15 [m]$ ), es posible construir la serie de tiempo de ancho de desembocadura para el sitio de estudio. Los resultados se presentan en el gráfico de la Figura 6.8, en donde se indica el ancho del canal de desembocadura del estuario calculado para cada registro satelital procesado. Complementariamente, en la Figura 6.9 se presenta la serie mensual del ancho mediano.

**Figura 6.8:** Ancho del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua registrado a través del método de detección automática de anchos. Cada punto representa un registro satelital procesado. En azul se indican los registros de estuario abierto, mientras que en rojo se indican episodios de cierre de la desembocadura.**Figura 6.9:** Ancho mediano mensual del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua registrado a través del método de detección automática de anchos. Cada punto representa la mediana mensual del ancho de desembocadura.

De manera complementaria, en la Figura 6.10 y Figura 6.11 se presenta la media y mediana anual del ancho de desembocadura respectivamente.

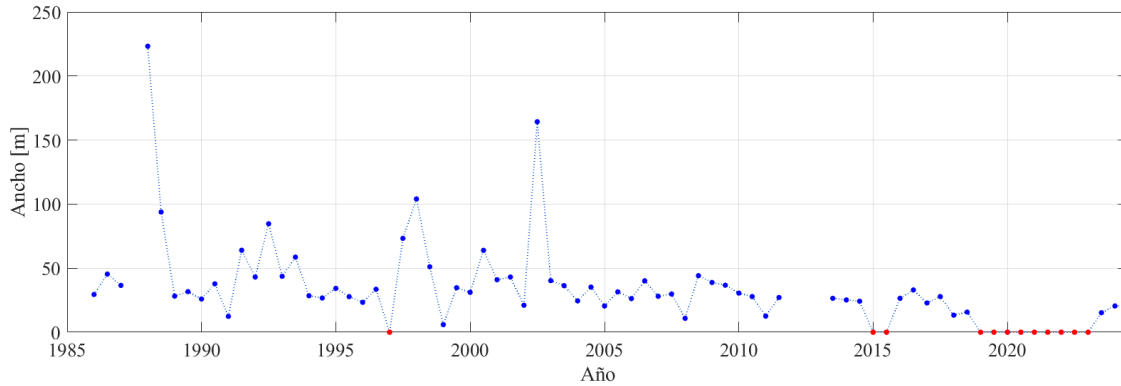


**Figura 6.10:** Ancho promedio anual calculado del canal de desembocadura a partir del registro satelital para la desembocadura del Río Aconcagua.



**Figura 6.11:** Ancho mediano anual calculado del canal de desembocadura a partir del registro satelital para la desembocadura del Río Aconcagua.

También resulta interesante visualizar los resultados de ancho de desembocadura a través de estimaciones semestrales (Figura 6.12), donde se calculan las medianas de las temporadas secas (octubre a marzo) y las temporadas húmedas (abril a septiembre).



**Figura 6.12:** Ancho mediano semestral calculado del canal de desembocadura a partir del registro satelital para la desembocadura del Río Aconcagua. Se presentan los resultados con valores medianos centrados en los meses de enero y julio.

A partir de las medianas mensuales del registro (Figura 6.9) se calculan el ancho promedio y mediano de la desembocadura para los diferentes periodos de interés. Los resultados se presentan en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5:** Estadísticos por periodo para el ancho de la desembocadura del estuario del Río Aconcagua.

Sitio	Periodo	Ancho [m]	
		Promedio	Mediano
Río Aconcagua	1985-2024	33,84	26,48
	1985-2009	47,37	34,42
	2010-2024	14,52	16,67

Por otro lado, se emplea una prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall. Los resultados se presentan en la Tabla 6.6, donde se indica el estadístico S, el cual mide la dirección de la tendencia en la serie temporal a partir de la comparación de todos los pares de observaciones, y el estadístico Z, el cual corresponde a la versión normalizada de S y permite evaluar la significancia estadística de la tendencia. A su vez se presenta el valor  $p$  de la prueba de tendencia, el cual indica la probabilidad de que la tendencia observada se deba al azar, siendo los valores de  $p < 0,05$  indicativos de una significancia estadística.

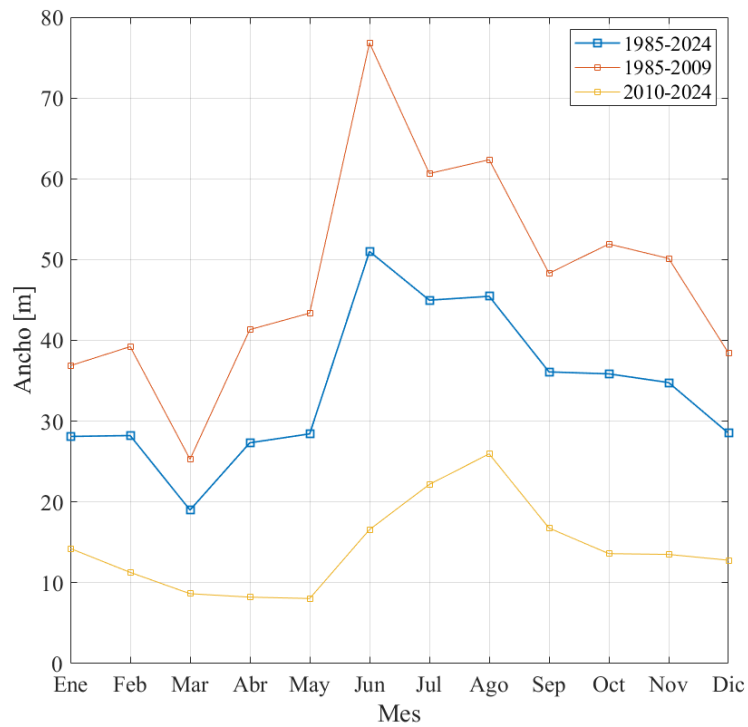
**Tabla 6.6:** Resultados Prueba de Mann - Kendall para anchos mensuales medianos registrados para la desembocadura del estuario del Río Aconcagua.

Prueba de Mann - Kendall	
S	-27915,00
Z	-12,65
p - value	0,00

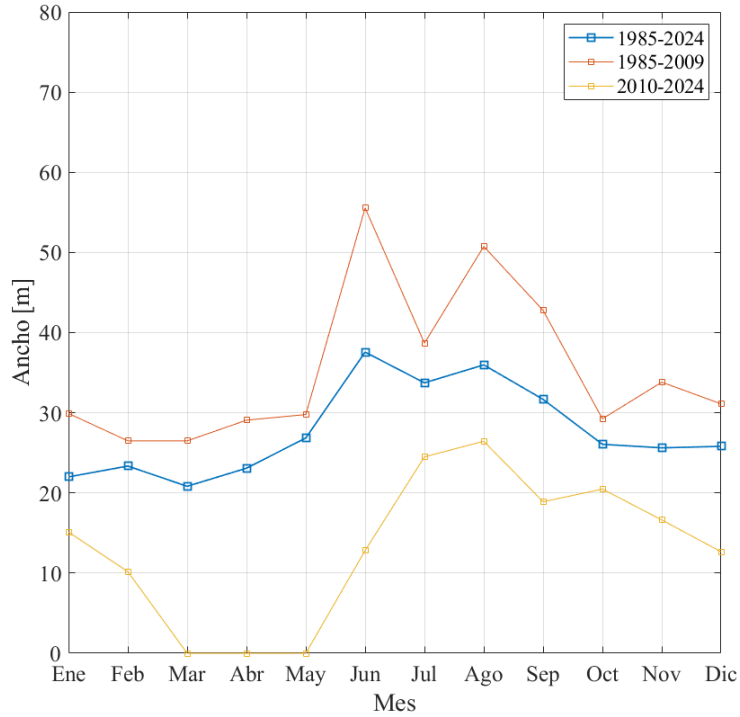
Los resultados obtenidos muestran una marcada tendencia decreciente en los anchos de la desembocadura. El signo negativo de S y Z confirma el carácter descendente de la serie, mientras que la magnitud de Z y el valor de nulo de  $p$  evidencian que la tendencia es estadísticamente significativa.

El comportamiento estacional del ancho de la desembocadura se muestra en las Figura 6.13 y Figura 6.14 a partir de su media y mediana mensual. En estas figuras se presenta una desagregación

de los resultados en donde se pueden observar los valores para los periodos de 1985 a 2024, 1985 a 2009 y 2010 a 2024.

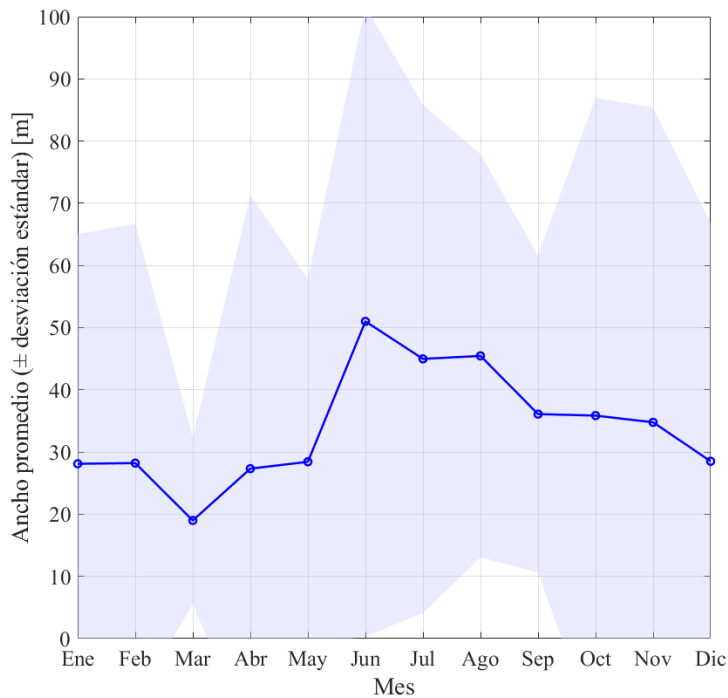


**Figura 6.13:** Ancho mensual promedio calculado del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua para los periodos indicados.



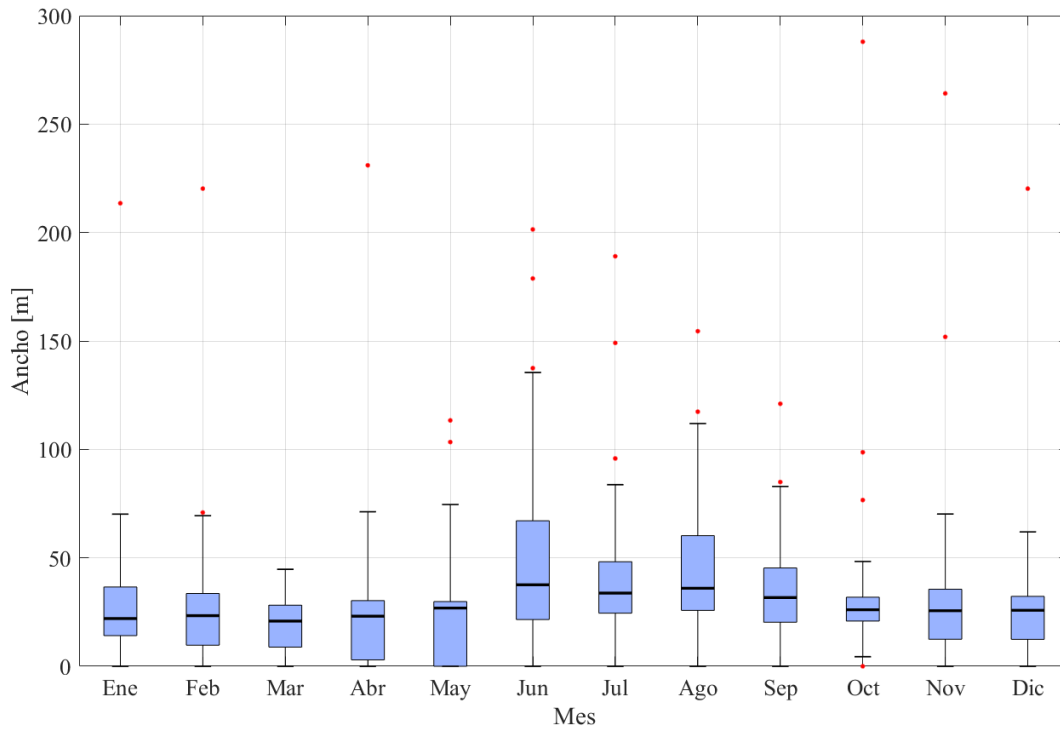
**Figura 6.14:** Ancho mensual mediano calculado del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua para los periodos indicados.

De manera complementaria, en la Figura 6.15 se presenta la desviación estandar de los resultados estacionales.

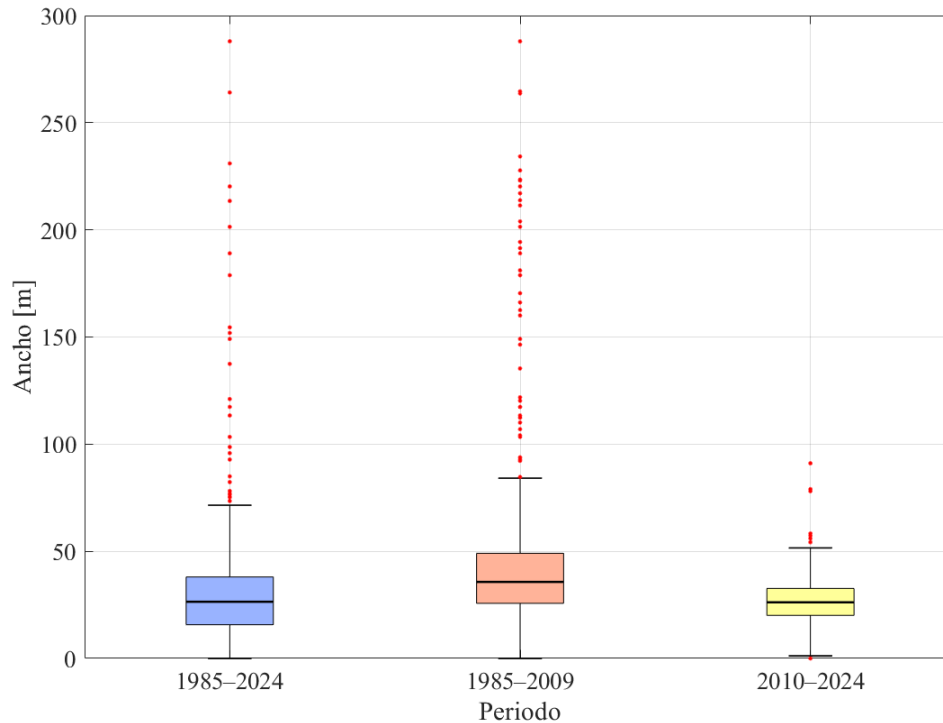


**Figura 6.15:** Ancho mensual promedio y desviación estándar calculada del canal de desembocadura a partir del registro satelital indicado para los sitios de estudio.

En la Figura 6.16 se presenta el rango intercuartílico calculado para cada mes, mientras que en la Figura 6.17 se presenta para los periodos interanuales de interés.



**Figura 6.16:** Rango intercuartílico mensual calculado para el ancho del canal de desembocadura del estuario del Río Aconcagua. La línea central de cada caja corresponde a la mediana del ancho mensual, mientras que los bordes inferior y superior de cada caja representan el primer y tercer cuartil respectivamente, delimitando el rango intercuartílico (IQR). Los bigotes se extienden hasta los valores mínimo y máximo que se encuentran dentro de 1,5 veces el IQR a partir de los cuartiles. Los puntos rojos indican valores atípicos.



**Figura 6.17:** Rango intercuartílico calculado para el ancho del canal de desembocadura del Estuario del Río Aconcagua para los diferentes periodos indicados. La línea central de cada caja corresponde a la mediana del ancho del periodo indicado, mientras que los bordes inferior y superior de cada caja representan el primer y tercer cuartil respectivamente, delimitando el rango intercuartílico (IQR). Los bigotes se extienden hasta los valores mínimo y máximo que se encuentran dentro de 1,5 veces el IQR a partir de los cuartiles. Los puntos rojos indican valores atípicos.

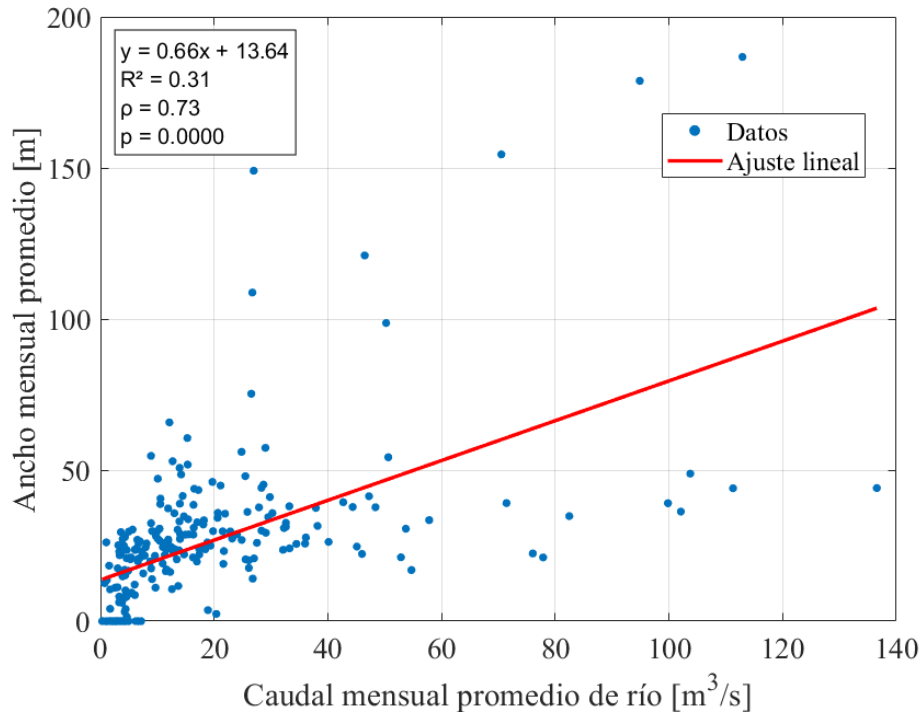
### 6.2.5 Correlación con Forzantes Hidrodinámicas

Para estudiar la relación entre el ancho de desembocadura y las forzantes hidrodinámicas que inciden en su dinámica morfológica, se evaluó la correlación entre los anchos mensuales y las variables asociadas al régimen fluvial, mareal y de oleaje. Tal como se mencionó en la Sección 5.8, se utiliza el coeficiente de correlación de Spearman, útil para el análisis de series temporales no lineales.

Cabe señalar que las correlaciones se realizan sobre promedios mensuales de cada variable, dado que para ciertos registros, como los caudales fluviales, únicamente se dispone de valores medios mensuales y no información diaria que permita calcular medianas u otros estadísticos. Esta homogenización en la escala temporal garantiza la coherencia en la comparación entre variables de distinta naturaleza y resolución.

En primera instancia, se estudia la relación entre el ancho de desembocadura y el caudal medio mensual del río aportante. En el caso del estuario del Río Aconcagua se recopilan datos de la estación fluviométrica Río Aconcagua en Romeral (BNA 05423003-6), ubicada a unos 50 km aguas arriba de la desembocadura. Es importante considerar que se cuenta con datos continuos de caudal solamente a partir de 1999, por lo cual no es posible incorporar en el análisis los datos de ancho de

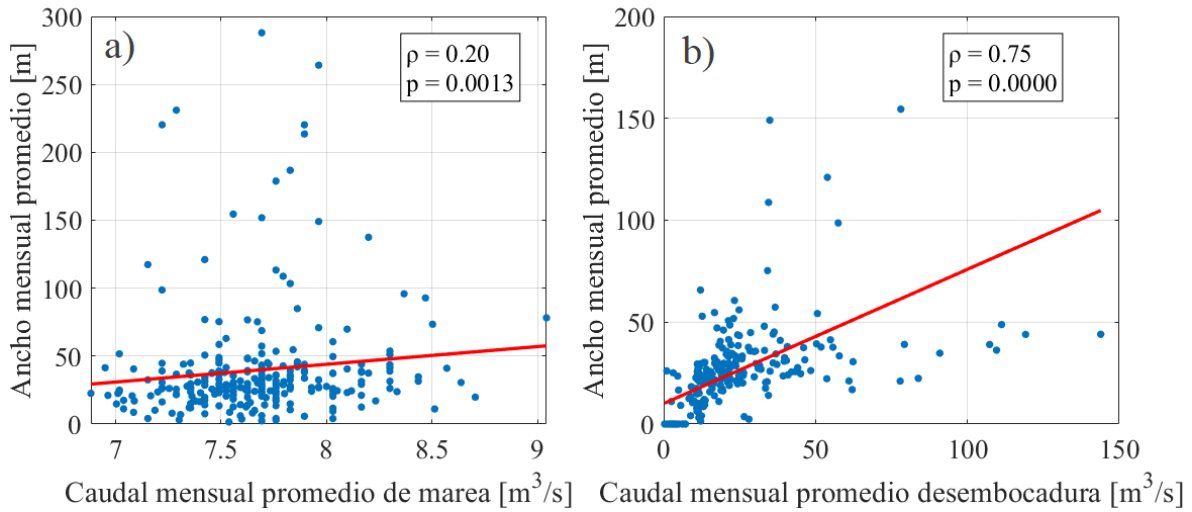
desembocadura previos a este año. Los resultados se presentan en la Figura 6.18, en donde se incluyen el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) y su respectivo valor  $p$ , junto con un ajuste lineal referencial que permite visualizar la tendencia general de los datos.



**Figura 6.18:** Ancho mensual promedio de desembocadura del estuario vs caudal mensual promedio del Río Aconcagua en Romeral. Se indican variables de regresión lineal, coeficiente  $\rho$  de correlación de Spearman y valor  $p$  asociado.

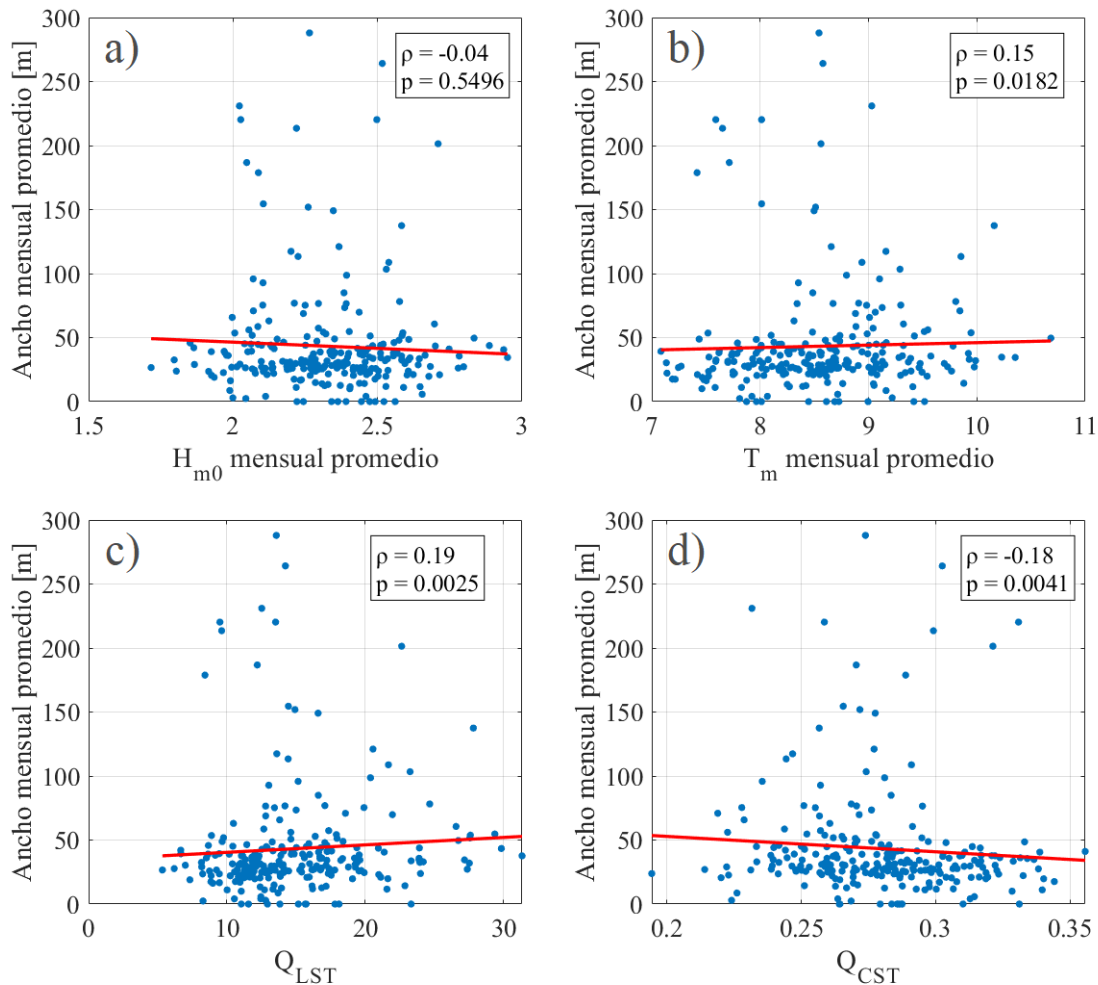
Para analizar la influencia de la marea, se estima el caudal de marea  $Q_m$  según lo descrito en la Sección 5.8. Para estimar la tasa de cambio del nivel de agua del estuario se utilizan registros horarios de nivel de mar de la estación mareográfica de Valparaíso operada por el SHOA, ubicada a unos 17 km de la desembocadura del estuario del Río Aconcagua. A partir de estos registros, siguiendo la metodología anteriormente descrita, se calcula el rango de marea diario, y posteriormente se calcula su mediana mensual, obteniendo así un valor representativo del rango de marea mensual. El área superficial del estuario se estima a partir de la herramienta de polígonos de Google Earth Pro, llegando a un valor aproximado de  $A_s = 0,15 [km^2]$ . La correlación entre el ancho de desembocadura y el caudal de marea se presenta en la Figura 6.19a.

Una vez calculado el caudal de marea, se evalúa el efecto conjunto de las forzantes fluviales y mareales a través del caudal total de desembocadura  $Q_d$ , determinado como la suma entre el caudal de la estación Río Aconcagua en Romeral y el caudal de marea recién calculado. Es importante mencionar que para los casos en que la desembocadura se registró como cerrada, se considera únicamente el caudal fluvial, ya que el intercambio mareal queda impedido por la interrupción física de la barrera estuarina. Esta consideración evita una sobreestimación del aporte hidrodinámico total cuando no existe paso efectivo de agua desde el océano hacia el estuario. La relación entre  $Q_d$  y el ancho se presenta en la Figura 6.19b.



**Figura 6.19:** Ancho mensual promedio de desembocadura del estuario vs a) caudal mensual promedio marea y b) caudal mensual promedio de desembocadura. Se indican ajuste lineal, coeficiente  $\rho$  de correlación de Spearman y valor  $p$  asociado.

Por último, se analiza la correlación entre los anchos y variables representativas del clima de oleaje, las cuales se obtienen del Nodo 8 (Lat: 33°S, Lon: 72°E) del Atlas de Oleaje de Chile, asociado a la localidad de Valparaíso. En la Figura 6.20 se presentan correlaciones entre el ancho mensual promedio de desembocadura del estuario del Río Aconcagua y los valores mensuales promedio de altura significativa  $H_{m0}$  y periodo medio de oleaje  $T_m$ . Asimismo, se muestran las correlaciones con las expresiones simplificadas de transporte longitudinal (LST) y transversal (CST) de sedimentos (ver ecuaciones 3.2 y 3.3)



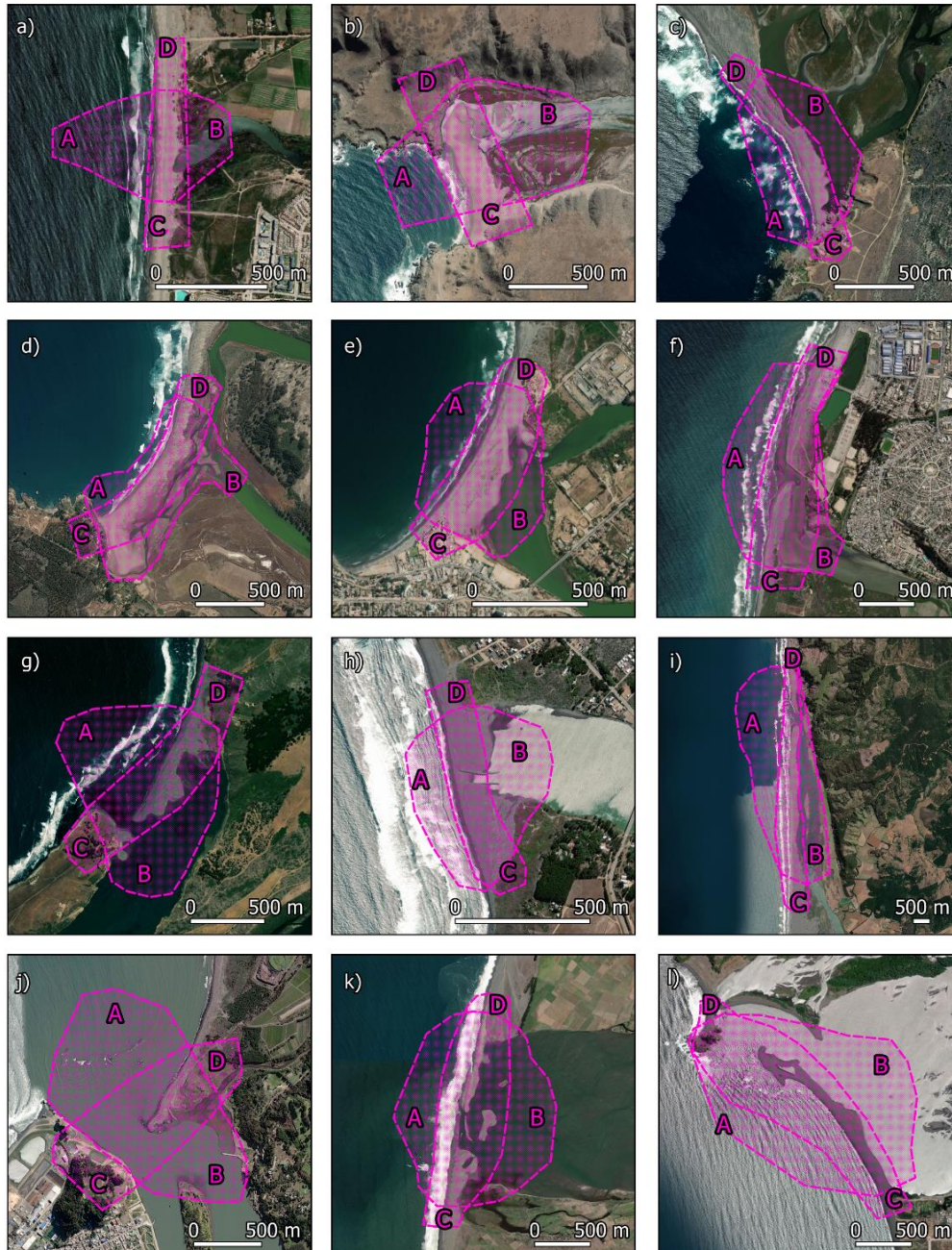
**Figura 6.20:** Ancho mensual promedio de desembocadura del estuario vs a) altura significativa mensual promedio, b) periodo de oleaje mensual promedio, c) expresión de transporte LST mensual promedio y d) expresión de transporte CST mensual promedio. Se indica ajuste lineal, coeficiente  $\rho$  de correlación de Spearman y valor  $p$  asociado.

En general, los resultados de relación entre el ancho de desembocadura y forzantes marítimas, tanto para marea (Figura 6.19a) como para variables de oleaje (Figura 6.20), indican una baja correlación, con coeficientes de Spearman inferiores a 0,2. Esta tendencia se repite en los demás estuarios analizados, lo que sugiere una baja capacidad predictiva de estas variables en escalas temporales mensuales.

Dado esto, se propone complementar el análisis con un enfoque de eventos extremos, centrado en evaluar condiciones específicas de oleaje durante periodos donde se hayan registrado cierres estuarinos. Este análisis cualitativo permite explorar si existe una recurrencia en los patrones de oleaje coincidentes con cierres, lo cual no se refleja en la correlación estadística mensual promedio.

### 6.3 Geometría Espacial de los Sitios de Análisis

Los polígonos definidos para la detección de transectos utilizado en el método de rutas de menor costo de InletTracker se presentan en la Figura 6.21.



**Figura 6.21:** Distribución espacial de los polígonos utilizados en el análisis de rutas de menor costo para los 12 sitios de estudio. Se muestran las máscaras A-B y C-D utilizadas como regiones de búsqueda para las rutas transversal y longitudinal a la barra de arena, respectivamente, además de los puntos semillas A y C y los puntos receptores B y D. Los sitios se presentan de norte a sur y se identifican como (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

## 6.4 Registros Satelitales

Los registros satelitales de acceso público obtenidos para cada sitio de estudio en el periodo entre 1985 y 2024 a través de Google Earth Engine se presentan en la Tabla 6.7. El número total de imágenes satelitales por año se presenta en la Figura 6.22.

**Tabla 6.7:** Registros satelitales disponibles para los diferentes sitios de estudio.

Sitio	Satélite	Periodo	Imágenes Totales	Imágenes Procesadas
Río Elqui	L5	1985 – 2011	384	151
	L7	1999 – 2021	446	160
	L8	2013 – 2021	191	76
	S2	2015 – 2024	1078	700
Río Limarí	L5	1985 – 2011	384	157
	L7	1999 – 2021	446	170
	L8	2013 – 2021	191	79
	S2	2015 – 2024	1062	744
Río Choapa	L5	1985 – 2011	353	155
	L7	1999 – 2021	441	37
	L8	2013 – 2021	185	83
	S2	2015 – 2024	559	379
Río Petorca - Ligua	L5	1985 – 2011	972	489
	L7	1999 – 2021	1339	95
	L8	2013 – 2021	531	240
	S2	2015 – 2024	525	388
Río Aconcagua	L5	1985 – 2011	589	351
	L7	1999 – 2021	788	109
	L8	2013 – 2021	345	195
	S2	2015 – 2024	516	376
Río Maipo	L5	1985 – 2011	589	377
	L7	1999 – 2021	788	74
	L8	2013 – 2021	520	288
	S2	2015 – 2024	496	363
Río Rapel	L5	1985 – 2011	688	365
	L7	1999 – 2021	1125	111
	L8	2013 – 2021	495	310
	S2	2015 – 2024	470	359
Estero Nilahue (Cáhuil)	L5	1985 – 2011	418	276
	L7	1999 – 2021	773	137
	L8	2013 – 2021	342	211
	S2	2015 – 2024	467	363
Río Mataquito	L5	1985 – 2011	418	265
	L7	1999 – 2021	773	71
	L8	2013 – 2021	342	195
	S2	2015 – 2024	465	358
Río Maule	L5	1985 – 2011	449	253
	L7	1999 – 2021	1067	87
	L8	2013 – 2021	337	224
	S2	2015 – 2024	472	374
Río Itata	L5	1985 – 2011	149	97
	L7	1999 – 2021	341	48
	L8	2013 – 2021	167	115
	S2	2015 – 2024	593	403
Río Biobío	L5	1985 – 2011	275	107
	L7	1999 – 2021	681	221
	L8	2013 – 2021	336	120
	S2	2015 – 2024	972	715

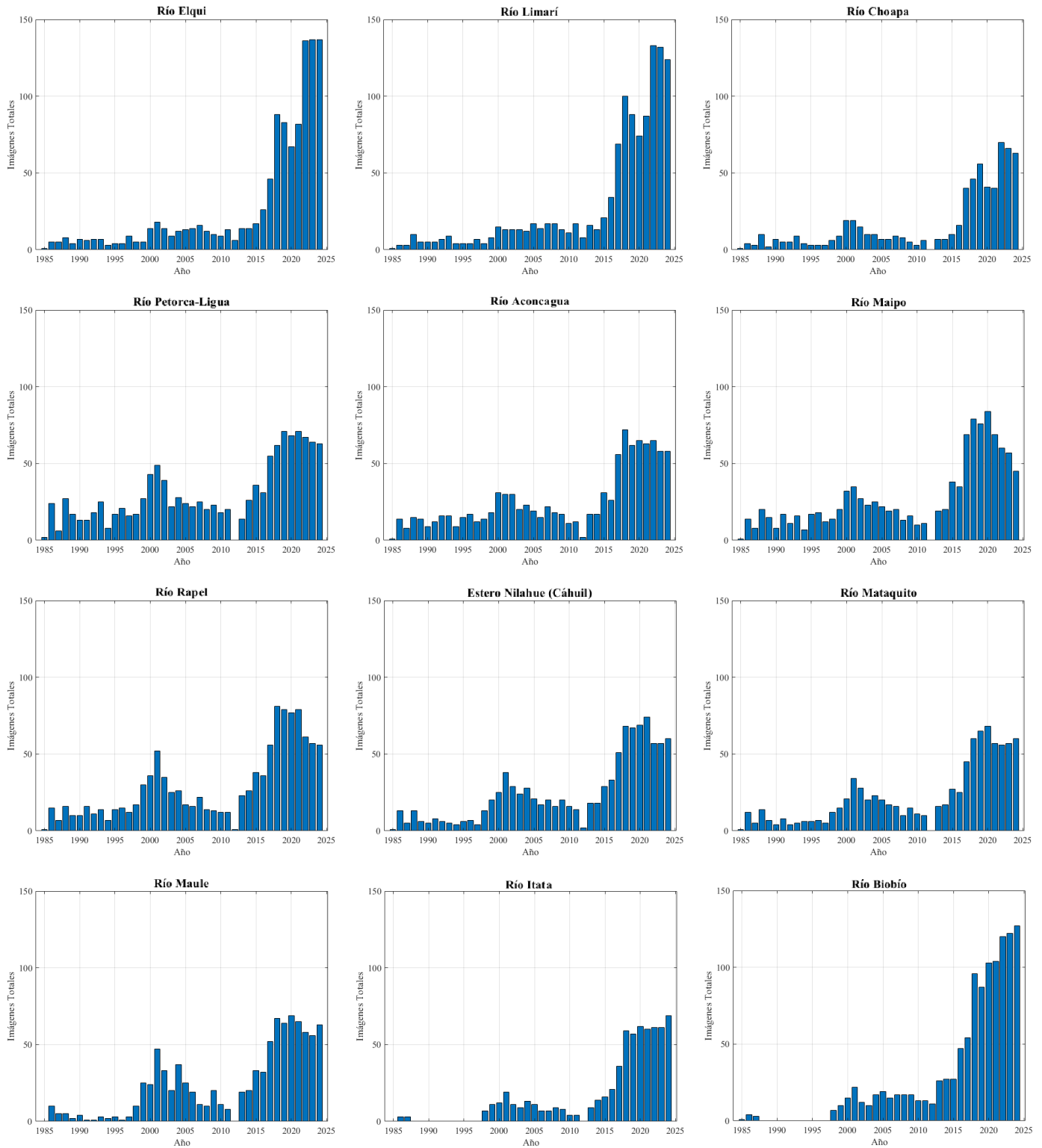
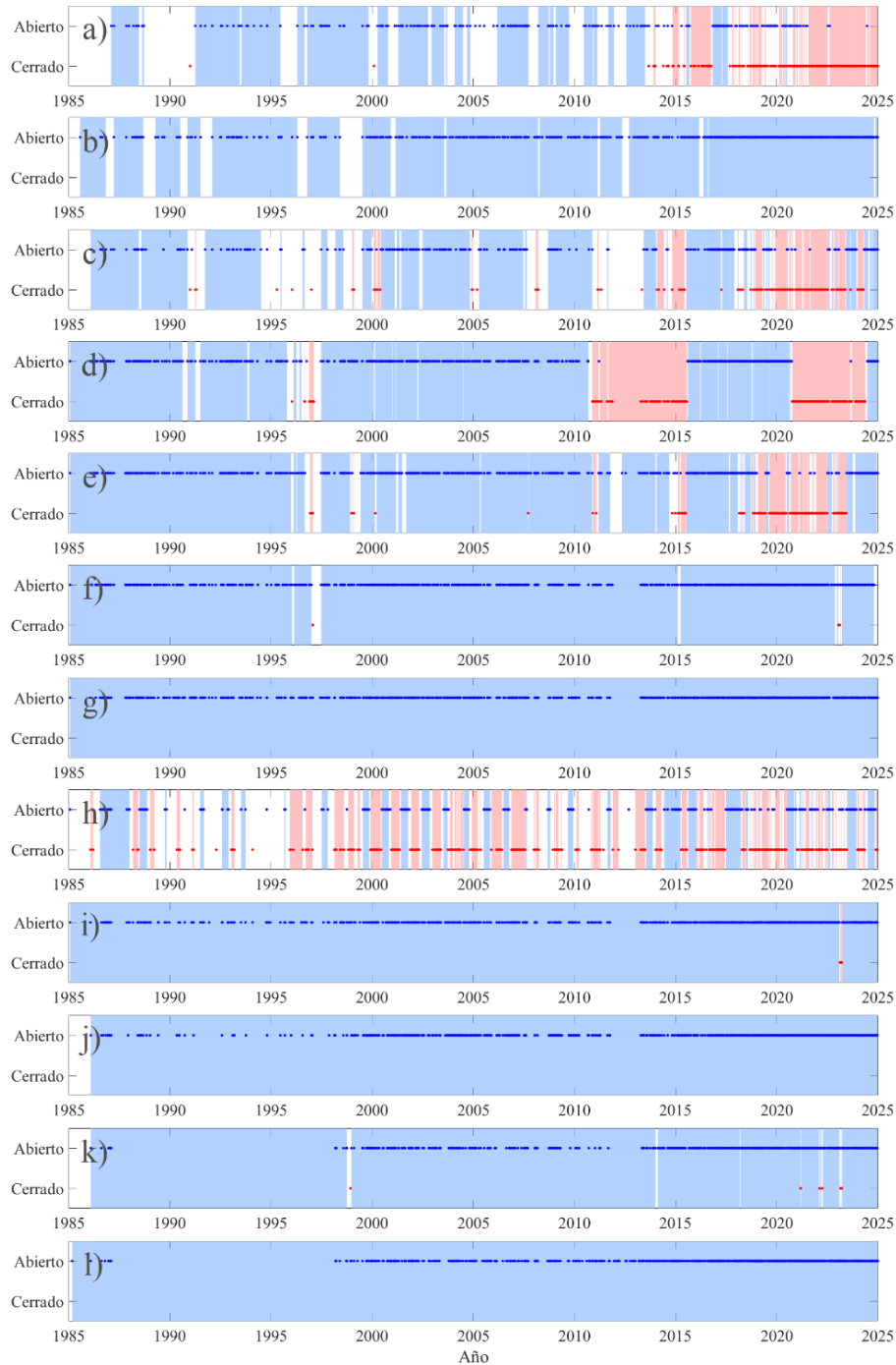


Figura 6.22: Número total de registros satelitales procesados por año natural para los sitios de estudio.

## 6.5 Estado de Conexión

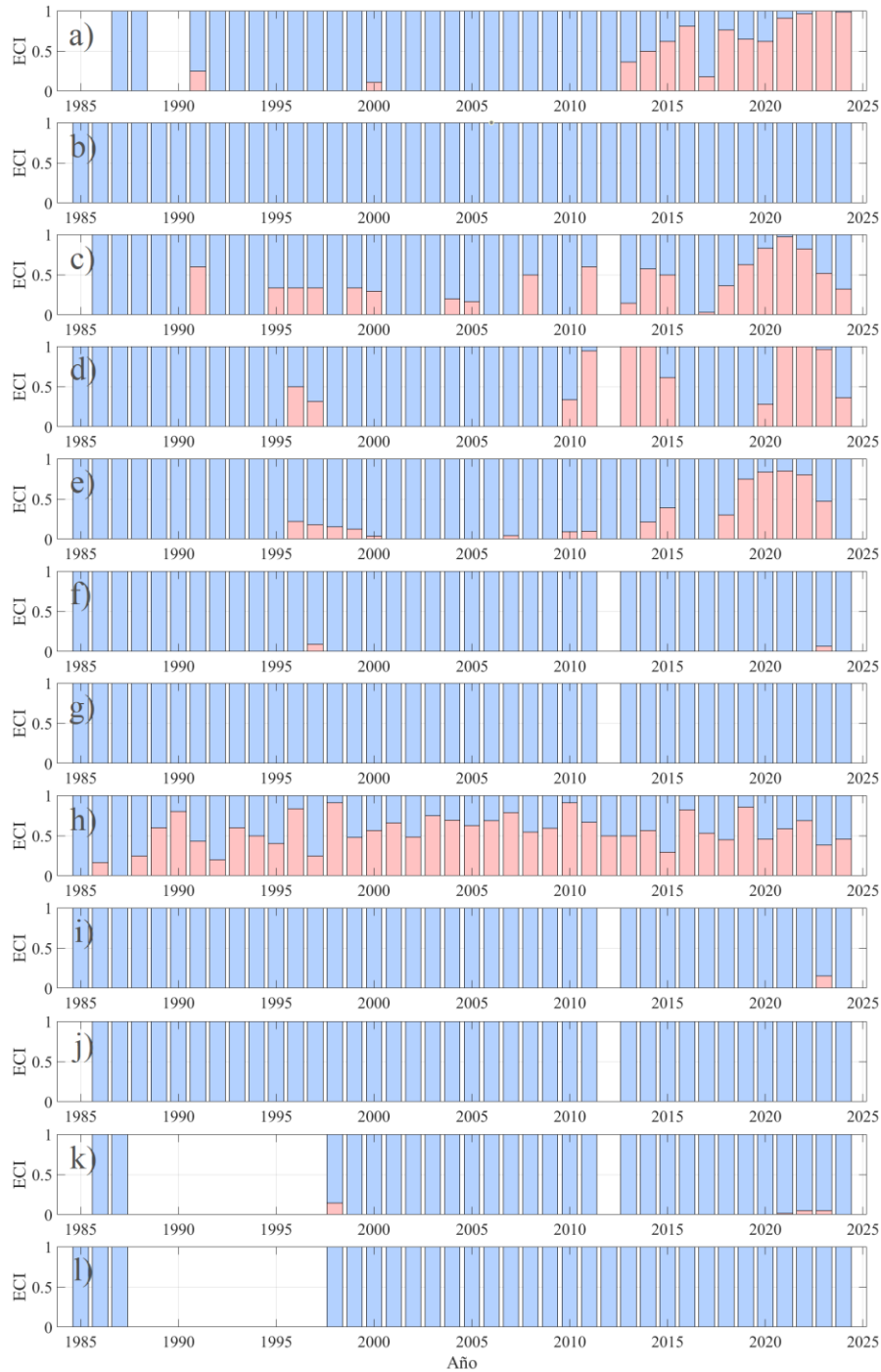
Los resultados para cada sitio de estudio se presentan en la Figura 6.23 en donde se indica el estado de conexión (abierto o cerrado) inferido visualmente a lo largo del registro satelital.



**Figura 6.23:** Estado de conexión inferido visualmente a lo largo del registro satelital para los doce sitios en estudio. Los sitios se presentan de norte a sur: (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

Los estados de conexión establecidos para cada estuario por año natural se presentan en detalle en el Anexo A.0.1. El comportamiento estacional e interanual se presenta en el Anexo A.0.2.

Los valores anuales del índice ECI para cada sitio se presentan en la Figura 6.24.



**Figura 6.24:** *Entrance Closure Index* (ECI) anual calculado para el registro satelital de los doce sitios en estudio. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

En la Tabla 6.8 se presentan los valores del índice ECI anual promedio para los diferentes periodos de análisis

**Tabla 6.8:** Índice ECI anual promedio para cada sitio de estudio dentro de los diferentes periodos de análisis.

Sitio	ECI [-]		
	1985-2024	1985-2009	2010-2024
Río Elqui	0,24	0,02	0,56
Río Limarí	0	0	0
Río Choapa	0,25	0,13	0,45
Río Petorca - La Ligua	0,21	0,03	0,54
Río Aconcagua	0,14	0,03	0,32
Río Maipo	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Río Rapel	0	0	0
Estero Nilahue	0,54	0,51	0,58
Río Mataquito	< 0,01	0	0,01
Río Maule	0	0	0
Río Itata	0,01	0,01	0,01
Río Biobío	0	0	0

Por otro lado, en la Figura 6.25 se muestra la estacionalidad del índice ECI mediante valores promedios mensuales.



**Figura 6.25:** Estacionalidad registrada del índice ECI para el registro satelital de los doce sitios en estudio. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cahuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

En la Tabla 6.9 se presentan duración media, mediana y máxima registrada de los periodos consecutivos de apertura y cierre para cada sitio de estudio, exceptuando aquellos casos en que no se observaron cambios de estado, y para los diferentes periodos temporales considerados.

**Tabla 6.9:** Resumen estadístico de la duración de los periodos consecutivos del estado de conexión.

Sitio	Periodo	Estado	Media (días)	Mediana (días)	Máximo (días)
Río Elqui	1985-2024	Abierto	160	1*	4.872
		Cerrado	40	5	650
	1985-2009	Abierto	2.392	3.128	3.456
		Cerrado		1*	
	2010-2024	Abierto	30	1*	1.144
		Cerrado	41	7	650
Río Choapa	1985-2024	Abierto	213	19	1.744
		Cerrado	51	16	320
	1985-2009	Abierto	576	384	1.744
		Cerrado	28	24	96
	2010-2024	Abierto	70	16	625
		Cerrado	59	15	320
Río Petorca-Ligua	1985-2024	Abierto	1.369	165	4.825
		Cerrado	438	112	1.568
	1985-2009	Abierto	2.154	2.032	4.553
		Cerrado	30	9	80
	2010-2024	Abierto	458	185	1.880
		Cerrado	745	650	1.568
Río Aconcagua	1985-2024	Abierto	432	19	4.240
		Cerrado	55	25	308
	1985-2009	Abierto	1.427	665	4.240
		Cerrado	13	7	48
	2010-2024	Abierto	153	11	1.273
		Cerrado	66	28	308
Río Maipo	1985-2024	Abierto	3.576	2.487	9.332
		Cerrado		1*	
	1985-2009	Abierto	4.456	4.456	4.553
		Cerrado		1*	
	2010-2024	Abierto	1.787	615	4.747
		Cerrado		1*	
Estero Nilahue (Cáhuil)	1985-2024	Abierto	64	13	528
		Cerrado	77	55	247
	1985-2009	Abierto	105	97	528
		Cerrado	125	151	247
	2010-2024	Abierto	40	2	297
		Cerrado	51	20	233
Río Mataquito	1985-2024	Abierto	7.263	7.263	13.892
		Cerrado	35	35	35
	1985-2009	Abierto	9.088	9.088	9.088
		Cerrado	-	-	-
	2010-2024	Abierto	2.704	2.704	4.772
		Cerrado	35	35	35
Río Itata	1985-2024	Abierto	2.006	320	8.112
		Cerrado		1*	
	1985-2009	Abierto	4.288	4.288	4.624
		Cerrado		1*	
	2010-2024	Abierto	894	310	4.064
		Cerrado		1*	

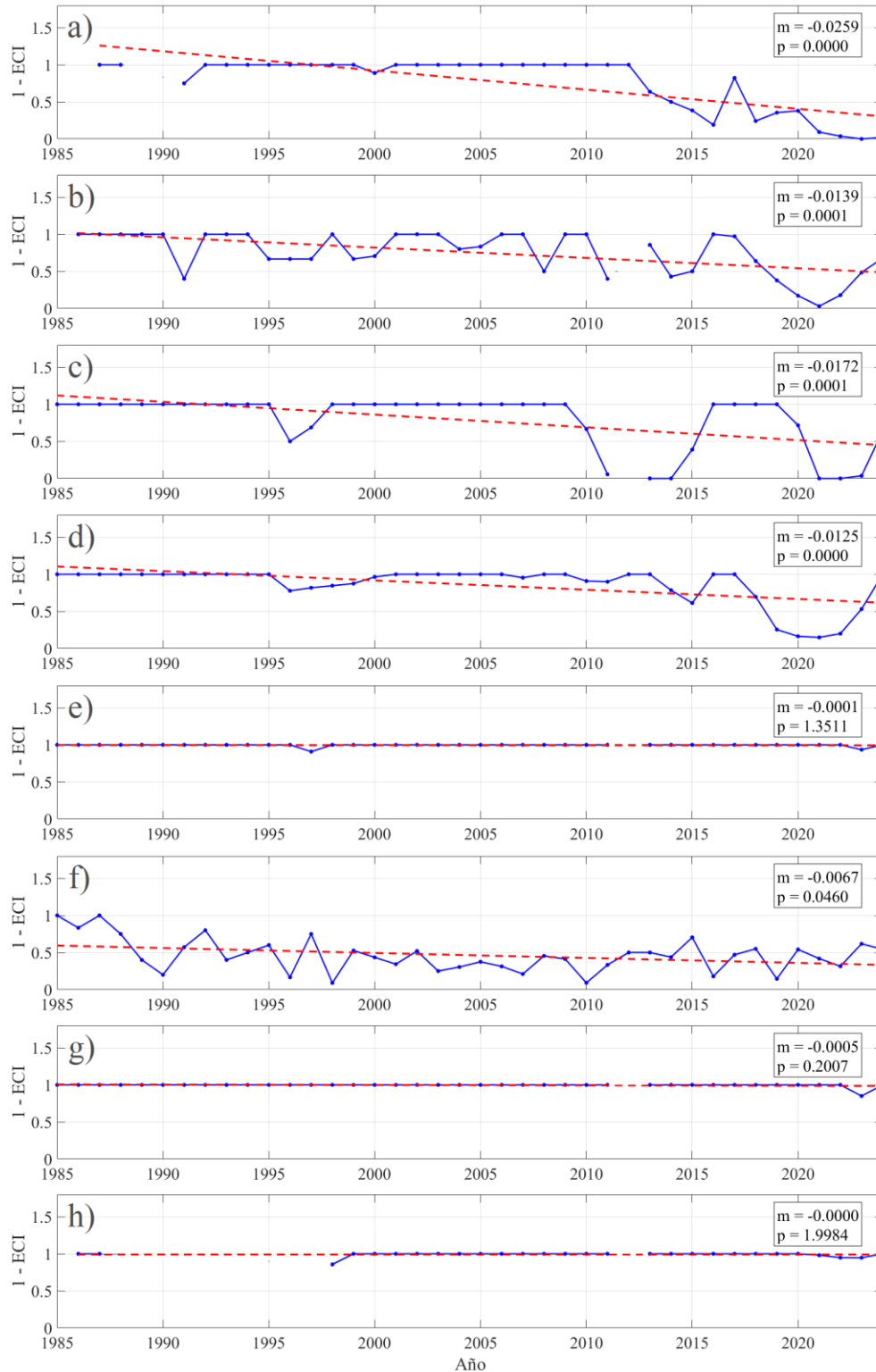
\*: Episodio puntual del estado a lo largo del periodo. No se registran episodios consecutivos del estado de conexión.

En la Tabla 6.10 se presenta la matriz de transición de primer orden para cada sitio de estudio, donde se muestran las probabilidades condicionales de pasar de un estado a otro en la siguiente observación.

**Tabla 6.10:** Matrices de transición de estados de conexión para los distintos sitios.

Sitio	Estado	Abierto	Cerrado
Río Elqui	Abierto	0,790	0,210
	Cerrado	0,148	0,852
Río Limarí	Abierto	1	0
	Cerrado	-	-
Río Choapa	Abierto	0,869	0,131
	Cerrado	0,210	0,790
Río Petorca - La Ligua	Abierto	0,991	0,009
	Cerrado	0,028	0,972
Río Aconcagua	Abierto	0,958	0,042
	Cerrado	0,126	0,874
Río Maipo	Abierto	0,996	0,004
	Cerrado	1	0
Río Rapel	Abierto	1	0
	Cerrado	-	-
Estero Nilahue (Cáhuil)	Abierto	0,810	0,190
	Cerrado	0,142	0,858
Río Mataquito	Abierto	0,999	0,001
	Cerrado	0,833	0,167
Río Maule	Abierto	1	0
	Cerrado	-	-
Río Itata	Abierto	0,989	0,011
	Cerrado	1	0
Río Biobío	Abierto	1	0
	Cerrado	-	-

Finalmente, en la Figura 6.26 se presentan los resultados de regresión lineal simple aplicada sobre la proporción anual de estados abiertos para los sitios que presentaron episodios de cierre.



**Figura 6.26:** Regresión lineal simple sobre las proporciones anuales de estados abiertos ( $1 - ECI$ ). Se presenta recta de tendencia junto a su pendiente  $m$  y valor  $p$ . Se muestran solamente aquellos sitios que presentan al menos un cambio en su estado de conexión durante el registro estudiado. (a) Elqui, (b) Choapa, (c) Petorca-La Ligua, (d) Aconcagua, (e) Maipo, (f) Cáhuil, (g) Mataquito y (h) Itata.

## 6.6 Ancho de Desembocadura

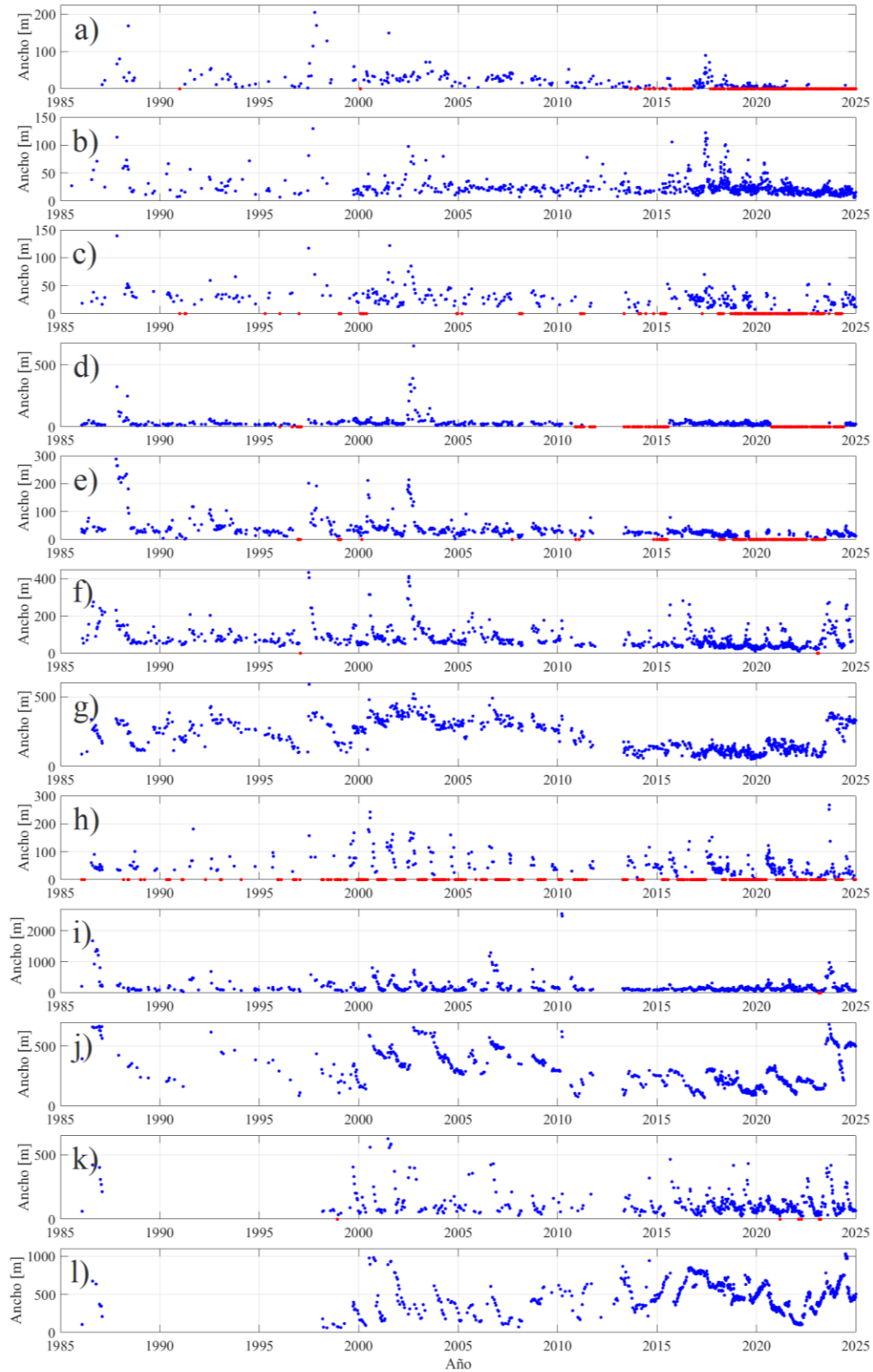
Previo a los resultados de ancho de desembocadura, en la Tabla 6.11 se presentan los valores óptimos para los coeficiente utilizados ( $P, A, B, C, D$ ) en el proceso de calibración descrito en la Sección 5.6.2, y el valor del error absoluto medio (MAE) determinado para la validación de los resultados para cada sitio de estudio.

**Tabla 6.11:** Parámetros de calibración utilizados para el método de cálculo de ancho de desembocaduras y el error absoluto medio determinado para los sitios de estudio.

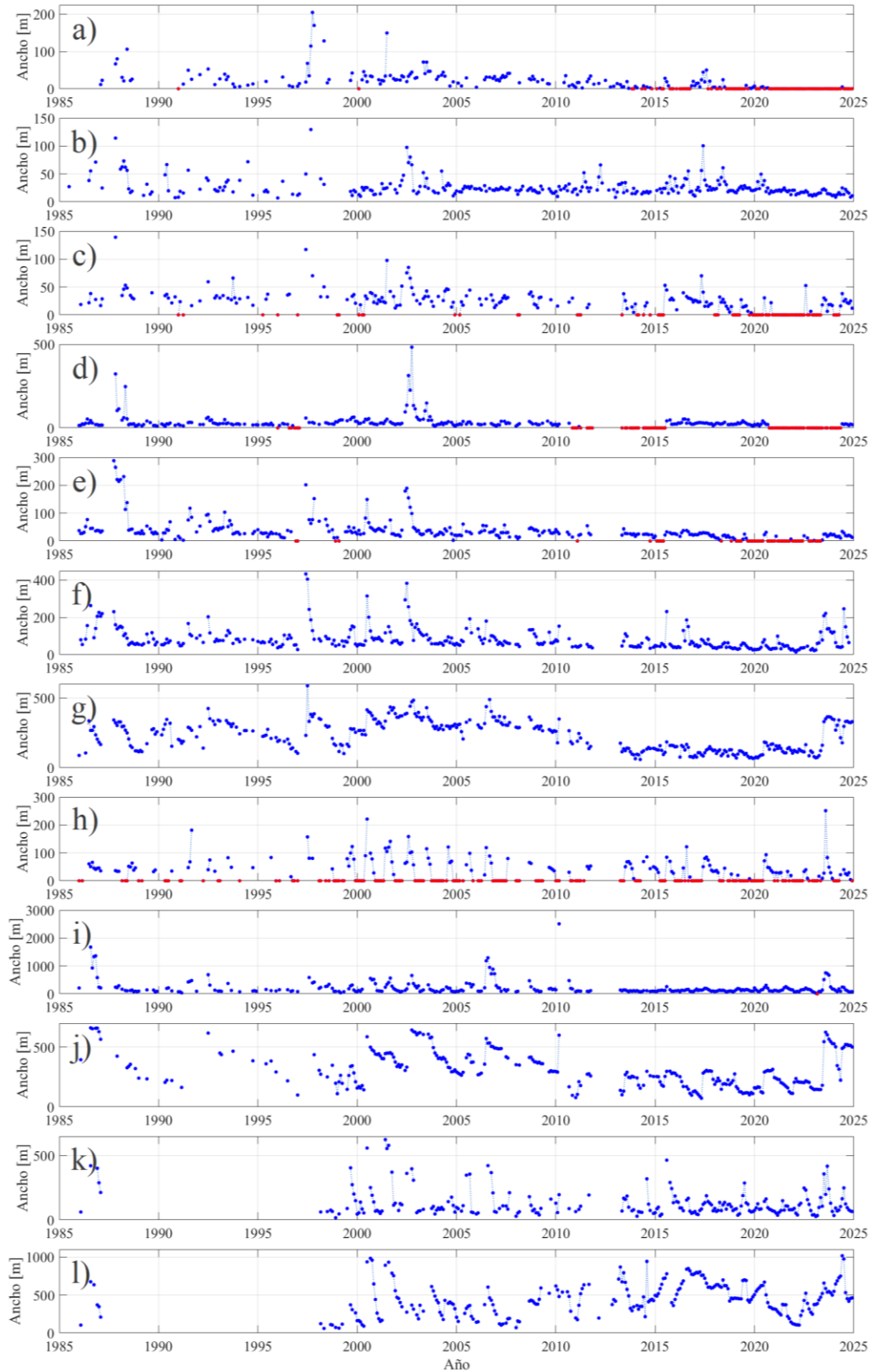
Sitio	P	A	B	C	D	MAE [m]
Elqui	63	0,7	0,5	3,0	-0,7	4,6
Limarí	81	0,9	1,6	5,7	-14,3	3,4
Choapa	71	0,8	0,6	-3,1	1,9	7,4
Petorca	44	0,7	0,4	10,3	-7,2	4,7
Aconcagua	72	0,9	0,5	9,0	-9,0	4,0
Maipo	60	0,9	0,1	0,0	0,0	8,2
Rapel	67	1,1	-0,1	0,6	-0,2	10,5
Cáhuil	60	0,5	1,0	-3,2	0,9	7,7
Mataquito	36	0,9	0,0	-1,6	-1,7	11,7
Maule	44	1,0	-0,1	0,3	0,0	11,0
Itata	55	1,1	-0,1	1,0	-0,5	9,7
Biobío	48	1,0	0,0	-0,1	-0,3	18,6

Como es posible observar, todos los sitios de estudio salvo Biobío cumplen con el criterio de validación de resultados de  $MAE \leq 15$  [m], sin embargo, considerando el orden de magnitud de la desembocadura de este estuario ( $\sim 450$  [m]), se considera a este error como aceptable.

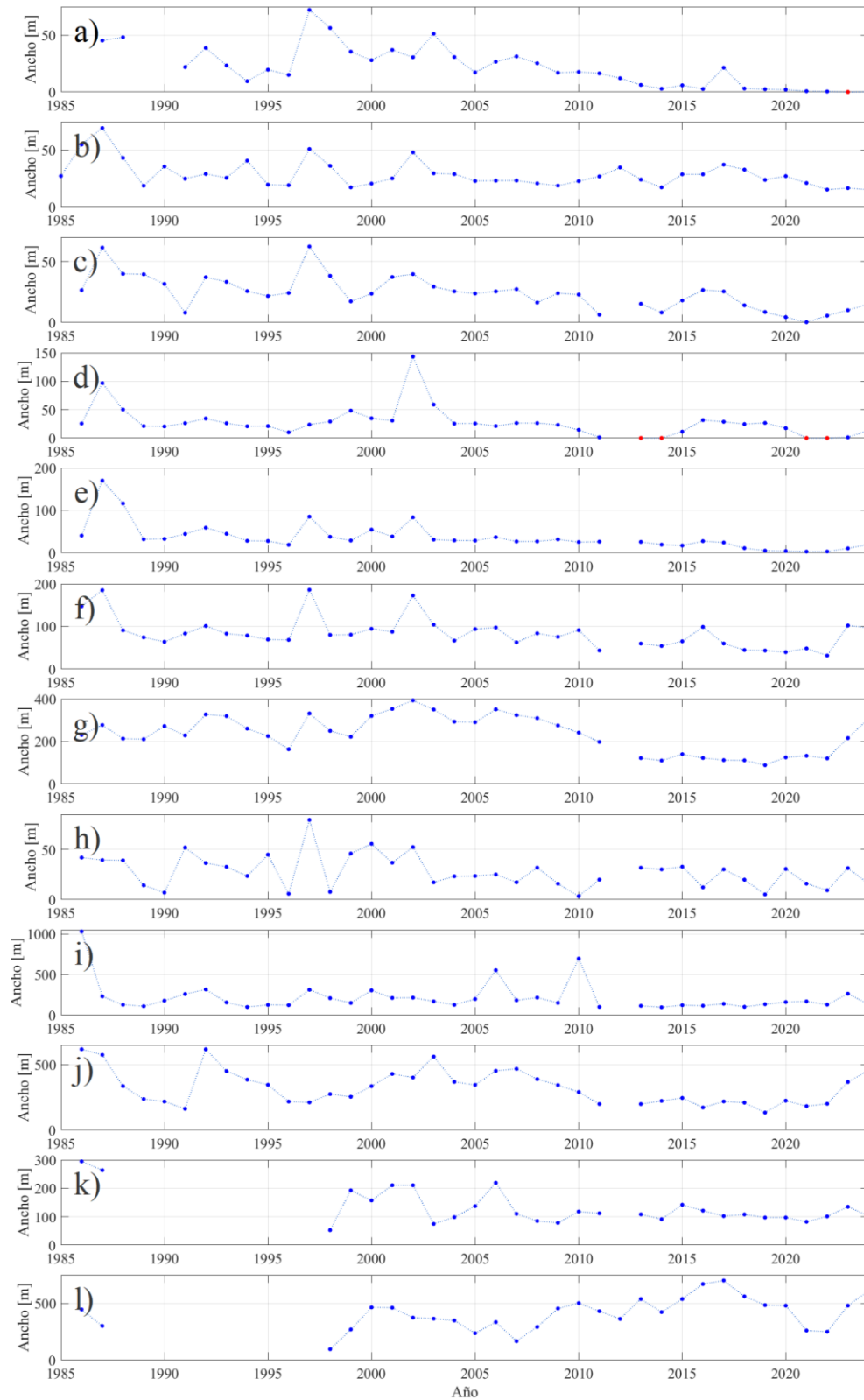
Los resultados de ancho de desembocadura para cada registro satelital de los doce sitios de estudio se presentan en la Figura 6.27, mientras que en la Figura 6.28 se presenta la mediana mensual de los resultados. Por otro lado, en la Figura 6.29 y Figura 6.30 se presentan la media y mediana anual de ancho de desembocadura respectivamente. Adicionalmente, en la Figura 6.31 se presenta la mediana semestral.



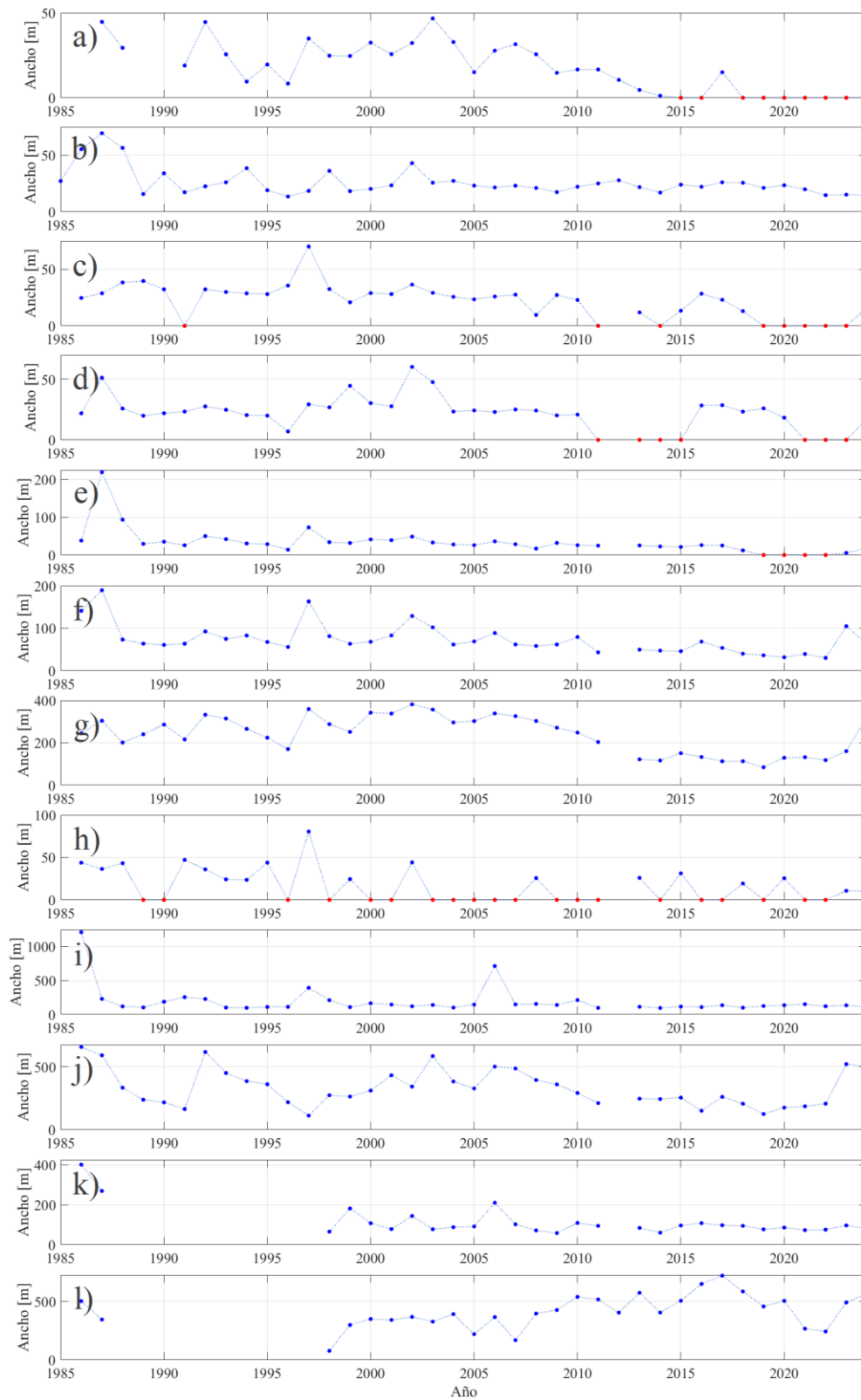
**Figura 6.27:** Ancho del canal de las desembocaduras para cada registro satelital procesado. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhul, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío



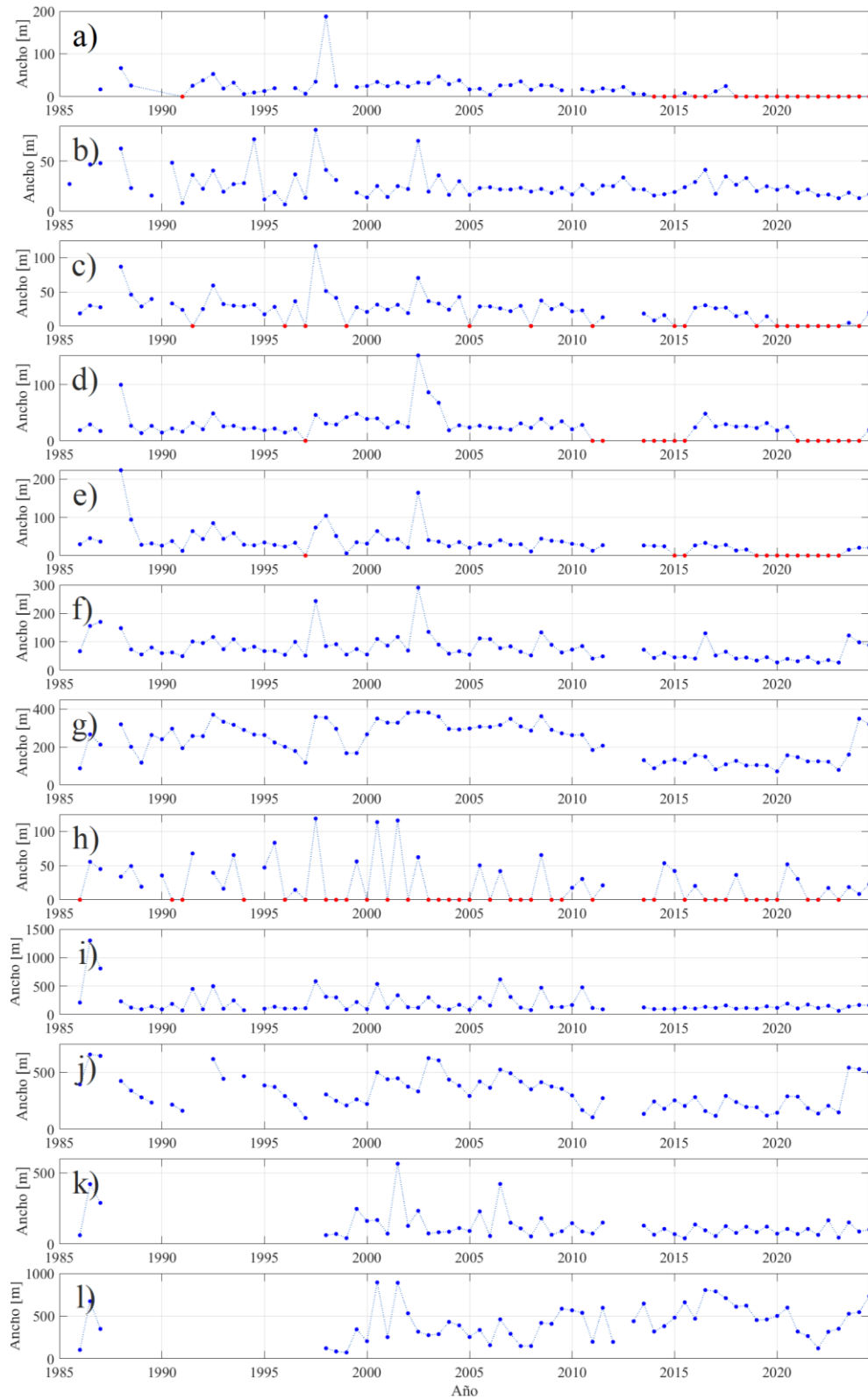
**Figura 6.28:** Ancho mensual mediano del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.



**Figura 6.29:** Ancho promedio anual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.



**Figura 6.30:** Ancho mediano anual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.



**Figura 6.31:** Ancho mensual semestral del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

En la Tabla 6.12 se presentan los valores del ancho de desembocadura promedio y mediano calculados a partir de las medianas mensuales del registro.

**Tabla 6.12:** Ancho de desembocadura promedio y mediano para cada sitio de estudio dentro de los diferentes periodos de análisis.

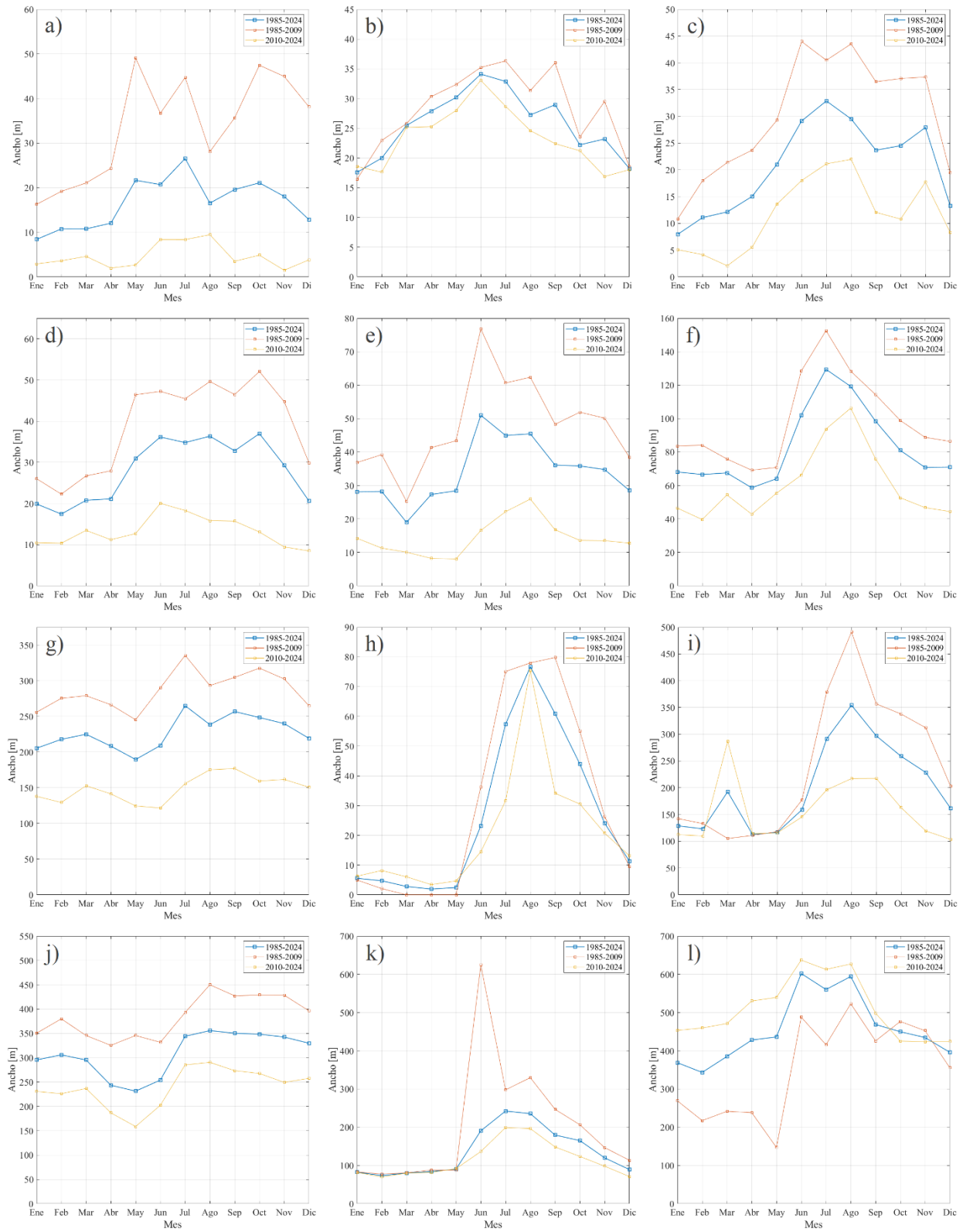
Sitio	Medida	Ancho [m]		
		1985-2024	1985-2009	2010-2024
Río Elqui	Promedio	17,19	34,71	4,72
	Mediana	7,75	27,00	0,00
Río Limarí	Promedio	26,02	28,90	23,39
	Mediana	21,30	23,05	20,61
Río Choapa	Promedio	21,17	30,49	12,06
	Mediana	21,76	29,34	5,67
Río Petorca - La Ligua	Promedio	27,84	38,40	13,07
	Mediana	22,47	25,05	0,00
Río Aconcagua	Promedio	33,84	47,37	14,52
	Mediana	26,48	34,42	16,67
Río Maipo	Promedio	82,57	97,87	60,05
	Mediana	64,15	77,10	45,26
Río Rapel	Promedio	227,69	286,73	149,11
	Mediana	231,43	294,11	127,23
Estero Nilahue (Cáhuil)	Promedio	26,78	32,36	20,49
	Mediana	0,00	0,00	0,00
Río Mataquito	Promedio	205,78	249,71	158,62
	Mediana	125,72	147,70	118,48
Río Maule	Promedio	310,79	386,30	238,95
	Mediana	290,50	375,60	211,00
Río Itata	Promedio	129,30	154,69	112,61
	Mediana	89,65	89,48	90,06
Río Biobío	Promedio	446,18	345,34	507,60
	Mediana	432,69	323,70	500,38

Por otro lado, en la Tabla 6.13 se presentan los resultados de la prueba estadística de Mann-Kendall, donde se indican los estadísticos  $S$  y  $Z$ , además del valor  $p$  de la prueba de tendencia.

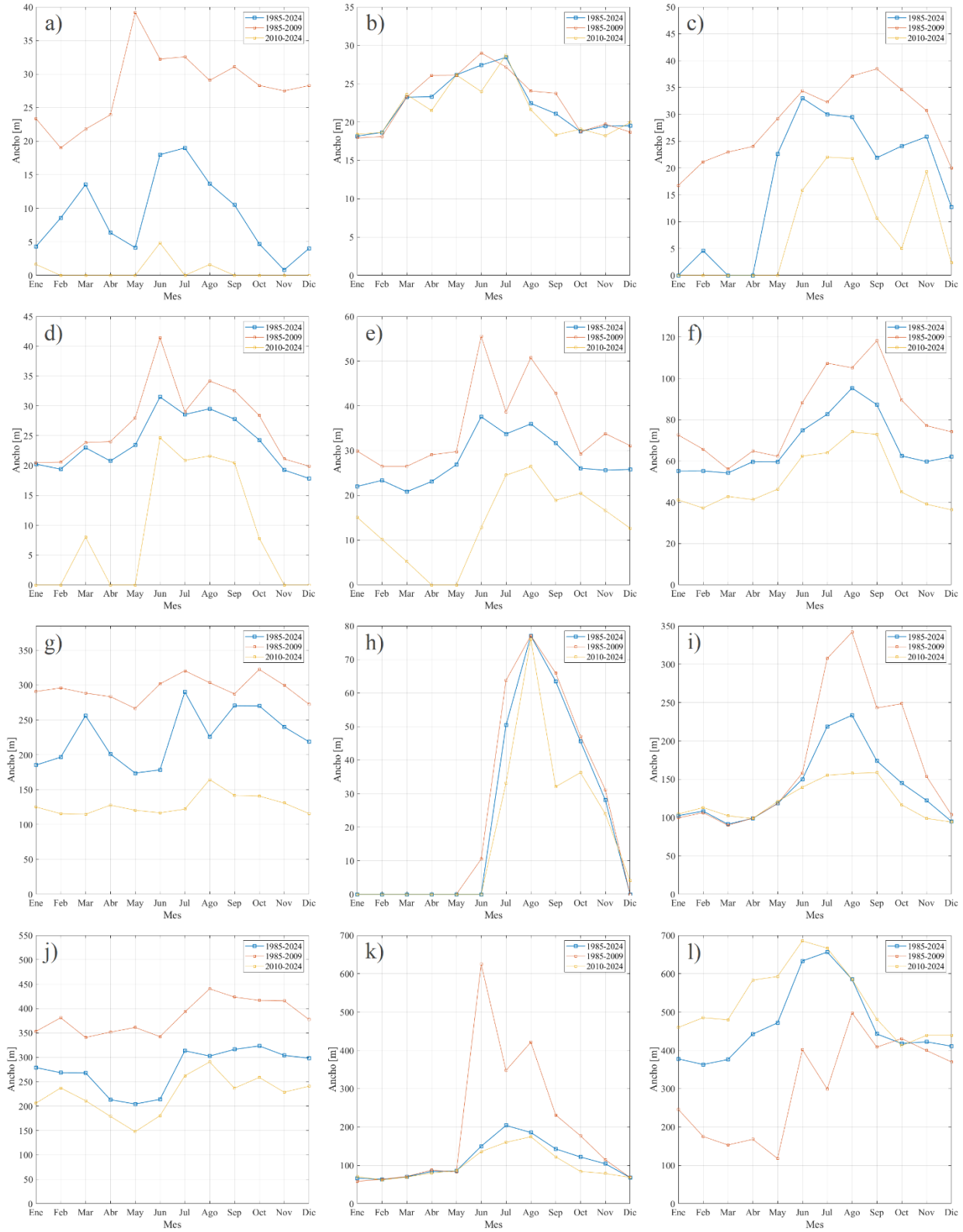
**Tabla 6.13:** Resultados Prueba de Mann - Kendall para los anchos mensuales medianos registrados en los doce sitios de estudio.

Sitio	S	Z	p	Tendencia
Elqui	-17.504,00	-12,78	0,000	Decreciente significativa
Limarí	-8.559,00	-4,78	0,000	Decreciente significativa
Choapa	-11.912,00	-8,45	0,000	Decreciente significativa
Petorca	-14.860,00	-6,85	0,000	Decreciente significativa
Aconcagua	-27.915,00	-12,65	0,000	Decreciente significativa
Maipo	-20.223,00	-9,21	0,000	Decreciente significativa
Rapel	-16.664,00	-7,78	0,000	Decreciente significativa
Cáhuil	-3.877,00	-2,09	0,036	Decreciente significativa
Mataquito	-4.549,00	-2,48	0,013	Decreciente significativa
Maule	-10.976,00	-6,97	0,000	Decreciente significativa
Itata	-1.267,00	-1,11	0,268	No significativa
Biobío	6.101,00	4,59	0,000	Creciente significativa

El comportamiento estacional del ancho de la desembocadura se muestra en las Figura 6.32 y Figura 6.33 a través de su promedio y mediana mensual. En estas figuras se presenta una desagregación de los resultados en donde se pueden observar los valores para los periodos de 1985 a 2024, 1985 a 2009 y 2010 a 2024.

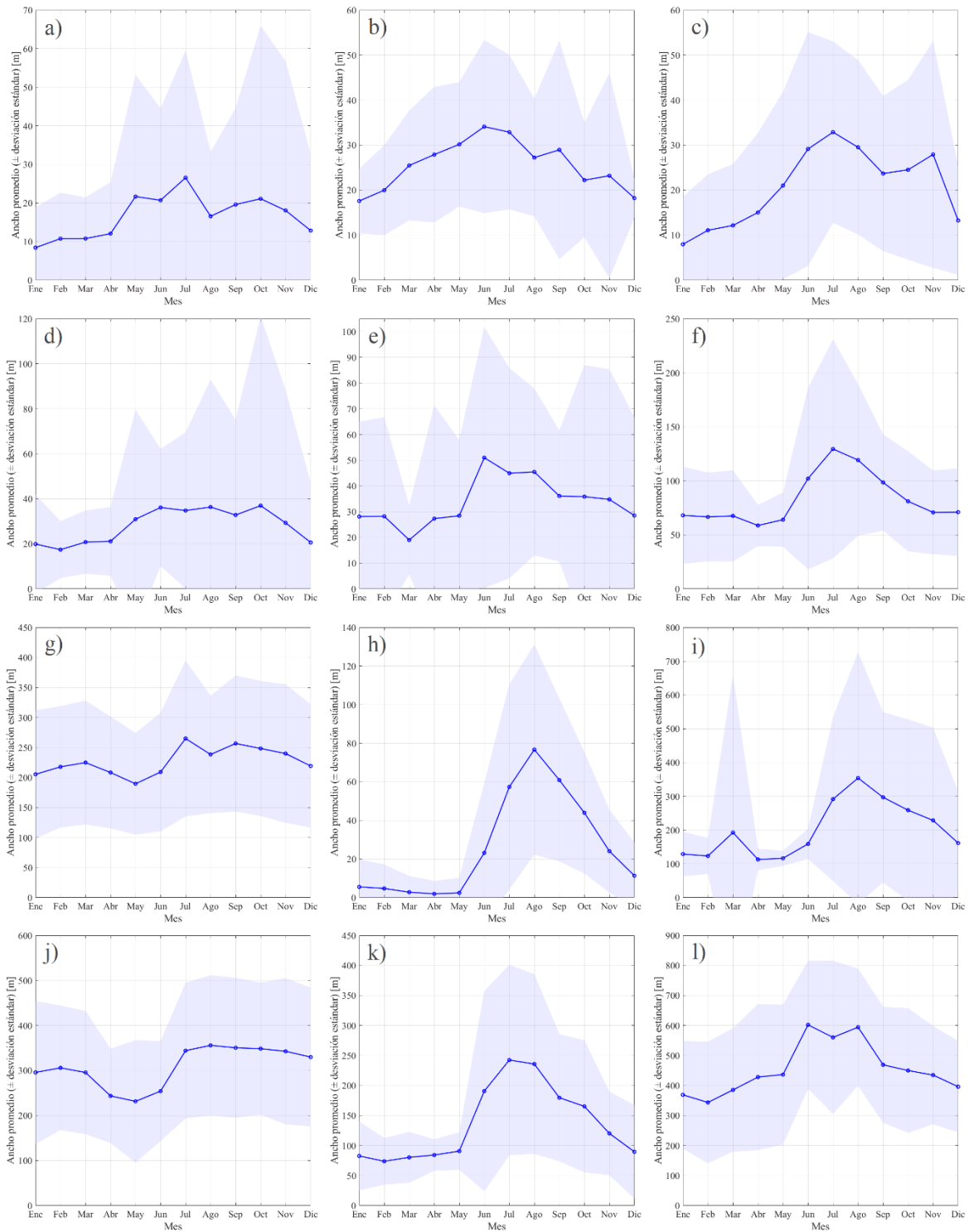


**Figura 6.32:** Ancho promedio mensual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío



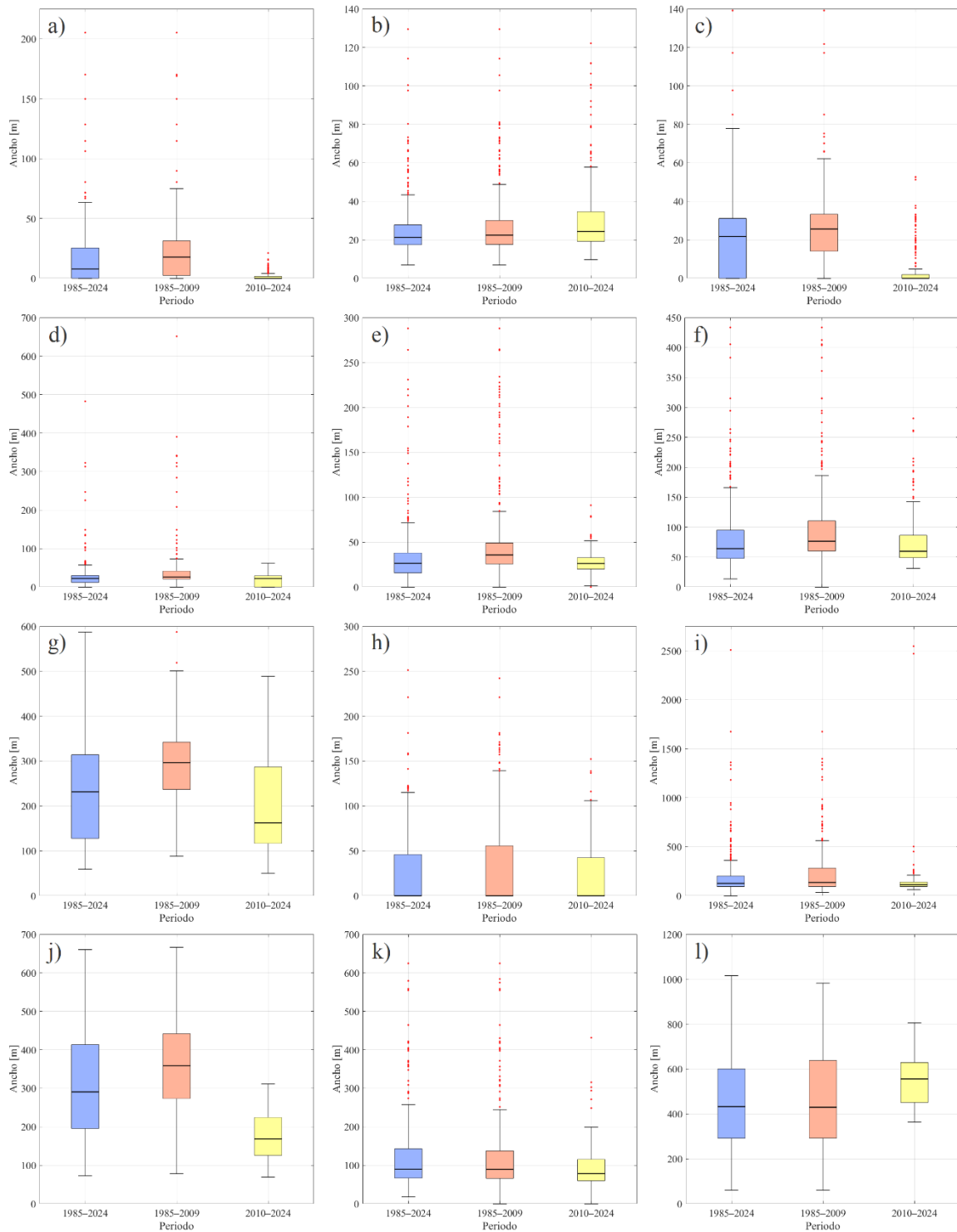
**Figura 6.33:** Ancho mediano mensual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhul, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío

En la Figura 6.34 se presenta la desviación estándar de los resultados estacionales para cada sistema en estudio.



**Figura 6.34:** Ancho promedio y desviación estándar mensual del canal de las desembocaduras. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

En la Figura 6.35 se presenta el rango intercuartílico calculado para para los periodos interanuales de interés.



**Figura 6.35:** Rango intercuartílico de ancho de desembocadura para los diferentes periodos de interés. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Rapel, (h) Cáhuil, (i) Mataquito, (j) Maule, (k) Itata y (l) Biobío.

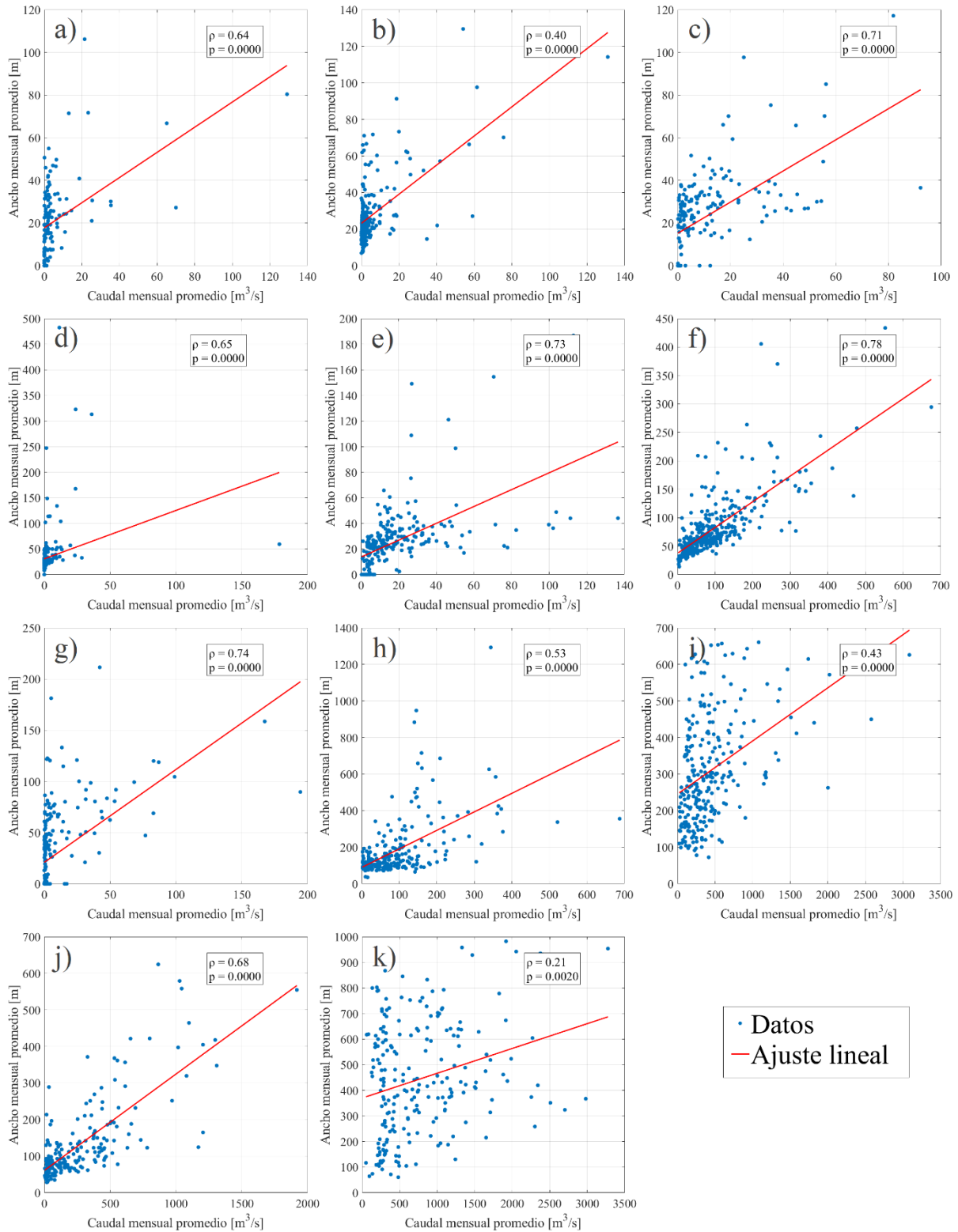
## 6.7 Correlación con Caudal de Río Aportante

Tal como se hizo en la Sección 6.2.5, para llevar a cabo la correlación entre caudales y anchos de desembocadura se recopilieron datos de estaciones fluviométricas cercanas a los sitios de estudio. En la Tabla 6.14 se resumen las estaciones consultadas y el rango temporal de datos disponibles.

**Tabla 6.14:** Estaciones fluviométricas del Sistema Nacional de Información de Agua de la DGA consultadas para cada sitio de estudio.

Sitio	Estación Fluviométrica		Rango Datos
	Nombre	Código BNA	
Río Elqui	Río Elqui en La Serena	04335001-3	1985-2017
Río Limarí	Río Limarí en Panamericana	04558001-6	1985-2022
Río Choapa	Río Choapa aguas arriba Estero La Canela	04730001-0	1985-2024
Río Petorca - La Ligua	Río Petorca en Longotoma o puente FF	05120001-2	1985-2019
Río Aconcagua	Río Aconcagua en Romeral	05423003-6	1994-2024
Río Maipo	Río Maipo en Cabimbao	05748001-7	1985-2024
Río Rapel	No se encontraron datos		
Estero Nilahue	Estero Nilahue en Santa Terea	06132001-6	1985-2024
Río Mataquito	Río Mataquito en Licantén	07123001-5	1987-2019
Río Maule	Río Maule en Forel	07383001-K	1985-2024
Río Itata	Río Itata en Coelemu	08141001-1	1985-2024
Río Biobío	Río Biobío en desembocadura	08394001-8	1985-2024

Una vez recopilados los datos de caudales medios mensuales para cada sitio de estudio se procede a evaluar la correlación con los anchos mensuales promedios. Los resultados se presentan en la Figura 6.36, en donde se incluyen el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) y su respectivo valor  $p$ , junto con un ajuste lineal referencial que permite visualizar la tendencia general de los datos.



**Figura 6.36:** Ancho mensual promedio de desembocadura vs caudal fluvial mensual promedio. (a) Elqui, (b) Limarí, (c) Choapa, (d) Petorca-La Ligua, (e) Aconcagua, (f) Maipo, (g) Cáhuil, (h) Mataquito, (i) Maule, (j) Itata y (k) Biobío.

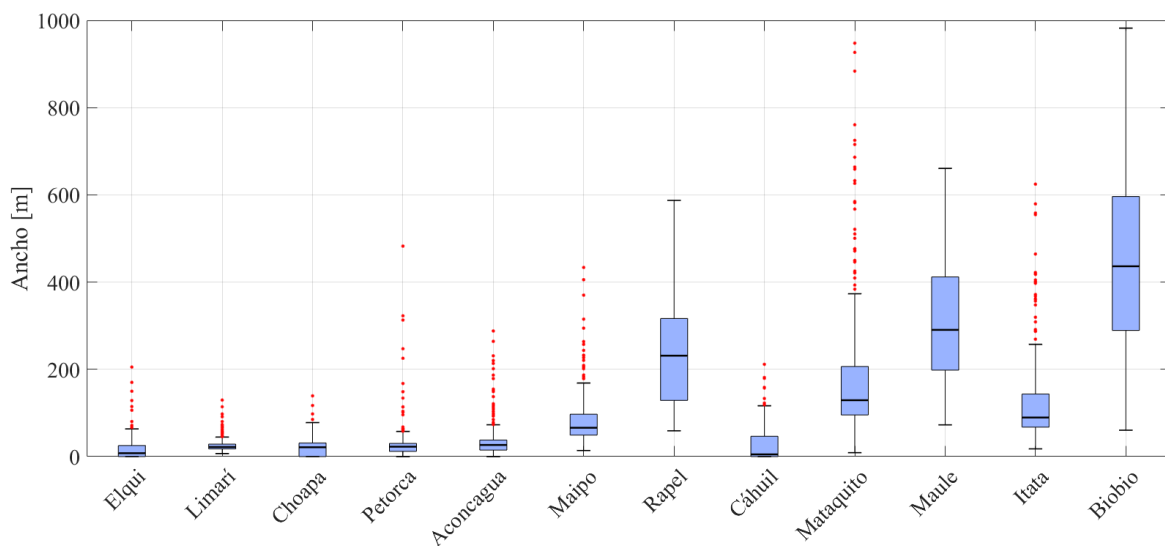
## 6.8 Resumen

Con el fin de poder hacer un análisis comparativo de los datos, en la Tabla 6.15 se presenta un resumen de los resultados más importantes

**Tabla 6.15:** Resumen resultados para los 12 sitios en estudio. Se indican valor del índice ECI y de ancho de desembocadura promedio para los distintos periodos indicados, estadístico Z de la prueba de Mann-Kendall, y coeficiente de correlación de Spearman  $\rho$  entre caudal fluvial y ancho de desembocadura.

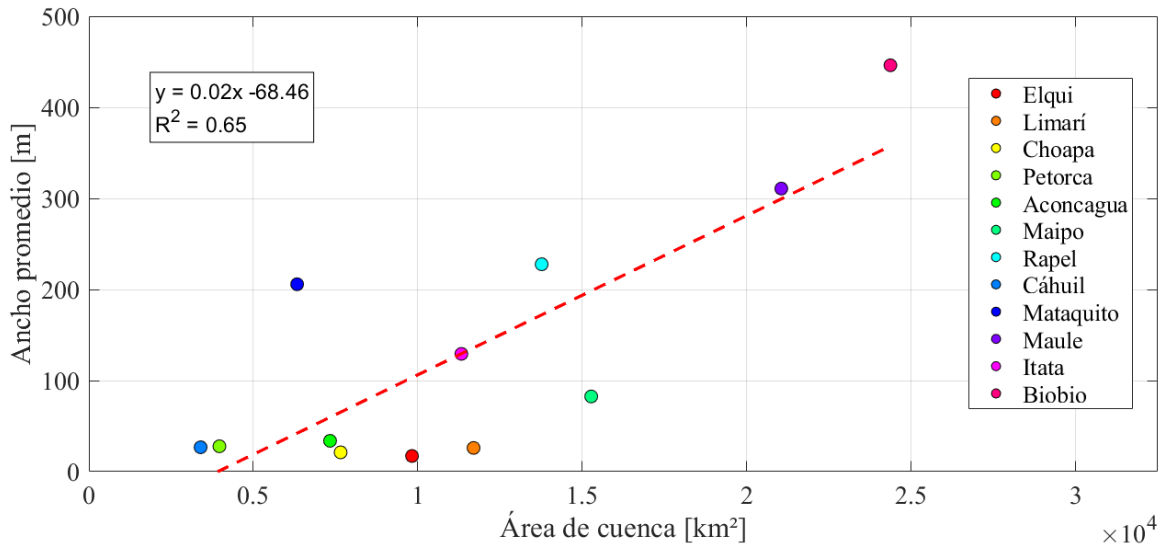
Sitio	ECI [-]			Ancho [m]			Z	$\rho$
	1985-2024	1985-2009	2010-2024	1985-2024	1985-2009	2010-2024		
Río Elqui	0,24	0,01	0,56	17,19	34,71	4,72	-12,78	0,64
Río Limarí	0	0	0	26,02	28,90	23,39	-4,78	0,40
Río Choapa	0,25	0,13	0,45	21,17	30,49	12,06	-8,45	0,71
Río Petorca	0,21	0,03	0,54	27,84	38,40	13,07	-6,85	0,65
Río Aconcagua	0,14	0,03	0,32	33,84	47,37	14,52	-12,65	0,73
Río Maipo	4,0E-3	3,6E-3	4,6E-3	82,57	97,87	60,05	-9,21	0,78
Río Rapel	0	0	0	227,69	286,73	149,11	-7,78	-
Estero Nilahue	0,54	0,51	0,58	26,78	32,36	20,49	-2,09	0,74
Río Mataquito	3,8E-3	0,00	0,01	205,78	249,71	158,62	-2,48	0,53
Río Maule	0	0	0	310,79	386,30	238,95	-6,97	0,43
Río Itata	0,01	0,01	0,01	129,30	154,69	112,61	-1,11	0,68
Río Biobío	0	0	0	446,18	345,34	507,60	4,59	0,21

De manera complementaria, en la Figura 6.37 se presenta en un mismo gráfico el rango intercuartílico de los 12 sitios en estudio para el periodo de 1985 a 2024.

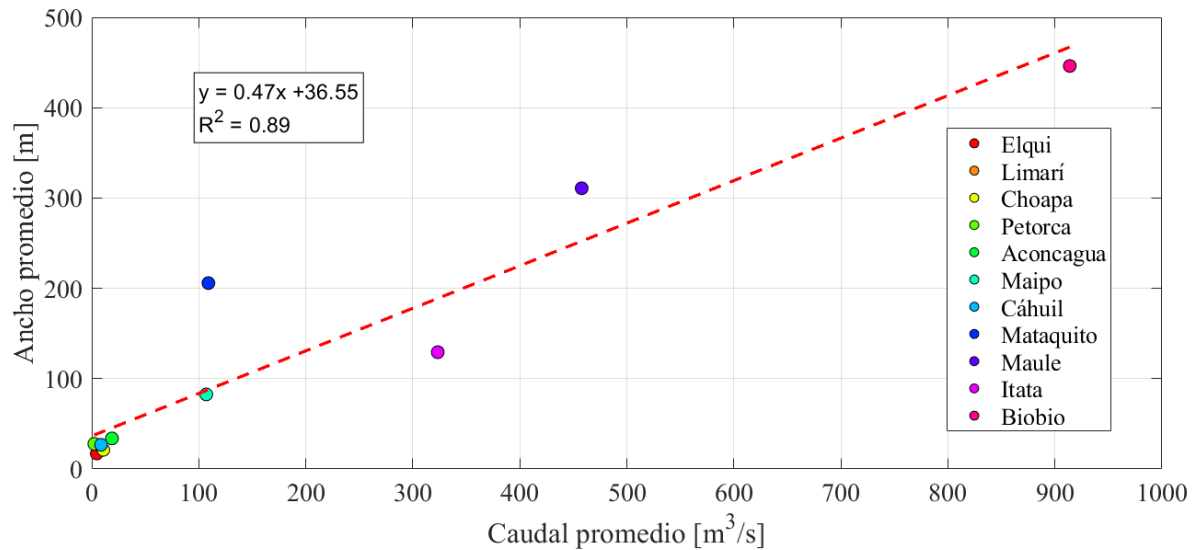


**Figura 6.37:** Rango intercuartílico del ancho de desembocadura para los 12 sitios de estudio dentro del periodo de 1985 a 2024.

Por otro lado, para evaluar la relación entre el tamaño de las cuencas de los sitios de estudio y el ancho de sus desembocaduras, en la Figura 6.38 se presenta una regresión lineal entre el área de las cuencas y el ancho promedio registrado para cada desembocadura. De manera análoga, en la Figura 6.39 se evalúa la relación entre el caudal medio registrado en las estaciones fluviométricas y el ancho promedio de desembocadura asociado.



**Figura 6.38:** Área de la cuenca vs ancho de desembocadura promedio para cada sitio de estudio.



**Figura 6.39:** Caudal medio vs ancho de desembocadura promedio para los sitios de estudio indicados.

# 7. Discusión

## 7.1 Introducción

En este capítulo se analizan y discuten en detalle los resultados obtenidos en el capítulo anterior. En la Sección 7.2 se abordan los resultados de estado de conexión, revisando los valores del índice ECI calculados, estacionalidad, tendencias y matrices de transición. En la Sección 7.3 se analizan los resultados de ancho de desembocadura y finalmente en la Sección 7.4 se analizan las correlaciones con forzantes hidrodinámicas.

## 7.2 Estado de Conexión

### 7.2.1 Naturaleza dinámica de los sistemas estuarinos

Uno de los parámetros fundamentales para la caracterización de la evolución morfológica de un estuario es su estado de conexión con el océano. Cambios en este estado, tanto en su frecuencia como en su duración, pueden tener implicancias significativas para la biodiversidad, el intercambio de agua y nutrientes, y la estabilidad geomorfológica del sistema.

El análisis de la evolución temporal del estado de conexión permite en primer lugar identificar la naturaleza del comportamiento de un estuario. Considerando la totalidad del tiempo de análisis (1985-2024), todos los sistemas presentan una tendencia natural a estar abiertos la mayor parte del tiempo ( $ECI < 0,5$ ), salvo en el caso del estuario del Estero Nilahue (Figura 6.23h), el cual presenta una naturaleza altamente intermitente ( $ECI \approx 0,5$ ). En contraparte, no se aprecian sistemas que manifiesten de manera clara una naturaleza persistentemente cerrada.

La predominancia de estados abiertos en la mayoría de los sistemas y ausencia de estuarios persistentemente cerrados podría explicarse por una combinación de factores. En primer lugar, los estuarios analizados se ubican mayoritariamente en cuencas que, aunque presentan caudales más reducidos en la última década, históricamente han mantenido un aporte fluvial suficiente como para mantener la conexión con el océano. A esto se suma el hecho de que la región climática mediterránea en donde se emplazan los estuarios en estudio se caracteriza por una marcada estacionalidad, lo que permite que al menos una parte del año los caudales sean suficientemente intensos para reabrir las desembocaduras cerradas. Por otro lado, la ausencia de estuarios mayoritariamente cerrados podría deberse a un criterio de selección, donde esta se enfocó en estuarios con un tamaño adecuado para su análisis mediante teledetección y con suficiente registro satelital disponible, lo que excluye a sistemas más pequeños o áridos donde los cierres prolongados podrían ser más frecuentes.

Siguiendo con la idea de la naturaleza del comportamiento de un estuario, a partir de los resultados para valores del índice ECI promedio (Tabla 6.8), es posible identificar grupos funcionales que comparten características comunes. Entre estos están: los estuarios permanentemente abiertos ( $ECI = 0$ ), estuarios mayoritariamente abiertos ( $ECI \approx 0$ ), estuarios intermitentes con predominio de apertura ( $0,1 < ECI < 0,3$ ) y estuarios altamente intermitentes ( $ECI \approx 0,5$ ). Los estuarios permanentemente abiertos (Limarí, Biobío, Rapel y Maule) y mayoritariamente abiertos (Maipo, Mataquito e Itata) en general, se encuentran en cuencas de mayor tamaño y perciben caudales más elevados. Por el contrario, los estuarios intermitentes (Elqui, Choapa, Petorca, Aconcagua y Nilahue) se asocian a cuencas más pequeñas y a menores caudales.

En este contexto, el caso del estuario del Río Limarí es particularmente interesante, ya que presenta un comportamiento morfológico resiliente ( $ECI = 0$ ) a pesar de registrar un caudal medio significativamente menor en comparación con los demás sistemas permanentemente abiertos, así como una disminución sostenida de su aporte fluvial. Una posible explicación radica en la configuración morfológica del entorno costero donde se emplaza la desembocadura (Figura 6.21b). La presencia de un cabo rocoso al sur del estuario actúa como barrera natural frente al oleaje predominante proveniente del suroeste, limitando la acción de la deriva litoral hacia la desembocadura. Además, se presenta una playa relativamente corta, lo que restringe la acumulación significativa de sedimentos en la barrera de arena. Esta combinación de factores podría favorecer la persistencia del canal de conexión incluso en condiciones de bajo caudal. No obstante, comprender con mayor precisión esta dinámica requeriría un análisis más detallado del balance sedimentario local y de la climatología marítima específica del sitio.

Por otro lado, a partir de las matrices de transición presentadas en la Tabla 6.10, es posible evaluar la inercia de los sistemas. En general, se observa que la mayoría de los estuarios presentan una alta probabilidad de mantenerse en su estado actual de un periodo al siguiente, ya sea abierto o cerrado, lo que indica una marcada persistencia en el comportamiento del sistema en el corto plazo. Esta inercia es especialmente pronunciada en el estuario del Río Petorca – La Ligua, donde la probabilidad de mantenerse en estado cerrado supera el 95%, reflejando una fuerte tendencia a la estabilización del cierre una vez ocurrido. En contraparte, estuarios mayoritariamente abiertos (e.g. Maipo, Mataquito e Itata) muestran una baja probabilidad de permanecer cerrados, lo que concuerda con su baja frecuencia histórica de cierre y su carácter permanentemente conectado con el océano. Estos casos reflejan sistemas más resilientes o menos susceptibles a procesos de obstrucción de su desembocadura. Por otro lado, estuarios como Elqui, Choapa y Nilahue presentan transiciones más equilibradas entre estados, con probabilidades de cambio (de abierto a cerrado y viceversa) cercanas al 15%, lo que sugiere mayor inestabilidad y variabilidad en su dinámica de conexión.

## 7.2.2 Estacionalidad

La evaluación de patrones estacionales en la dinámica de apertura y cierre de estuarios puede resultar de utilidad para comprender la interacción entre la desembocadura y forzantes hidrodinámicas a lo largo del año. Asimismo, identificar las estacionalidades marcadas en el comportamiento del índice ECI permite anticipar periodos críticos para la conectividad del estuario con el océano, lo que puede tener implicancias relevantes para la gestión de estos sistemas.

A partir de los registros estacionales del índice ECI, es posible observar una estacionalidad definida en sitios como Choapa (Figura 6.25c), Aconcagua (Figura 6.25e) y Nilahue (Figura 6.25h),

donde se registran mayores valores de ECI durante los meses estivales y una disminución hacia el invierno. Adicionalmente, en sitios como Maipo (Figura 6.25f), Mataquito (Figura 6.25i) e Itata (Figura 6.25l) los cuales no tienen una estacionalidad definida, es posible reconocer episodios de cierre en los meses de verano. Estos patrones se alinean con los máximos de un régimen pluvial, indicando que los cierres ocurren con mayor frecuencia durante los meses de menor caudal.

Por otro lado, en sitios como Elqui (Figura 6.25a) y Petorca – La Ligua (Figura 6.25d), no se observa estacionalidad marcada en el índice ECI a pesar de registrar niveles recurrentes de cierre. En ambos casos, el valor del ECI se mantiene relativamente elevado a lo largo de todo el año, sin un descenso significativo durante los meses invernales o de deshielo. Este comportamiento sugiere que los cierres de desembocadura de estos sitios no responden a ciclos estacionales regulares, sino que se explican mejor por fluctuaciones interanuales, asociadas a la variabilidad del régimen hídrico entre años.

Cabe mencionar que, si bien el análisis del índice ECI mensual permite una primera aproximación a la estacionalidad de los sistemas, una evaluación más detallada puede lograrse mediante el análisis del ancho de desembocadura. Este parámetro ofrece una medida continua que permite detectar con mayor sensibilidad las transiciones graduales hacia el cierre, incluso en casos donde la conexión no se interrumpe completamente, pero se reduce significativamente.

### 7.2.3 Evolución en el estado de conexión

Salvo los sitios con naturaleza permanentemente abierta, la mayoría de los sistemas estudiados manifiestan cambios en su comportamiento de conexión durante el periodo reciente. Entre los estuarios que presentan un comportamiento mayoritariamente abierto, se observa un leve aumento en la ocurrencia de cierres durante el periodo reciente, aunque con particularidades en cada caso. En el estuario del Río Maipo, el índice ECI se mantiene prácticamente constante (0,0036 en 1985-2009 y 0,0046 en 2010-2024), con dos episodios puntuales de cierre para cada periodo: uno en enero de 1997 y otro entre enero y febrero de 2023. En el caso del Río Mataquito, se registra un cambio más evidente, donde el estuario paso de una condición permanentemente abierta ( $ECI = 0$  en 1985-2009) a un comportamiento mayoritariamente abierto ( $ECI = 0,01$  en 2010-2024) debido a un episodio inédito de cierre transcurrido entre febrero y marzo de 2023. Finalmente, en el estuario del Río Itata, si bien el valor de ECI disminuye levemente entre periodos (de 0,0102 a 0,0088), esta diferencia se atribuye a la escasez de registros en el primer periodo, que contenía solo un evento de cierre (diciembre de 1998), frente a al menos tres episodios detectados entre 2021 y 2023, todos durante el verano. En conjunto, estos casos sugieren la aparición de episodios de cierre en sistemas históricamente abiertos a partir del año 2021, lo que podría constituir un indicador de vulnerabilidad emergente en estos estuarios.

Una evolución más marcada se observa en los estuarios intermitentes con predominio de apertura, los cuales han transitado hacia una condición más cerrada en años recientes. El estuario del Río Elqui por ejemplo, un sistema que se presentaba como mayoritariamente abierto para el periodo 1985-2009 ( $ECI = 0,02$ ), evolucionó hacia una condición altamente intermitente en 2010-2024, con una tendencia al cierre en su desembocadura la mayor parte del tiempo ( $ECI = 0,56$ ) y un aumento sostenido de los episodios de cierre a partir del año 2013. Esta dinámica también se manifiesta en los sitios de Petorca – La Ligua y Aconcagua, donde se presentaban como sistemas mayoritariamente abiertos ( $ECI = 0,03$  para ambos casos) y en el periodo reciente pasaron a ser sistemas mayormente

intermitentes ( $ECI = 0,32$  y  $ECI = 0,54$  respectivamente). Una dinámica similar es la que se presenta en el estuario del Río Choapa, el cual, si bien presentaba numerosos episodios de cierre en el periodo de 1985-2009 ( $ECI = 0,13$ ), estos pasaron a ser más frecuentes en el periodo posterior ( $ECI = 0,45$ ). En cambio, en el caso del estuario del Estero Nilahue no parece presentar cambios notables al mantenerse con un comportamiento altamente intermitente durante todo el periodo de estudio, donde su valor de ECI fue de 0,51 entre 1985 y 2009, aumentando levemente a 0,58 en el periodo de 2010-2024.

Por otro lado, a partir de los resultados de la Tabla 6.9, se observa una reducción sistemática en la duración de los periodos abiertos en la mayoría de los estuarios analizados, lo cual sugiere una mayor fragmentación temporal del estado de apertura. En el caso del estuario del Río Elqui se reduce su media de duración de periodos abiertos de 2.392 días en el primer periodo a tan solo 30 días en el segundo. Tendencias similares se observan en los estuarios del Río Choapa (de 576 a 70 días), Petorca – La Ligua (de 2.154 a 458 días) y Aconcagua (de 1.427 a 153 días), lo que refuerza la noción de un cambio hacia una dinámica más intermitente. En cuanto a la duración de los periodos cerrados, se observa un aumento importante en varios sistemas. Es particularmente notorio el caso del estuario de Petorca – La Ligua, donde la duración media de los cierres pasa de 30 a 745 días. Esto sugiere que no solo los cierres se hacen más frecuentes, como refleja el aumento del índice ECI, sino también más prolongados.

Finalmente, con el fin de evaluar de manera más sistemática las tendencias de cambio en el estado de conexión a lo largo del tiempo, se aplicó una regresión lineal simple sobre la proporción anual de estados abiertos ( $1 - ECI$ ) para los estuarios que presentaron al menos un episodio de cierre en el periodo total de estudio (Figura 6.28). Los resultados muestran una tendencia negativa y estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) en estuarios de naturaleza intermitente, indicando una reducción progresiva en el número relativo de aperturas anuales. Destaca especialmente el estuario del Río Elqui (Figura 6.28a), cuya pendiente es más pronunciada ( $m = -0,0259$ ), confirmando una transición acelerada hacia un comportamiento mayoritariamente cerrado. Le siguen los sistemas de Petorca – La Ligua, Choapa y Aconcagua (Figura 6.28b-d), todos con pendientes negativas significativas ( $p \leq 0,0001$ ), en concordancia con lo observado previamente a partir de los valores ECI y duración de estados. El estuario de Cahuil (Figura 6.28f), a pesar de ser altamente intermitente, muestra una pendiente negativa débil menos significativa ( $p = 0,046$ ), lo que sugiere un aumento más leve en la frecuencia de cierres en las últimas décadas. En el caso de Maipo, Mataquito e Itata, no se evidencian tendencias estadísticamente significativas, lo que concuerda con su naturaleza mayoritariamente abierta. En conjunto, estos resultados corroboran un patrón general de cierre progresivo en varios sistemas.

#### 7.2.4 Consideraciones metodológicas

El análisis del estado de conexión mediante imágenes satelitales con resoluciones espaciales entre 10 y 30 metros por píxel presenta limitaciones inherentes que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En este estudio, se consideró como “estado cerrado” únicamente cuando existía una ausencia clara y visible del canal de conexión entre el estuario y el océano, es decir, cuando se podía contrastar de manera inequívoca que no existía paso de agua superficial en la zona de desembocadura. Esta decisión metodológica busca reducir errores de clasificación en contextos de incertidumbre, priorizando una definición conservadora del cierre. A su vez, en situaciones donde no

se apreciaba un canal de desembocadura claramente visible, se evitó asumir su estado y la imagen fue clasificada como “indeterminada”.

Este enfoque implica que solo los eventos de cierre completamente definidos fueron contabilizados como tales, mientras que las aperturas potenciales no observables con claridad no fueron incluidas. Como consecuencia, es posible que algunos estados cerrados de corta duración o de menor magnitud hayan sido omitidos, mientras que la categoría de “abierto” puede incluir tanto aperturas plenas como parciales, siempre que no se haya verificado un cierre total.

Adicionalmente, al basarse en inspección visual, el procedimiento incorpora inevitablemente un grado de subjetividad, especialmente en registros satelitales donde la distinción entre estados no es evidente. Si bien se aplicaron criterios homogéneos durante todo el proceso, no puede descartarse la existencia de errores de asignación en fechas específicas, lo que constituye una fuente adicional de incertidumbre en los indicadores derivados como el índice ECI.

Otro aspecto relevante es la distribución temporal desigual de la base de datos. La disponibilidad de imágenes satelitales es considerablemente mayor en el periodo reciente. Esta asimetría puede influir en la detección de eventos de cierre, ya que en los años con menor densidad de imágenes algunos episodios podrían no haber sido registrados, generando subestimaciones del ECI en esos periodos. Además, no es hasta la aparición de Sentinel-2 en 2015 que se dispone de imágenes con una resolución y calidad espectral significativamente superiores. En consecuencia, las imágenes anteriores, provenientes principalmente de sensores como Landsat 5 y 7, presentan en muchos casos menor calidad radiométrica, lo que puede haber limitado la identificación de cierres parciales o breves, acentuando aún más el sesgo hacia aperturas.

En conjunto, la metodología aplicada prioriza la consistencia y la comparabilidad en el tiempo, por sobre la resolución de detalles morfológicos finos. A pesar de sus limitaciones, esta aproximación permitió capturar tendencias notables en la dinámica de conexión estuario-océano, demostrando un buen rendimiento como herramienta para la construcción de series temporales discretas. Su implementación, basada en imágenes satelitales de mediana resolución, facilitó la obtención de resultados coherentes y comparables entre estuarios, lo que refuerza su valor práctico para el monitoreo morfológico de estuarios intermitentes a escala regional y multitemporal.

## **7.3 Ancho de Desembocaduras**

### **7.3.1 Valores característicos y jerarquía espacial**

Uno de los atributos morfológicos clave en la caracterización de estuarios de tipo barrera es el ancho de su desembocadura. Esta variable representa una medida continua del grado de apertura del sistema y refleja de forma integrada la acción de forzantes hidrodinámicas, la disponibilidad de sedimentos y la configuración geomorfológica del entorno costero. La evolución temporal del ancho de desembocadura permite evaluar tendencias de cierre progresivo o estabilización morfológica, convirtiéndolo en un indicador útil para el diagnóstico de vulnerabilidad y la gestión de estos sistemas.

El análisis de los valores medios y medianos del ancho de desembocadura (Tabla 6.12) permite identificar una amplia diversidad entre los sistemas estuarinos en estudio, con valores promedio que

varían desde 17,19 metros en el estuario del Río Elqui hasta los 446,18 metros en el Río Biobío. Esta diferencia de más de un orden de magnitud refleja las marcadas diferencias morfológicas que caracterizan a cada sitio.

En términos generales, los estuarios se pueden agrupar jerárquicamente según sus anchos promedio:

- Estuarios de gran escala ( $> 100$  m): Este grupo contempla los estuarios de Biobío, Maule, Rapel, Mataquito e Itata y presentan anchos considerablemente superiores respecto a otros sistemas. Estos se encuentran en general asociados a cuencas fluviales de gran tamaño, un alto caudal medio y desembocaduras amplias.
- Estuarios de escala media (50 – 100 m): En esta categoría se encuentra exclusivamente el Río Maipo, con un ancho promedio de 82,57 m y una mediana de 64,15 m. Este sistema se sitúa entre los grandes estuarios y aquellos de menor escala, y su comportamiento refleja condiciones intermedias de régimen fluvial y morfología costera.
- Estuarios de menor escala ( $< 50$  m): Incluye los estuarios del Elqui, Limarí, Choapa, Petorca – La Ligua, Aconcagua y Nilahue. Estos sistemas se asocian a cuencas más pequeñas, donde el aporte fluvial es menor y las condiciones morfológicas favorecen una mayor susceptibilidad al cierre de la desembocadura.

En términos estadísticos, también se aprecia que la mediana suele ser menor que el promedio en la mayoría de los casos, lo cual sugiere distribuciones asimétricas y la presencia de eventos puntuales de gran apertura que elevan el valor medio. Esto refuerza la idea de una alta variabilidad temporal en los anchos de desembocadura, incluso dentro de un mismo sistema.

En conjunto, esta caracterización jerárquica permite establecer una primera clasificación funcional de los principales sistemas estuarinos de la zona central de Chile, útil para análisis comparativos, diseño de estrategias de monitoreo diferenciadas y evaluación de su vulnerabilidad frente a escenarios hidrológicos futuros.

### 7.3.2 Estacionalidad

La caracterización estacional del ancho de desembocadura permite identificar patrones cíclicos en la dinámica morfológica de los estuarios, aportando información clave sobre su grado de conexión efectiva con el océano a lo largo del año. La Figura 6.32 y Figura 6.33 presentan el ancho mensual promedio y mediano para los doce sistemas en estudio, diferenciando además entre los tres periodos analizados (1985–2024, 1985–2009 y 2010–2024).

En términos generales, se observa una estacionalidad marcada en gran parte de los sistemas, con valores máximos durante el invierno (junio a agosto), consistente con el aumento de caudales debido a las precipitaciones invernales. Este incremento de caudal aporta mayor energía fluvial, favoreciendo su capacidad erosiva y, por ende, la apertura del canal. Por el contrario, los valores mínimos se registran en verano, cuando la reducción de caudal limita la capacidad del río para contrarrestar la acción del oleaje, favoreciendo el estrechamiento o cierre de la desembocadura.

Este patrón se manifiesta con claridad en estuarios como Maipo, Mataquito, Itata y Biobío (Figuras f, i, k y l respectivamente), los cuales mantienen condiciones de apertura persistente durante el año, pero muestran oscilaciones regulares en su ancho como respuesta a la estacionalidad hidrológica. En sistemas intermitentes como Elqui (a), Limarí (b), Choapa (c), Petorca (d) y Aconcagua (e), también se identifican variaciones estacionales pero con una mayor dispersión, donde la incertidumbre y los valores de desviación estándar aumentan. Este comportamiento puede relacionarse con episodios de cierre parcial o apertura limitada, más difíciles de detectar consistentemente mediante imágenes satelitales.

El caso del estuario de Cahuil (h) destaca por su marcada estacionalidad y fuerte variabilidad entre meses, con máximos de ancho concentrados en los meses invernales y un colapso casi total de la apertura durante el verano. Esta transición abrupta entre estados refleja un sistema altamente intermitente y sensible a los cambios estacionales del caudal, en línea con lo evidenciado en los valores del índice ECI.

Por otro lado, estuarios como Rapel (g) y Maule (j) exhiben una estacionalidad más atenuada en comparación con otros sistemas analizados. En ambos casos, el ancho de desembocadura se mantiene relativamente estable durante gran parte del año, con disminuciones más marcadas solo entre los meses de abril y junio. Esta estabilidad podría deberse a una reducción de la influencia relativa de las variaciones estacionales debido al gran tamaño de las desembocaduras.

El análisis de la desviación estándar mensual (Figura 6.34) refuerza estos hallazgos, destacando que los meses con mayor variabilidad tienden a coincidir con las transiciones estacionales (otoño e inicios de primavera), donde se registran cambios abruptos en el caudal. Esta variabilidad también puede estar influenciada por factores externos como tormentas, crecidas fluviales, deshielos u otras perturbaciones temporales.

En suma, los resultados confirman que la mayoría de los estuarios analizados exhiben una respuesta estacional coherente con el régimen hidrológico de la zona central de Chile, con anchos máximos en invierno y mínimos en verano. La estacionalidad del ancho de desembocadura, medida de forma continua, ofrece así una herramienta complementaria al índice ECI para comprender la dinámica de conexión estuario-océano y anticipar los periodos de mayor vulnerabilidad al cierre.

### 7.3.3 Evolución en el ancho de desembocadura

El análisis temporal del ancho del canal de desembocadura revela patrones consistentes de estrechamiento en la mayoría de los estuarios estudiados, con tendencias decrecientes estadísticamente significativas en 10 de los 12 sitios analizados (Tabla 6.13). Este resultado sugiere una pérdida sistemática de conectividad morfológica en la interfaz estuario-océano durante las últimas décadas, fenómeno que puede estar asociado a una disminución progresiva del caudal fluvial y a una acumulación sedimentaria en la desembocadura.

El comportamiento más crítico se observa en los estuarios de menor escala, particularmente en Elqui, Choapa, Petorca – La Ligua y Aconcagua, donde la mediana del ancho de desembocadura disminuyó drásticamente entre los periodos 1985-2009 y 2010-2024 (Tabla 6.12). En el caso de Petorca, por ejemplo, el valor mediano cae desde 25,05 m a 0 m, mientras que en Choapa se reduce de 29,34 m a apenas 5,67 m. Este estrechamiento se refleja también en la Figura 6.27, donde se

observa un aumento en la frecuencia de registros con ancho nulo o cercano a cero en las últimas dos décadas, y en la Figura 6.29, donde los promedios anuales exhiben una clara caída posterior a 2010. La situación de Elqui es especialmente alarmante, ya que no solo muestra una tendencia decreciente altamente significativa ( $Z = -12,78$ ), sino que también exhibe anchos mediano y promedio para el último periodo que sitúan por debajo de 5 m.

En el grupo de estuarios de escala media (ancho promedio entre 50 y 100 m), representado únicamente por el estuario del Río Maipo, también se identifica una reducción importante. La mediana del ancho disminuye de 77,10 m a 45,26 m y el promedio cae de 97,87 m a 60,05 m. Esta tendencia es respaldada por el análisis de Mann-Kendall ( $Z = -9,21$ ), lo que sugiere el estrechamiento sostenido del canal de desembocadura a pesar de tratarse de un sistema históricamente abierto.

En los estuarios de mayor escala, si bien los valores de ancho se mantienen relativamente elevados, también se aprecian reducciones en la mayoría de los casos. Por ejemplo, en el Maule el ancho promedio desciende de 386,30 m a 238,95 m, y en Rapel de 286,73 m a 149,11 m, ambos con una tendencia negativa estadísticamente significativa ( $Z = -6,97$  y  $Z = -7,78$  respectivamente). Sin embargo, destaca el caso del estuario del Río Biobío, que muestra un comportamiento opuesto, con un incremento en su ancho promedio (de 345,34 m a 507,60 m) y mediana (de 323,70 m a 500,38 m), lo que podría deberse a una combinación de factores hidrológicos, marítimos y geomorfológicos particulares del sitio.

El análisis de la Figura 6.35, que muestra el rango intercuartílico del ancho en cada periodo, refuerza la noción de una pérdida de variabilidad en los estuarios más afectados, como Petorca y Elqui, donde el rango tiende a reducirse conforme disminuyen los valores centrales. En contraste, el Biobío muestra una expansión de su distribución, consistente con su tendencia creciente.

Finalmente, cabe señalar que estas tendencias no solo reflejan una disminución en los valores absolutos del ancho, sino también una pérdida de resiliencia morfológica frente a perturbaciones hidrodinámicas. En conjunto, los resultados plantean un escenario de creciente vulnerabilidad para los estuarios de menor y mediana escala, cuya conectividad con el océano se ha visto severamente comprometida en las últimas décadas.

### 7.3.4 Análisis de parámetros de calibración y validación de resultados

El método empleado para la estimación del ancho de desembocaduras se basa en la detección precisa del segmento de agua a partir de perfiles espectrales generados por el algoritmo descrito en la Sección 5.6.1. Previo a la obtención de las series de ancho, se ajustaron los coeficientes de calibración (A, B, C y D) descritos en la Sección 5.6.2, cuyos valores óptimos y errores de validación (MAE) se presentan en la Tabla 6.11. Los resultados indican que todos los sitios cumplen con el criterio de  $MAE \leq 15$  m, a excepción del Biobío, cuyo error alcanza los 18,6 m. No obstante, considerando que el ancho medio de este sistema supera los 450 m, este error relativo se considera aceptable. Los menores errores se registran en Limarí (3,4 m), Aconcagua (4,0 m), Elqui (4,6 m) y Petorca (4,7 m), lo que sugiere que la calibración alcanzó una mayor precisión en sistemas con desembocaduras de tamaño estrecho o intermedio. Esto resulta lógico si se considera que, en sistemas más pequeños, el rango absoluto de posibles errores es también reducido, ya que cualquier desviación en metros representa una fracción importante del ancho total y tiende a mantenerse acotada. En cambio, en sistemas de gran escala, el mayor rango dimensional implica que pequeñas imprecisiones relativas pueden

traducirse en errores absolutos más elevados, incrementando así el MAE aun cuando la proporción del error respecto al tamaño real del canal sea baja.

El análisis de los coeficientes permite identificar patrones consistentes entre los sitios. El coeficiente A, asociado al factor de escala general, presenta valores cercanos a 1 en la mayoría de los casos, con reducciones en sitios como Cáhuil (0,5) y en Elqui y Petorca (0,7), ajustando a la baja el ancho estimado en sitios con mayor riesgo de sobreestimación. El coeficiente B, que controla la sensibilidad a la amplitud relativa ( $\Delta$ ), es mayoritariamente positivo, lo que incrementa el ancho cuando la amplitud espectral es alta. Sin embargo, en Rapel, Maule e Itata adquiere valores negativos, compensando sobreestimaciones en canales muy contrastados. El coeficiente C, que ajusta en función de la variabilidad espectral, es positivo en Elqui, Limarí, Petorca, Aconcagua, Rapel e Itata, reforzando el ancho en perfiles ruidosos, en cambio, es negativo en Choapa, Cáhuil, Mataquito y Biobío, donde busca atenuar posibles sobreestimaciones. Por su parte, el coeficiente D, que modula la dependencia del ancho original, presenta valores negativos en la mayoría de los casos, reduciendo el ancho estimado en canales grandes para evitar sobreestimaciones, mientras que en Choapa y Cáhuil es positivo, reforzando el cálculo en sistemas donde tienden a subestimarse.

El análisis de los coeficientes de calibración (A, B, C y D) revela una alta diversidad de configuraciones entre sitios, sin que se distinga un patrón consistente de valores que pueda generalizarse para todos los casos. Esta variabilidad refleja principalmente la fuerte dependencia de la calibración respecto a las condiciones espectrales y geomorfológicas específicas de cada estuario, ya que el algoritmo ajusta los parámetros para maximizar la concordancia con las mediciones de referencia bajo el contexto particular de cada sistema. Asimismo, la naturaleza iterativa del método de calibración implica que el valor semilla inicial empleado en la optimización podría influir en la convergencia hacia determinados coeficientes, contribuyendo a la heterogeneidad observada en los resultados.

### 7.3.5 Consideraciones metodológicas

En la práctica, esta metodología permitió capturar con un buen grado de precisión la geometría de la desembocadura en una amplia gama de dimensiones y condiciones. No obstante, presenta limitaciones que deben considerarse a la hora de interpretar los resultados. La más relevante radica en la resolución espacial de los registros satelitales utilizados, la cual varía entre 10 y 15 metros según el satélite (ver Sección 5.4.2). Esta limitación inherente a la metodología implica que, en desembocaduras con canales más estrechos que esta resolución, las estimaciones pueden verse sesgadas, produciendo sobre o subestimaciones del ancho dependiendo de las condiciones locales y de los coeficientes de calibración empleados.

En sistemas de gran escala también se presentaron algunas limitaciones específicas. La mayor extensión del transecto generado a través del método de rutas de menor costo (ver Sección 5.4.3) aumenta la probabilidad de atravesar píxeles afectados por nubosidad, reflejos o interferencias, introduciendo ruido en la estimación. A ello se suma que las barreras de arena formadas en estos sistemas suelen ser mucho más dinámicas, presentando una mayor variedad de configuraciones morfológicas que dificultan una calibración precisa de los resultados. Además, estas barreras extensas y de alta movilidad tienden a segmentarse con mayor frecuencia, dando lugar a la presencia de bancos de arena o deltas distribuidos a lo largo de su extensión que impiden identificar con claridad la desembocadura principal, llegando en algunas ocasiones a presentar más de una abertura activa hacia

el mar en la barrera arenosa. Para resolver esto, se establece como criterio que el ancho de desembocadura efectivo sea aquel correspondiente a la apertura más amplia detectada en cada perfil espectral.

Por otro lado, se observaron casos en los que la ruta de menor costo no pudo completarse por falta de píxeles válidos o por la presencia de áreas sin datos en la imagen. Si bien en estos casos se aplicaron filtros y verificaciones visuales para descartar mediciones erróneas, este tipo de limitaciones evidencian la dependencia del método respecto a la calidad y cobertura espacial de las imágenes disponibles.

En relación con los forzantes que pueden influir en la medición, si bien la marea puede modificar el ancho instantáneo de la desembocadura, su efecto no se consideró explícitamente en este análisis interanual y estacional, asumiendo que estas variaciones no introducen sesgos sistemáticos a largo plazo. Sin embargo, en sistemas de menor escala, la oscilación mareal podría modificar sustancialmente la morfología del canal en escalas diarias, llegando incluso a abrir o cerrar temporalmente la desembocadura. En estos casos, la inclusión del momento de la marea en el análisis podría mejorar la interpretación de los resultados.

En general, el algoritmo fue calibrado para identificar como canal efectivo únicamente zonas de agua relativamente profundas, descartando áreas húmedas o parcialmente inundadas de la barrera de arena, como las generadas por mareas altas o eventos de oleaje. De esta forma, el método tiende a medir anchos bien conformados y persistentes, reduciendo el riesgo de clasificar erróneamente zonas intermitentemente húmedas como partes del canal.

En conjunto, la metodología aplicada prioriza la consistencia y la comparabilidad temporal por sobre la resolución de detalles morfológicos finos. A pesar de sus limitaciones, demostró un rendimiento sólido para detectar tendencias y cambios a largo plazo en la morfología de la desembocadura, constituyendo una herramienta práctica y robusta para la construcción de series temporales continuas de ancho, especialmente en estudios regionales y multisitio.

## 7.4 Correlación con Forzantes Hidrodinámicas

### 7.4.1 Caudal de río aportante

Una de las hipótesis fundamentales en la interpretación de la dinámica morfológica de las desembocaduras en estudio es que el caudal de río que alimenta el sistema actúa como principal forzante modulador del ancho del canal. En este contexto, la Figura 6.36 presenta la relación entre el ancho mensual promedio de la desembocadura y el caudal fluvial mensual promedio para los distintos sitios de estudio. En dicha figura se incluye el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) y el valor  $p$  correspondiente, junto con una línea de ajuste lineal referencial que permite visualizar la tendencia central de los datos. Los resultados además se resumen además en la Tabla 6.14.

De manera general, se observa una correlación positiva entre ambas variables en todos los sitios analizados, lo que apoya la idea de que un mayor aporte fluvial contribuye a mantener una desembocadura más amplia. No obstante, la intensidad de esta relación varía de manera considerable entre estuarios.

Entre los estuarios de menor escala, destacan Elqui ( $\rho = 0,64$ ), Choapa ( $\rho = 0,71$ ), Petorca – La Ligua ( $\rho = 0,65$ ), Aconcagua ( $\rho = 0,73$ ) y Cáhuil ( $\rho = 0,74$ ), todos con correlaciones fuertes y estadísticamente significativas ( $p < 0,001$ ). Esto sugiere una alta sensibilidad de estos sistemas a los pulsos de caudal, donde aumentos en el flujo fluvial permiten expandir rápidamente el canal de desembocadura. Esta respuesta directa podría relacionarse con la menor inercia morfológica de estos sistemas, los cuales tienden a experimentar ciclos de cierre y apertura más frecuentes.

Por otro lado, en sistemas de mayor escala, como el Río Maipo ( $\rho = 0,78$ ), Mataquito ( $\rho = 0,53$ ) e Itata ( $\rho = 0,68$ ), también se observa una relación positiva significativa, aunque con mayor dispersión de los datos.

Una excepción relevante es el caso del Río Biobío, donde la correlación es débil ( $\rho = 0,21$ ) a pesar del alto volumen de caudal involucrado. Esta débil relación podría explicarse por la elevada capacidad del sistema para mantenerse conectado bajo prácticamente cualquier condición, lo que reduce la variabilidad del ancho de desembocadura ante cambios en el caudal.

Estos resultados refuerzan la noción de que el caudal fluvial es uno de los principales controladores del ancho de desembocadura, especialmente en sistemas pequeños o medianos. Sin embargo, también evidencian que la magnitud de su influencia puede verse modulada por factores locales, incluyendo condiciones morfodinámicas y antrópicas, por lo que su rol debe interpretarse dentro de un marco multivariable.

## 7.4.2 Forzantes marítimas

El análisis de la relación entre el ancho de la desembocadura y las forzantes marítimas, particularmente marea y oleaje, arrojó resultados poco concluyentes en términos estadísticos. Tal como se muestra en la Figura 6.19a y Figura 6.20, los coeficientes de correlación de Spearman obtenidos fueron sistemáticamente bajos en todos los sitios evaluados, con valores inferiores  $\rho = 0,20$ , y en su mayoría no estadísticamente significativos. Esta baja capacidad explicativa de las forzantes marítimas sugiere en primera instancia que su influencia directa sobre la variabilidad mensual del ancho de la desembocadura es limitada en comparación con el caudal fluvial.

Complementariamente, se desarrolló un análisis cualitativo centrado en eventos extremos de oleaje registrados durante episodios de cierre estuarino, con el objetivo de identificar posibles patrones de coincidencia. No obstante, tampoco en este enfoque se hallaron relaciones claras o consistentes que permitan atribuir a las condiciones marítimas un rol determinante en la ocurrencia de cierres. La falta de evidencia concluyente contrasta con la fuerte asociación identificada entre caudal y ancho de desembocadura, destacando el papel dominante de este último en la configuración morfológica del canal.

Cabe destacar que, si bien el oleaje y la marea no exhiben una relación directa y significativa con el ancho de desembocadura en escalas temporales mensuales, esto no implica una ausencia de influencia. Por el contrario, estos forzantes actúan de forma persistente y continua sobre el sistema, ejerciendo efectos erosivos (en el caso del oleaje) o de apertura/acreción (en el caso de la marea), que moldean gradualmente la morfología de la barra arenosa. Sin embargo, sus características tienden a

ser estables a nivel interanual, lo que podría explicar la falta de correlaciones significativas en el tiempo.

En este sentido, los resultados sugieren que el oleaje no actúa como un forzante autónomo capaz de cerrar la desembocadura por sí solo, sino que su eficacia está condicionada por la magnitud del aporte fluvial. Cuando los caudales son bajos o inexistentes, el oleaje puede progresivamente acumular sedimento y cerrar la conexión. En cambio, ante caudales intensos y sostenidos, su acción es contrarrestada por la energía fluvial, que tiende a mantener la apertura o erosionar la barrera. Así, el caudal de río se configura como un regulador de la eficacia de los forzantes marítimos, definiendo en última instancia el estado morfológico de la desembocadura.

En conjunto, estos hallazgos refuerzan la idea de que, si bien el oleaje y la marea son agentes morfodinámicos activos permanentes, su rol en la dinámica de cierre y apertura depende críticamente de la disponibilidad y continuidad del forzamiento fluvial.

## 8. Conclusiones

El presente estudio ha permitido caracterizar y analizar en detalle la dinámica morfológica de las desembocaduras de doce estuarios localizados en la zona central de Chile entre 1985 y 2024, mediante el uso y procesamiento automatizado de imágenes satelitales y la construcción de series temporales. Los dos ejes principales de análisis, el estado de conexión estuario-océano y el ancho del canal de desembocadura, ofrecieron una visión complementaria de la evolución y comportamiento de estos sistemas en distintas escalas espaciales y temporales, permitiendo identificar patrones relevantes, transiciones morfológicas y forzantes dominantes.

En relación al estado de conexión, se observó que la mayoría de los estuarios estudiados presentan una naturaleza mayormente abierta ( $ECI < 0,5$ ) a lo largo de la totalidad del periodo de estudio, destacando casos como Limarí, Rapel, Maule y Biobío que se mantuvieron abiertos de manera permanente. Por otro lado, el único sistema que se identificó como altamente intermitente ( $ECI \sim 0,5$ ) en todo el periodo fue el del Estero Nilahue, mientras que no se identificaron estuarios intermitentes con una predominancia de cierre destacable. El análisis por grupos funcionales mostró que los sistemas más abiertos suelen corresponder a cuencas de mayor tamaño y con mayores caudales medios, mientras que los intermitentes se asocian a cuencas más pequeñas y con menor aporte hídrico. Sin embargo, se registraron excepciones relevantes, como el Río Limarí, que a pesar de tener un caudal medio reducido, mantiene su desembocadura abierta probablemente gracias a su configuración morfológica particular.

La evaluación de las matrices de transición indicó que la mayoría de los estuarios presenta una alta inercia en su comportamiento, con elevada probabilidad de mantener su estado de conexión de un registro al siguiente. Este patrón es especialmente marcado en sistemas como Petorca – La Ligua, con una persistencia de cierre superior al 95%, lo que refleja una fuerte tendencia a estabilizarse una vez que el canal de desembocadura se obstruye. Por el contrario, estuarios mayoritariamente abiertos como Maipo, Mataquito e Itata muestran una muy baja probabilidad de permanecer cerrados, coherente con su naturaleza históricamente abierta. Otros sistemas, como Elqui, Choapa, Aconcagua y Nilahue, exhiben transiciones más equilibradas, reflejando una mayor inestabilidad y variabilidad en su dinámica de conexión.

El análisis temporal del índice ECI evidenció que, salvo los sistemas permanentemente abiertos, en todos los sistemas se presentó un cambio hacia una mayor intermitencia en los últimos 15 años, con aumentos notables en la frecuencia y duración de los cierres. Casos extremos se observan en Elqui, que pasó de un ECI de 0,02 a uno superior a 0,5, o en Petorca – La Ligua y Aconcagua, que evolucionaron desde condiciones mayoritariamente abiertas hacia estados intermitentes prolongados. Estos cambios se reflejaron también en la reducción significativa de la duración media de los periodos abiertos y en el aumento de la duración de los cierres, lo que indica una fragmentación temporal más marcada en la conectividad de estos sistemas.

En cuanto al análisis del ancho de desembocaduras, los resultados permitieron clasificar los sistemas según su escala morfológica, identificando estuarios de gran escala ( $> 100$  m), escala media (50-100 m) y menor escala ( $< 50$  m). Esta clasificación mostró relación con el régimen de conexión y la capacidad de respuesta frente a forzantes hidrodinámicos, donde los sistemas más anchos tienden a mantener aperturas más estables, mientras que los más estrechos presentan mayor variabilidad y episodios de cierre más frecuentes. El análisis estacional del ancho confirmó que en la mayoría de estuarios exhibe un patrón coherente con el régimen hidrológico regional, con máximos en invierno asociados al aumento de caudales por precipitaciones y mínimos en verano, cuando los caudales disminuyen y el oleaje adquiere mayor capacidad para inducir cierres.

La evolución temporal del ancho de desembocadura evidenció que varios sistemas han experimentado reducciones sostenidas y de gran magnitud en algunos casos, lo que constituye una señal clara de estrechamiento progresivo de estos sistemas. Este cambio morfológico, lejos de ser puntual, se presenta de forma consistente en distintas escalas temporales y está estrechamente asociado con la disminución de aportes fluviales a los estuarios. La prueba de Mann-Kendall confirmó tendencias negativas estadísticamente significativas en la mayoría de sistemas, lo que refuerza la solidez de la evidencia de estrechamiento de desembocaduras y sugiere que estos procesos responden a transformaciones persistentes y de largo plazo en la dinámica del estuario.

El análisis de correlación con el aporte fluvial mostró que el caudal de río es, en general, el factor más influyente sobre el ancho de desembocadura, con correlaciones significativas en la mayoría de los sistemas de estudio. La magnitud de esta correlación es generalmente más fuerte en estuarios de mediana a pequeña escala, mientras que en sistemas de gran escala tiende a ser más débil, probablemente sujeto a una respuesta morfodinámica más compleja. Estos resultados adquieren especial relevancia al considerar que las forzantes marítimas, como la marea y el oleaje, no mostraron correlaciones significativas con el ancho de desembocadura, ni evidenciaron variaciones sustantivas a escalas espaciales ni temporales, de tal forma que ambos factores actúan de forma persistente y relativamente estable en sus efectos erosivos y de acreción de las barreras de arena. Esto sugiere que el oleaje solo logra actuar efectivamente en el cierre de la desembocadura cuando los caudales fluviales disminuyen, mientras que ante caudales intensos y sostenidos no es capaz de contrarrestar su efecto erosivo. Así, si bien el oleaje constituye un agente morfodinámico activo permanente, es el caudal de río el que regula su eficacia, y por ende, determina en gran medida la apertura y cierre del sistema.

Desde un punto de vista metodológico, el estudio desarrolló e implementó un enfoque de detección visual asistida del estado de conexión y de cálculo automático del ancho de desembocaduras a partir de perfiles espectrales. Esto permitió construir series temporales extensas, consistentes y comparables entre sitios y periodos, lo que constituye un avance significativo para el monitoreo de estuarios intermitentes a escala regional. En el caso del estado de conexión, la adopción de un criterio conservador redujo el riesgo de sobreestimar eventos de cierre, aunque probablemente subestimó cierres breves o parciales, especialmente en registros anteriores a 2015, donde la menor resolución y calidad radiométrica de sensores como Landsat 5 y 7 pudo limitar la detección de aperturas o cierres de pequeña escala. En el cálculo del ancho, el uso de un algoritmo subpíxel, calibrado mediante coeficientes específicos para cada sitio, permitió representar con mayor continuidad la interfaz tierra-agua y ajustar la estimación a condiciones espectrales y morfológicas locales, aunque su precisión se vio condicionada por la resolución espacial de las imágenes y por desafíos específicos en sistemas muy estrechos o de gran escala. La diversidad de configuraciones de parámetros de calibración y la

ausencia de patrones uniformes entre sitios reflejan la fuerte dependencia del método respecto a las características intrínsecas de cada estuario y a la naturaleza iterativa del proceso de optimización, en el que incluso el valor semilla puede influir en la convergencia final. Pese a estas limitaciones, incluyendo la influencia de nubosidad, píxeles sin datos, morfologías complejas y la no incorporación explícita de la fase mareal, la metodología permitió construir series temporales consistentes y comparables entre sitios y periodos, constituyendo un avance significativo en el monitoreo de estuarios en Chile. Su aplicación demostró un buen rendimiento para capturar patrones estacionales e interanuales, así como tendencias de largo plazo en la apertura, cierre y evolución morfológica de las desembocaduras, aportando una base sólida para su análisis y gestión bajo condiciones hidrológicas cambiantes.

En síntesis, los cambios observados en las últimas décadas sobre estuarios en la zona central de Chile, con aumentos de intermitencia y reducciones de ancho de desembocaduras, refuerzan la necesidad de considerar la gestión de caudales ecológicos como un componente clave para preservar la funcionalidad y los servicios ecosistémicos de estos estuarios. Asimismo, la continuidad y expansión de este tipo de análisis a otros sistemas y regiones con una mayor base de datos permitirían mejorar la comprensión de la respuesta morfológica de las desembocaduras frente a un escenario de creciente presión climática y antrópica.

# Referencias

- Abbot, M. B., 1966. *An introduction to the method of characteristics*. New York: Elsevier.
- Amigo, J. & Ramírez, C., 1998. A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. *Plant Ecology*, 136, pp. 9-26.
- Aubrey, D. G. & Speer, P. E., 1984. Updrift migration of tidal inlets. *Journal of Geology*, 92, pp. 531-545.
- Behrens, D. K., Bombardelli, F. A., Largier, J. L. & Twohy, E., 2013. Episodic closure of the tidal inlet at the mouth of the Russian River — A small bar-built estuary in California. *Geomorphology*, 189, pp. 66-80.
- Beyá, J. y otros, 2016. *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera ed. Valparaíso, Chile: Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Bishop-Taylor, R., Sagar, S., Lymburner, L. & Beaman, R. J., 2019. Between the tides: Modelling the elevation of Australia's exposed intertidal zone at continental scale. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 223, pp. 115-128.
- Bowen, A. J., 1980. Simple Models of Nearshore Sedimentation, Beach Profiles and Longshore Bars. In: S. McCann, ed. *The Coastline of Canada*. s.l.:Geological Survey of Canada, pp. 1-11.
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J. P. & Valdivieso, J., 2018. Projected hydroclimate changes over Andean basins in central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. *Climate Change*, 150, pp. 131-147.
- Bruun, P., 1978. *Stability of Tidal Inlets: Theory and Engineering*. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co..
- Cameron, W. M. & Pritchard, D. W., 1963. Estuaries. In: *The Sea, Vol. 2*. New York: John Wiley & Sons, pp. 306-324.
- Cooper, J. A. G., 1990. Ephemeral stream-mouth bars at flood-breach river mouths: comparison with ebb-tidal deltas at barrier inlets. *Marine Geology*, 95, pp. 57-70.
- Dalrymple, R., Zaitlin, B. & Boyd, R., 1992. Estuarine Facies Models: Conceptual Basis and Stratigraphic Implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, pp. 1130-1146.
- Davies, J. L., 1964. A morphogenetic approach to world shorelines, *Zeitschr. Geomorphologie*, 8, pp. 127-142.
- Davis, R. A. J. & Hayes, M., 1984. What is a wave-dominated coast?. *Marine Geology*, 60, pp. 313-329.
- Day, J. H., 1980. What is an estuary?. *S Afr J Sci*, 76, p. 198.

- Dean, R. G. & Dalrymple, R. A., 2004. *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- DGA, 2014. *Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile*, Santiago: División de Estudios y Planificación.
- Dionne, J., 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeitschrift fuer Geomorphologie*, 7(1), pp. 36-44.
- Doughty, C., Cavanaugh, K., Ambrose, R. & Stein, E., 2016. *Assessment of Sea Level Rise Vulnerability for Southern California Coastal Estuaries*, Los Angeles, CA: University of Southern California Sea Grant Traineeship Program Report.
- Dronkers, J. J., 1964. *Tidal computations in rivers and coastal waters*. New York: Wiley.
- Dronkers, J. J. & Schönfeld, J. C., 1959. *Tidal computations in shallow water*, Rijkswaterstaat: Rijkswaterstaat Communications.
- Dussailant, A., Galdames, P. & Sun, C., 2009. Water level fluctuations in a coastal lagoon: El Yali Ramsar wetland, Chile. *Desalination*, 246, pp. 202-214.
- Dyer, K. R., 1973. Estuaries: A physical introduction. *Wiley-Interscience*, p. 140.
- Escoffier, F. F., 1940. The stability of tidal inlets. *Shore and Beach*, 8, pp. 114-115.
- Escoffier, F. F., 1977. *Hydraulics and stability of tidal inlets*, Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Coastal Engineering Waterways Experiment Station.
- FitzGerald, D. M., 1976. Ebb-tidal delta of Price Inlet, SC: geomorphology, physical processes, and associated inlet shoreline changes. In: *Terrigenous Clastic Depositional Environments*. Columbia, SC: Univ. of South Carolina, pp. 143-157.
- FitzGerald, D. M., 1996. Geomorphic variability and morphologic and sedimentologic controls on tidal inlets. *Journal of Coastal Research*, 23, pp. 47-71.
- Galvin, C. J., 1971. *Inlets and wave direction*. Cambridge, MA, Mass. Inst. of Tech., pp. 44-78.
- Garreaud, R. D. et al., 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, pp. 1-19.
- Gierloff-Emden, H.-G., 1961. *Luftbild und Küstengeographie am Beispiel der deutschen Nordseeküste*, Bad Godesberg : Landeskdl. Luftbildauswertung im mitteleurop.
- Haines, P., 2006. *Physical and Chemical Behaviour and Management of Intermittently Closed and Open Lakes and Lagoons (ICOLLs) in NSW*. s.l.: [PhD Thesis]. Griffith University, Queensland, Australia.
- Hayes, M. O., 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: An introduction to the symposium. *Geology and Engineering*, pp. 3-22.
- Hayes, M. O., 1979. Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime. In: *Barrier Islands*. New York: Academic Press, pp. 1-28.

- Heimhuber, V., Vos, K., Fu, W. & Glamore, W., 2021. InletTracker: an open-source Python toolkit for historic and near real-time monitoring of coastal inlets from Landsat and Sentinel-2. *Geomorphology*, 389, p. 107830.
- Holthuijsen, L. H., 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*. s.l.:Cambridge University Press.
- Hubbard, D. K., Oertel, G. & Nummedal, D., 1979. The role of waves and tidal currents in the development of tidal-inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from North Carolina, South Carolina and Georgia. *Jour. of Sed. Pet.*, 49, pp. 1073-1092.
- Inman, D. L. & Dolan, R., 1989. The Outer Banks of North Carolina: Budget of sediment and inlet dynamics along a migrating barrier system. *J. Coastal Res.*, 5(2), pp. 193-237.
- Inman, D. L. & Nordstrom, C. E., 1971. On the Tectonic and Morphologic Classification of Coasts. *The Journal of Geology*, 79(1), pp. 1-21.
- Johnson, D. W., 1919. *Shore Processes and Shoreline Development*. New York: 1st ed., John Wiley.
- Kelly, R. P., Gallego, R. & Jacobs-Palme, E., 2018. The effect of tides on nearshore environmental DNA. *PeerJ*, 6, p. e4521.
- Kendall, M. G., 1975. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin.
- Ketchum, B. H., 1951. The exchanges of fresh and salt waters in tidal estuaries. *Journal of Marine Research*, 10(1), pp. 18-38.
- Ketchum, B. H., 1952. *Circulation in estuaries*. Cambridge, Massachusetts, s.n., pp. 65-76.
- Keulegan, G. H., 1967. *Tidal Flow in Entrances: Water-level Fluctuations of Basins in Communications with Seas. Technical Bulletin No. 14, Committee on Tidal Hydraulics*, Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station.
- Kjerfve, B., 1989. Estuarine geomorphology and physical oceanography. In: *Estuarine Ecology*. New York: John Wiley & Sons, pp. 47-78.
- Komar, P. D., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. 2nd ed. Englewood-Cliffs: Prentice-Hall.
- Largier, J. L., 1992. Tidal intrusion fronts. *Estuaries*, 15, pp. 26-39.
- Largier, J. L., Hearn, C. J. & Chadwick, D. B., 1996. Density Structures in “Low Inflow Estuaries”. In: *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics*. s.l.:American Geophysical Union (AGU), pp. 227-241.
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13, pp. 245-259.
- Martinez, C., 2023. *El Mostrador*. [En línea]  
Available at: <https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2023/07/20/cierre-de-desembocaduras-de-rios-el-colapso-de-los-ecosistemas-costeros-en-chile/>
- Masotti, I. y otros, 2018. The Influence of River Discharge on Nutrient Export and Phytoplankton Biomass Off the Central Chile Coast (33°–37°S): Seasonal Cycle and Interannual Variability. *Front. Mar. Sci.*, 5, p. 423.
- Masselink, G. & Hughes, M. G., 2003. *An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. First ed. London: Routledge.

- Matsoukis, P. F. C., 1992. Tidal Model Using Method of Characteristics. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118, p. 3.
- McFeeters, S. K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sensing*, 17(7), pp. 1425-1432.
- McSweeney, S., Kennedy, D., Rutherford, I. & J.C., S., 2017. Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*, 292, pp. 142-152.
- Nelder, J. A. & Mead, R., 1965. A simplex method for function minimization. *Comput. J.*, 7, pp. 308-313.
- Nienhuis, J. H. & Ashton, A. D., 2016. Mechanics and rates of tidal inlet migration: Modeling and application to natural examples. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 121, pp. 2118-2139.
- Nummedal, D. & Fischer, I., 1978. *Process-response models for depositional shorelines: the German and Georgia Bights*. Hamburg, ASCE, pp. 1215-1231.
- Nummedal, D., Oertel, G. F., Hubbard, D. K. & Hine, A. C., 1977. Tidal inlet variability—Cape Hatteras to Cape Canaveral: Proceedings, Coastal Sediments' 77. *American Society of Civil Engineers*, pp. 543-562.
- O'Brien, M. P., 1969. *Equilibrium flow areas of tidal inlets on sandy coasts*. Tokyo, ASCE, pp. 676-686.
- Oertel, G., 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia estuaries. In: *Estuarine Research, Vol. 2*. New York: Academic Press, pp. 267-276.
- Penland, S., Boyd, R. & Suter, J. R., 1988. Transgressive depositional systems of the Mississippi Delta plain: model for barrier shoreline and shelf sand development. *Jour. of Sed. Pet.*, 58, pp. 932-949.
- Perillo, G. M. E., 1995. Definition and geomorphologic classification of estuaries. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Amsterdam: Elsevier Science BV. Developments in Sedimentology 53, pp. 17-47.
- Perillo, G. M. E. & Piccolo, M. C., 2011. Global Variability in Estuaries and Coastal Settings. In: *Treatise on Estuarine and Coastal Science, Vol 1*. Waltham: Academic Press, pp. 7-36.
- Perillo, G., Piccolo, M. & Pino Quivara, M., 1999. What do we know about the geomorphology and physical oceanography of South American estuaries?. In: *Estuaries of South America: their geomorphology and dynamics. Environmental Science Series*,. Berlin: Springer-Verlag, pp. 1-13.
- Pritchard, D. W., 1952. Estuarine Hydrography. *Advances in Geophysics I*, pp. 243-280.
- Pritchard, D. W., 1960. Lectures on estuarine oceanography. In: s.l.:J. Hopkins Univ, p. 154.
- Pritchard, D. W., 1967. What is an estuary, physical viewpoint. In: G. H. Lauf, ed. *Estuaries*. Washington, D.C: AAAS, p. Publication No. 83.
- Ranasinghe, R. & Pattiaratchi, C., 2003. The seasonal closure of tidal inlets: causes and effects. *Coastal Engineering*, 45, pp. 601-627.

- Ranasinghe, R., Pattiaratchi, C. & Masselink, G., 1999. A morphodynamic model to simulate the seasonal closure of tidal inlets. *Coastal Engineering*, 37(1), pp. 1-36.
- Rivas-Martínez, S., 1993. Bases para una nueva clasificación bioclimática de la Tierra. *Folia Geobotanica Matritensis*, 10.
- Sallenger, A. H., 2000. Storm Impact Scale for Barrier Islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3), pp. 890-895.
- Schureman, P., 1958. *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*, Washington DC: US Department of Commerce. Coast and Geodetic Survey.
- SHOA, 2002. *Glosario de mareas y corrientes.*, s.l.: Pub. SHOA 3013, 3a edición.
- Spearman, C., 1904. The proof and measurement of association between two things.. *Am J Psychol*, 15, pp. 72-101.
- Stommel, H., 1951. *Recent Developments in the Study of Tidal Estuaries*, Massachusetts: Woods Hole Oceanographic Institution.
- Syvitski, J., Peckham, S., Hilberman, R. & Mulder, T., 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 162, pp. 5-24.
- Thorne, K. M., Buffington, K. J., Jones, S. F. & Largier, J. L., 2021. Wetlands in intermittently closed estuaries can build elevations to keep pace with sea-level rise. *Estuarine, Coast. Shelf Sci*, 257.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1984. *Shore Protection Manual*, City, ST: Coastal Engineering Research Center.
- Valle-Levinson, A., 2010. Definition and classification of estuaries. In: *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. s.l.:Cambridge University Press, pp. 1-11.
- Van der Walt, S. y otros, 2014. scikit-image: image processing in Python. *PeerJ*, 2, p. e453.
- Vos, K. y otros, 2019a. Sub-annual to multidecadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coast. Eng.*, 150, pp. 160-174.
- Vos, K. y otros, 2019b. CoastSat: a Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environ. Model. Softw.*, 122, p. 7.
- Vos, K. y otros, 2019. Sub-annual to multidecadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coast. Eng.*, 150, pp. 160-174.
- Wolanski, E., 1986. An evaporation-driven salinity maximum zone in Australian tropical estuaries. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 22, pp. 415-424.
- Wright, L. D., Coleman, J. M. & Thom, B. G., 1973. Processes of channel development in a high-tide-range environment. Cambridge Gulf-Ord River Delta. *J. Geol.*, 81, pp. 15-41.
- Xu, H., 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 3025-3033.

# Anexo

## A.0.1. Estados de conexión determinados por año

**Tabla A.1:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Elqui.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	0	0	1	0
1986	5	0	0	5	0
1987	5	4	0	1	0
1988	8	7	0	1	0
1989	4	0	0	4	0
1990	7	0	0	7	0
1991	6	3	1	1	1
1992	7	4	0	0	3
1993	7	6	0	1	0
1994	3	3	0	0	0
1995	4	1	0	1	2
1996	4	3	0	1	0
1997	9	9	0	0	0
1998	5	3	0	0	2
1999	5	4	0	1	0
2000	14	8	1	2	3
2001	18	12	0	2	4
2002	14	12	0	1	1
2003	9	7	0	2	0
2004	12	9	0	1	2
2005	13	3	0	6	4
2006	14	12	0	1	1
2007	16	16	0	0	0
2008	12	8	0	4	0
2009	10	6	0	2	2
2010	9	7	0	2	0
2011	13	8	0	5	0
2012	6	4	0	2	0
2013	14	7	4	1	2
2014	14	5	5	3	1
2015	17	5	8	3	1
2016	26	4	17	2	3
2017	46	28	6	8	4
2018	88	14	44	23	7
2019	83	22	40	11	10
2020	67	19	31	11	6
2021	82	6	59	6	11
2022	136	2	52	3	79
2023	137	0	63	1	73
2024	137	1	49	2	85

**Tabla A.2:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Limarí.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	1	0	0	0
1986	3	3	0	0	0
1987	3	2	0	1	0
1988	10	9	0	1	0
1989	5	4	0	0	1
1990	5	4	0	1	0
1991	5	4	0	1	0
1992	7	5	0	0	2
1993	9	9	0	0	0
1994	4	4	0	0	0
1995	4	4	0	0	0
1996	4	3	0	1	0
1997	7	7	0	0	0
1998	4	2	0	1	1
1999	8	7	0	0	1
2000	15	15	0	0	0
2001	13	11	0	1	1
2002	13	10	0	0	3
2003	13	12	0	1	0
2004	12	11	0	0	1
2005	17	16	0	0	1
2006	14	13	0	0	1
2007	17	15	0	0	2
2008	17	16	0	1	0
2009	13	12	0	0	1
2010	11	11	0	0	0
2011	17	14	0	1	2
2012	8	6	0	1	1
2013	16	16	0	0	0
2014	13	12	0	0	1
2015	21	21	0	0	0
2016	34	30	0	2	2
2017	69	60	0	0	9
2018	100	77	0	0	23
2019	88	81	0	0	7
2020	74	56	0	0	18
2021	87	71	0	0	16
2022	133	56	0	0	77
2023	132	72	0	0	60
2024	124	55	0	1	68

**Tabla A.3:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Choapa.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	Calidad pobre
1985	1	0	0	1	0
1986	4	4	0	0	0
1987	3	3	0	0	0
1988	10	9	0	1	0
1989	2	1	0	0	1
1990	7	7	0	0	0
1991	5	2	3	0	0
1992	5	4	0	0	1
1993	9	9	0	0	0
1994	4	3	0	1	0
1995	3	2	1	0	0
1996	3	2	1	0	0
1997	3	2	1	0	0
1998	6	3	0	2	1
1999	9	6	3	0	0
2000	19	12	5	1	1
2001	19	17	0	2	0
2002	15	13	0	1	1
2003	10	10	0	0	0
2004	10	8	2	0	0
2005	7	5	1	1	0
2006	7	7	0	0	0
2007	9	8	0	1	0
2008	8	4	4	0	0
2009	5	5	0	0	0
2010	3	3	0	0	0
2011	6	2	3	1	0
2012	0	0	0	0	0
2013	7	6	1	0	0
2014	7	3	4	0	0
2015	10	5	5	0	0
2016	16	16	0	0	0
2017	40	34	1	2	3
2018	46	23	13	8	2
2019	56	17	28	6	5
2020	41	6	29	3	3
2021	40	1	32	1	6
2022	70	5	23	0	42
2023	66	16	17	0	33
2024	63	19	9	2	33

**Tabla A.4:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Petorca – La Ligua.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	2	2	0	0	0
1986	24	24	0	0	0
1987	6	6	0	0	0
1988	27	25	0	0	2
1989	17	17	0	0	0
1990	13	11	0	1	1
1991	13	11	0	1	1
1992	18	17	0	0	1
1993	25	23	0	1	1
1994	8	8	0	0	0
1995	17	16	0	0	1
1996	21	8	8	5	0
1997	16	11	5	0	0
1998	17	16	0	0	1
1999	27	26	0	0	1
2000	43	39	0	1	3
2001	49	49	0	0	0
2002	39	37	0	0	2
2003	22	22	0	0	0
2004	28	25	0	0	3
2005	24	22	0	0	2
2006	22	21	0	0	1
2007	25	24	0	0	1
2008	20	15	0	0	5
2009	23	19	0	0	4
2010	18	10	5	2	1
2011	20	1	17	2	0
2012	0	0	0	0	0
2013	14	0	14	0	0
2014	26	0	24	0	2
2015	36	14	22	0	0
2016	31	31	0	0	0
2017	55	54	0	0	1
2018	62	56	0	0	6
2019	71	58	0	1	12
2020	68	43	17	2	6
2021	71	0	65	0	6
2022	67	0	29	0	38
2023	64	1	27	0	36
2024	63	23	13	0	27

**Tabla A.5:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Aconcagua.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	1	0	0	0
1986	14	14	0	0	0
1987	8	8	0	0	0
1988	15	15	0	0	0
1989	14	13	0	0	1
1990	9	9	0	0	0
1991	12	10	0	0	2
1992	16	13	0	0	3
1993	16	16	0	0	0
1994	9	8	0	0	1
1995	15	13	0	0	2
1996	17	7	2	3	5
1997	12	9	2	0	1
1998	14	11	2	0	1
1999	18	14	2	1	1
2000	31	27	1	0	3
2001	30	27	0	3	0
2002	30	27	0	0	3
2003	20	17	0	0	3
2004	23	23	0	0	0
2005	19	17	0	1	1
2006	15	15	0	0	0
2007	22	21	1	0	0
2008	18	18	0	0	0
2009	17	17	0	0	0
2010	11	10	1	0	0
2011	12	9	1	2	0
2012	2	2	0	0	0
2013	17	15	0	0	2
2014	17	11	3	2	1
2015	31	19	12	0	0
2016	26	26	0	0	0
2017	56	48	0	1	7
2018	72	39	17	8	8
2019	62	14	41	1	6
2020	65	9	46	3	7
2021	63	7	40	8	8
2022	65	7	28	0	30
2023	58	17	15	1	25
2024	58	40	0	1	17

**Tabla A.6:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Maipo.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	1	0	0	0
1986	14	13	0	0	1
1987	8	8	0	0	0
1988	20	19	0	0	1
1989	15	12	0	0	3
1990	8	7	0	0	1
1991	17	15	0	0	2
1992	11	10	0	0	1
1993	16	14	0	0	2
1994	7	5	0	0	2
1995	17	14	0	0	3
1996	18	15	0	1	2
1997	12	10	1	0	1
1998	14	12	0	0	2
1999	20	18	0	0	2
2000	32	28	0	0	4
2001	35	32	0	0	3
2002	27	23	0	0	4
2003	23	19	0	0	4
2004	25	25	0	0	0
2005	22	18	0	0	4
2006	19	17	0	0	2
2007	20	20	0	0	0
2008	13	13	0	0	0
2009	16	16	0	0	0
2010	10	9	0	0	1
2011	11	10	0	0	1
2012	0	0	0	0	0
2013	19	12	0	0	7
2014	20	14	0	0	6
2015	38	24	0	0	14
2016	35	24	0	0	11
2017	69	53	0	0	16
2018	79	58	0	0	21
2019	76	57	0	0	19
2020	84	56	0	0	28
2021	69	55	0	0	14
2022	60	31	0	0	29
2023	57	30	2	1	24
2024	45	27	0	0	18

**Tabla A.7:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Rapel.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	1	0	0	0
1986	15	14	0	0	1
1987	7	7	0	0	0
1988	16	16	0	0	0
1989	10	10	0	0	0
1990	10	9	0	0	1
1991	16	16	0	0	0
1992	11	10	0	0	1
1993	14	11	0	0	3
1994	7	5	0	0	2
1995	14	9	0	0	5
1996	15	11	0	0	4
1997	12	10	0	0	2
1998	17	13	0	0	4
1999	29	20	0	0	9
2000	36	21	0	0	15
2001	52	33	0	0	19
2002	35	24	0	0	11
2003	25	20	0	0	5
2004	26	23	0	0	3
2005	17	15	0	0	2
2006	16	16	0	0	0
2007	22	18	0	0	4
2008	14	11	0	0	3
2009	13	13	0	0	0
2010	12	12	0	0	0
2011	12	10	0	0	2
2012	1	0	0	0	1
2013	23	16	0	0	7
2014	26	16	0	0	10
2015	38	27	0	0	11
2016	36	22	0	0	14
2017	56	42	0	0	14
2018	81	63	0	0	18
2019	79	63	0	0	16
2020	77	57	0	0	20
2021	79	57	0	0	22
2022	61	33	0	0	28
2023	57	35	0	0	22
2024	56	38	0	0	18

**Tabla A.8:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Estero Nilahue (Cáhuil).

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	Calidad pobre
1985	1	1	0	0	0
1986	13	10	2	1	0
1987	5	5	0	0	0
1988	13	9	3	1	0
1989	6	2	3	1	0
1990	5	1	4	0	0
1991	8	4	3	1	0
1992	6	4	1	0	1
1993	5	2	3	0	0
1994	4	1	1	2	0
1995	6	3	2	1	0
1996	7	1	5	0	1
1997	4	3	1	0	0
1998	13	1	10	0	2
1999	20	10	9	1	0
2000	25	10	13	2	0
2001	38	12	23	3	0
2002	29	13	12	2	2
2003	24	6	18	0	0
2004	28	7	16	5	0
2005	21	6	10	3	2
2006	17	5	11	1	0
2007	20	4	15	1	0
2008	16	5	6	4	1
2009	20	7	10	3	0
2010	16	1	10	4	1
2011	14	4	8	2	0
2012	2	1	1	0	0
2013	18	7	7	1	3
2014	18	7	9	0	2
2015	29	19	8	1	1
2016	33	5	23	4	1
2017	51	23	26	0	2
2018	68	33	27	7	1
2019	67	8	47	9	3
2020	69	33	28	6	2
2021	74	23	32	11	8
2022	57	11	24	7	15
2023	57	21	13	5	18
2024	60	19	16	4	21

**Tabla A.9:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Mataquito.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	1	0	0	0
1986	12	11	0	0	1
1987	5	5	0	0	0
1988	14	14	0	0	0
1989	7	7	0	0	0
1990	4	4	0	0	0
1991	8	8	0	0	0
1992	4	4	0	0	0
1993	5	5	0	0	0
1994	6	6	0	0	0
1995	6	6	0	0	0
1996	7	6	0	0	1
1997	5	5	0	0	0
1998	12	12	0	0	0
1999	15	13	0	0	2
2000	21	20	0	0	1
2001	34	32	0	0	2
2002	28	26	0	0	2
2003	20	20	0	0	0
2004	23	23	0	0	0
2005	20	17	0	0	3
2006	17	17	0	0	0
2007	16	14	0	0	2
2008	10	9	0	0	1
2009	15	15	0	0	0
2010	11	11	0	0	0
2011	10	10	0	0	0
2012	0	0	0	0	0
2013	16	15	0	0	1
2014	17	16	0	0	1
2015	27	26	0	0	1
2016	25	24	0	0	1
2017	45	42	0	0	3
2018	60	55	0	0	5
2019	65	61	0	0	4
2020	68	64	0	0	4
2021	57	51	0	0	6
2022	56	44	0	0	12
2023	57	34	6	1	16
2024	60	44	0	0	16

**Tabla A.10:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Maule.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	0	0	0	0	0
1986	10	7	0	0	3
1987	5	5	0	0	0
1988	5	5	0	0	0
1989	2	2	0	0	0
1990	4	4	0	0	0
1991	1	1	0	0	0
1992	1	1	0	0	0
1993	3	3	0	0	0
1994	2	1	0	0	1
1995	3	3	0	0	0
1996	1	1	0	0	0
1997	3	3	0	0	0
1998	10	5	0	0	5
1999	25	15	0	0	10
2000	24	12	0	0	12
2001	47	31	0	0	16
2002	33	20	0	0	13
2003	20	15	0	0	5
2004	37	27	0	0	10
2005	25	18	0	0	7
2006	19	18	0	0	1
2007	11	11	0	0	0
2008	10	8	0	0	2
2009	20	20	0	0	0
2010	11	11	0	0	0
2011	8	8	0	0	0
2012	0	0	0	0	0
2013	19	12	0	0	7
2014	20	9	0	0	11
2015	33	17	0	0	16
2016	32	19	0	0	13
2017	52	36	0	0	16
2018	67	49	0	0	18
2019	64	52	0	0	12
2020	69	51	0	0	18
2021	65	46	0	0	19
2022	58	44	0	0	14
2023	56	46	0	0	10
2024	63	46	0	0	17

**Tabla A.11:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Itata.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	0	0	0	0	0
1986	3	3	0	0	0
1987	3	3	0	0	0
1988	0	0	0	0	0
1989	0	0	0	0	0
1990	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0
1993	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0
1995	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0
1998	7	6	1	0	0
1999	11	11	0	0	0
2000	12	12	0	0	0
2001	19	19	0	0	0
2002	11	10	0	0	1
2003	9	9	0	0	0
2004	13	13	0	0	0
2005	11	10	0	0	1
2006	7	7	0	0	0
2007	7	7	0	0	0
2008	9	9	0	0	0
2009	8	7	0	0	1
2010	4	4	0	0	0
2011	4	4	0	0	0
2012	0	0	0	0	0
2013	9	9	0	0	0
2014	14	13	0	1	0
2015	16	16	0	0	0
2016	21	18	0	0	3
2017	36	31	0	0	5
2018	59	52	0	2	5
2019	57	46	0	0	11
2020	62	52	0	0	10
2021	60	52	1	0	7
2022	61	37	2	2	20
2023	61	36	2	2	21
2024	69	43	0	0	26

**Tabla A.12:** Estados de conexión establecidos para el estuario del Río Biobío.

Año	Nro. de Imágenes	Estado de Conexión			Calidad pobre
		Abierto	Cerrado	Indeterminado	
1985	1	1	0	0	0
1986	4	4	0	0	0
1987	3	3	0	0	0
1988	0	0	0	0	0
1989	0	0	0	0	0
1990	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0
1993	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0
1995	0	0	0	0	0
1996	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0
1998	7	7	0	0	0
1999	10	10	0	0	0
2000	15	15	0	0	0
2001	22	21	0	0	1
2002	12	11	0	0	1
2003	10	8	0	0	2
2004	17	13	0	0	4
2005	19	12	0	0	7
2006	15	10	0	0	5
2007	17	11	0	0	6
2008	17	12	0	0	5
2009	17	12	0	0	5
2010	13	11	0	0	2
2011	13	12	0	0	1
2012	11	10	0	0	1
2013	26	24	0	0	2
2014	27	26	0	0	1
2015	27	26	0	0	1
2016	47	45	0	0	2
2017	54	50	0	0	4
2018	96	88	0	0	8
2019	87	79	0	0	8
2020	103	96	0	0	7
2021	104	91	0	0	13
2022	120	77	0	0	43
2023	122	86	0	0	36
2024	127	81	0	0	46

## A.0.2. Comportamiento estacional de sitios de estudio

### A.0.2.1 Estuario Río Elqui

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.1:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Elqui determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.2 Estuario Río Limarí

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.2:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Limarí determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.3 Estuario Río Choapa

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.3:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Choapa determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

#### A.0.2.4 Estuario Río Petorca – La Ligua

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	Blue											
1986	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1987	Blue											
1988	Blue											
1989	Blue		Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1990			Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow		Blue	
1991	Blue	Blue		Yellow			Blue	Blue	Blue	Blue		Blue
1992		Blue				Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1993	Blue	Blue		Blue	Blue				Blue	Blue	Yellow	Blue
1994	Blue	Blue			Blue					Blue		Blue
1995	Blue			Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue			
1996	Red	Blue		Yellow	Blue		Blue	Yellow	Yellow		Red	Red
1997	Red	Red				Blue		Blue		Blue	Blue	
1998		Blue				Blue	Blue	Blue			Blue	Blue
1999	Blue		Blue	Blue			Blue		Blue			Blue
2000	Blue	Yellow			Blue	Blue	Blue	Blue				Blue
2001	Blue		Blue	Blue			Blue					Blue
2002	Blue			Blue			Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2003	Blue				Blue		Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2004	Blue			Blue	Blue							Blue
2005	Blue			Blue	Blue							
2006		Blue		Blue		Blue					Blue	Blue
2007	Blue		Blue	Blue		Blue		Blue	Blue			
2008	Blue								Blue	Blue	Blue	Blue
2009	Blue		Blue		Blue	Blue		Blue			Blue	Blue
2010	Blue		Blue					Blue	Blue	Yellow	Red	Red
2011	Red	Red	Yellow	Red			Red	Yellow	Red	Red	Red	Red
2012												
2013		Red		Red	Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red
2014	Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
2015	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2016	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2017	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2018	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue			Blue	Blue	Blue	Blue
2019	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2020	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Red	Red	Red
2021	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
2022	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red
2023	Red	Red	Red	Red	Red	Red		Yellow	Red	Red	Red	Red
2024	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

**Figura A.4:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Petorca – La Ligua determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.5 Estuario Río Aconcagua

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	Blue	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White
1986	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1987	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1988	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1989	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1990	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1991	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1992	White	Blue	White	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1993	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1994	Blue	Blue	White	White	Blue	White	White	White	Blue	Blue	Blue	White
1995	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue
1996	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Blue	White	Blue	White	Blue	White	Yellow	Red
1997	Red	White	White	White	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1998	White	Blue	White	White	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Red
1999	Blue	Red	Yellow	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2000	Blue	Yellow	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2001	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Yellow	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2002	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2003	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue
2004	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2005	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	White	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White
2006	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2007	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	White	White	White
2008	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2009	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2010	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Yellow	White
2011	White	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	White
2012	White	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	White
2013	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2014	Yellow	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Yellow
2015	Blue	Red	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Blue	White	Blue	Blue	Blue
2016	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2017	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue
2018	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow	Yellow	Yellow
2019	Yellow	Red	Red	Red	Red	Yellow	Blue	Yellow	Red	Red	Red	Red
2020	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	Blue	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
2021	Red	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
2022	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Yellow	White	Blue	Red	Red	Yellow
2023	Yellow	Red	Red	Red	Red	Yellow	Blue	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue
2024	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Yellow

**Figura A.5:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Aconcagua determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.6 Estuario Río Maipo

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	Blue	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White
1986	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue
1987	Blue	Blue	Blue	White	White	White	White	White	White	White	White	White
1988	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	White	White	White	White	White	White
1989	Blue	White	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	White
1990	White	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	White	White	White
1991	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue
1992	White	Blue	White	Blue	White	White	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue
1993	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue
1994	Blue	Blue	White	White	Blue	White	White	White	White	Blue	White	White
1995	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue
1996	Blue	Yellow	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue
1997	Yellow	White	White	White	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White
1998	White	Blue	Blue	White	White	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue
1999	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2000	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2001	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	White	White	White	Blue
2002	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2003	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2004	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2005	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2006	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2007	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	Blue
2008	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2009	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	White	White	Blue
2010	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	Blue	White
2011	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	White
2012	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	Blue
2013	White	White	White	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue
2014	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	White	White	Blue
2015	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2016	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	White	White	White	Blue
2017	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2018	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2019	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2020	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2021	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2022	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	White	Blue	Blue	Blue	Blue
2023	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2024	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

**Figura A.6:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Maipo determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.7 Estuario Río Rapel

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.7:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Rapel determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.8 Estuario Estero Nilahue (Cáhuil)

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	Abierto											
1986	Cerrado		Cerrado		Mixto		Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
1987		Abierto									Abierto	Abierto
1988	Abierto		Cerrado		Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto	Abierto			Mixto
1989	Cerrado		Cerrado							Abierto	Abierto	Mixto
1990					Cerrado	Cerrado	Cerrado		Abierto			
1991		Cerrado	Cerrado				Abierto	Abierto	Abierto			Mixto
1992				Cerrado			Abierto	Abierto			Abierto	
1993	Cerrado	Cerrado	Cerrado				Abierto		Abierto			
1994		Cerrado								Mixto		Mixto
1995						Mixto			Abierto			Cerrado
1996		Cerrado					Cerrado		Mixto	Cerrado	Cerrado	
1997	Cerrado						Abierto	Abierto		Abierto		
1998		Cerrado	Cerrado			Cerrado		Cerrado		Mixto	Cerrado	Cerrado
1999	Cerrado	Cerrado	Mixto	Cerrado	Cerrado		Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Cerrado
2000	Cerrado	Cerrado		Cerrado	Cerrado	Mixto	Abierto		Abierto	Abierto	Mixto	Mixto
2001	Cerrado	Cerrado		Cerrado	Cerrado		Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Mixto	Cerrado
2002	Cerrado	Cerrado		Mixto			Abierto	Abierto	Abierto		Abierto	Mixto
2003	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado		Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Cerrado	Cerrado
2004	Mixto	Cerrado	Mixto	Mixto	Cerrado		Mixto	Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Cerrado
2005	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Mixto	Mixto		Abierto		Abierto	Abierto	Mixto	
2006		Cerrado	Cerrado	Cerrado		Mixto	Abierto		Abierto	Mixto	Cerrado	Cerrado
2007	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Abierto	Mixto			
2008	Mixto	Cerrado	Cerrado						Abierto	Abierto		Mixto
2009	Mixto	Cerrado	Cerrado	Mixto	Cerrado				Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
2010	Mixto	Cerrado	Mixto						Abierto	Cerrado	Mixto	
2011	Cerrado	Cerrado	Mixto	Mixto		Cerrado		Abierto	Abierto	Abierto	Cerrado	
2012			Cerrado						Abierto			
2013	Cerrado			Cerrado	Cerrado	Cerrado	Mixto	Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Abierto
2014	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado		Abierto		Abierto		Abierto		Abierto
2015	Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Abierto		Abierto	Abierto	Abierto
2016	Mixto	Mixto	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Mixto	Cerrado	Abierto	Mixto	Abierto	Cerrado	Mixto
2017	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Mixto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
2018	Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Cerrado	Mixto	Abierto		Mixto		Mixto	Mixto
2019	Mixto	Cerrado	Mixto	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado	Mixto				Cerrado
2020	Cerrado	Cerrado	Mixto	Mixto	Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto		Mixto
2021	Mixto	Abierto	Mixto		Mixto	Cerrado	Cerrado	Mixto	Abierto	Abierto		Mixto
2022	Mixto	Cerrado	Mixto				Mixto	Abierto	Mixto			Mixto
2023	Mixto	Mixto	Mixto				Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Mixto
2024	Cerrado	Mixto	Mixto	Cerrado	Mixto	Mixto	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto	Mixto	Cerrado

**Figura A.8:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Estero Nilahue (Cáhuil) determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.9 Estuario Río Mataquito

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985	Blue											
1986	Blue							Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
1987	Blue	Blue										
1988	Blue		Blue		Blue			Blue	Blue			
1989	Blue					Blue				Blue	Blue	Blue
1990							Blue		Blue			
1991	Blue	Blue	Blue				Blue	Blue				Blue
1992							Blue	Blue			Blue	
1993	Blue	Blue	Blue				Blue		Blue			
1994		Blue								Blue	Blue	Blue
1995						Blue			Blue			Blue
1996		Blue					Blue		Blue	Blue		
1997	Blue							Blue		Blue	Blue	
1998		Blue	Blue			Blue	Blue	Blue		Blue	Blue	Blue
1999		Blue	Blue		Blue		Blue	Blue	Blue			Blue
2000	Blue			Blue			Blue					
2001	Blue			Blue		Blue	Blue	Blue				Blue
2002	Blue			Blue			Blue	Blue				Blue
2003	Blue			Blue	Blue			Blue				Blue
2004	Blue						Blue	Blue				Blue
2005	Blue	Blue			Blue		Blue					
2006		Blue		Blue		Blue	Blue	Blue				Blue
2007	Blue		Blue	Blue		Blue	Blue	Blue				
2008	Blue	Blue							Blue	Blue		Blue
2009	Blue		Blue	Blue					Blue	Blue	Blue	Blue
2010	Blue		Blue								Blue	
2011	Blue	Blue	Blue	Blue				Blue	Blue	Blue		
2012												
2013				Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
2014	Blue	Blue	Blue					Blue				
2015	Blue	Blue	Blue				Blue	Blue				
2016	Blue	Blue	Blue									
2017	Blue	Blue	Blue									
2018	Blue	Blue	Blue									
2019	Blue	Blue	Blue									
2020	Blue	Blue	Blue									
2021	Blue	Blue	Blue									
2022	Blue	Blue	Blue									
2023	Blue	Yellow	Yellow									
2024	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

**Figura A.9:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Mataquito determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.10 Estuario Río Maule

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.10:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Maule determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.11 Estuario Río Itata

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.11:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Itata determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.

### A.0.2.12 Estuario Río Biobío

Año /Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1985												
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												
2024												

**Figura A.12:** Comportamiento estacional e interanual del estado de conexión de la desembocadura del Río Biobío determinado a través de registros satelitales. Cada fila corresponde a un año y cada columna a un mes. Los colores indican el estado de la desembocadura. En azul se indica estado de conexión abierto, en rojo un estado cerrado y en amarillo un estado ya sea mixto (cerrado y abierto durante el mes) o indeterminado. En blanco se indican los meses en que no hay registros satelitales.