

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Mejoramiento de un modelo hidrodinámico mediante la incorporación de cambios morfológicos temporales en desembocadura de la laguna Cáhuil, VI Región.

Memoria de Título presentada por

Tomás Aurelio Tapia Cáceres

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Catalán Mondaca

ABRIL, 2026

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: Mejoramiento de un modelo hidrodinámico mediante la incorporación de cambios morfológicos temporales en descargadores de la Laguna Grande, VI R

Nombre del candidato(a): TOMAS AURELIO TAPIA CÁCERES

Carrera / Grado: Ingeniero Civil

Campus: Valparaíso **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 (marcar una opción)

☑ 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 **(marcar una opción):**

☐ 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: 15 Mayo 2026 **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15 Mayo 2026 **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.

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

Mejoramiento de un modelo hidrodinámico mediante la incorporación de cambios morfológicos temporales en desembocadura de la Laguna Cáhuil, VI Región.

AUTOR:

Tomás Aurelio Tapia Cáceres

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Profesor Guía	Patricio Catalán	
Miembro 1 Comisión	Álvaro Ossandón	
Miembro 2 Comisión		

Valparaíso, Chile, 10 de abril de 2026.

Mejoramiento de un modelo hidrodinámico mediante la incorporación de cambios morfológicos temporales en desembocadura de la Laguna Cáhuil, VI Región.

Tomás Tapia[1], Patricio Catalán[2], Rodrigo Cienfuegos[3]

[1] Universidad Técnica Federico Santa María
[2] Universidad Técnica Federico Santa María
[3] Pontificia Universidad Católica de Chile

Resumen

La dinámica de lagunas costeras con desembocadura intermitente está fuertemente condicionada por la morfología variable de su barra de arena. Esta investigación presenta la primera caracterización morfológica de alta frecuencia de la laguna de Cáhuil (Chile) para mejorar la predicción de su comportamiento hidrodinámico. A partir de 4978 imágenes de una cámara fotográfica fija, se aplicó un algoritmo de segmentación K-means con inicialización guiada (espacios HSV y Lab) para extraer los perímetros agua-arena y obtener una serie temporal horaria de 15 meses que detalla los estados de conexión y ancho del canal de desembocadura.

Esta variabilidad se integró como condición de borde dinámica en un modelo lagunar simplificado existente que resuelve ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento mediante un esquema de Runge-Kutta de cuarto orden. La validación con mediciones *in situ* de los niveles de agua lagunar demostró que el modelo con ancho variable supera sistemáticamente al de geometría constante: redujo el sesgo negativo en un 27,9 % (de -0,244 m a -0,176 m) y el Error Absoluto Medio (MAE) en un 8,7 % (de 0,252 m a 0,230 m).

Aunque la precisión mejoró significativamente, el modelo mantiene una subestimación residual de -0,176 m, por lo que se concluye que la morfología variable de la desembocadura es un factor insustituible para la predicción hidrodinámica, pero su efecto debe acoplarse a forzantes costeros adicionales omitidos en esta etapa (como el *wave setup* del oleaje y la tensión del viento) para lograr una representación física más completa del sistema.

Palabras claves: Lagunas costeras, Desembocadura intermitente, Modelación hidrodinámica, Procesamiento de imágenes, Segmentación K-Means, Morfodinámica.

Índice

1. Introducción **4**
- 1.1. Objetivos y Alcance . . . 5
  - 1.1.1. Objetivo general . . . 5
  - 1.1.2. Objetivos específicos . . . 5
- 1.2. Organización del Documento . . . 5

2. Antecedentes Generales **6**
- 2.1. Proyecto Simona Costa . . . 6
- 2.2. Sitio de Estudio . . . 6

3. Marco Teórico **8**
- 3.1. Procesamiento de Imágenes . . . 8
  - 3.1.1. Espacios de color HSV y Lab . . . 8
  - 3.1.2. Segmentación mediante clustering: K-Means . . . 9
  - 3.1.3. Morfología matemática . . . 10
- 3.2. Análisis de Patrones Espaciales: Clustering DBSCAN . . . 10
- 3.3. Distancia Euclidiana Mínima entre Curvas . . . 10
- 3.4. Forzantes Hidrodinámicas . . . 11
  - 3.4.1. Mareas . . . 11
  - 3.4.2. Caudal fluvial . . . 13
- 3.5. Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado . . . 13
  - 3.5.1. Ecuaciones gobernantes . . . 15
  - 3.5.2. Método numérico . . . 17
- 3.6. Métricas de error . . . 18

4. Metodología **20**
- 4.1. Etapas de la Investigación . . . 20
- 4.2. Técnicas e Instrumentos . . . 21
- 4.3. Procesamiento de Imágenes . . . 21
  - 4.3.1. Base de datos imágenes . . . 21
  - 4.3.2. Segmentación de imágenes mediante K-Means . . . 22
  - 4.3.3. Generación de la grilla de muestreo . . . 24
  - 4.3.4. Extracción del perímetro agua-arena . . . 25
- 4.4. Detección Morfológica de la Desembocadura . . . 26
  - 4.4.1. Estado de conexión . . . 26
  - 4.4.2. Ancho de la desembocadura . . . 27
  - 4.4.3. Estimación de parámetros geométricos constantes (L_c y h_c) . . . 28
- 4.5. Forzantes Hidrodinámicas . . . 28
  - 4.5.1. Estimación de marea en Cáhuil . . . 28
  - 4.5.2. Análisis armónico de marea . . . 29
  - 4.5.3. Caudal fluvial . . . 29
- 4.6. Simulación Numérica del Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado . . . 29
  - 4.6.1. Procesamiento de datos de entrada . . . 30
  - 4.6.2. Configuración inicial de la simulación . . . 32
  - 4.6.3. Estructura computacional . . . 33

4.6.4. Post-procesamiento y validación . . . 33
4.7. Validación del modelo numérico . . . 34
4.7.1. Ajuste de referencia vertical . . . 34
4.7.2. Alineamiento temporal . . . 35
4.7.3. Métricas de error . . . 35
4.7.4. Visualización de resultados . . . 36
4.7.5. Consideraciones del período de validación . . . 36

5. Resultados **37**
5.1. Procesamiento de Imágenes . . . 37
5.1.1. Segmentación imágenes . . . 38
5.1.2. Evolución temporal del perímetro agua-arena . . . 38
5.2. Morfología de la desembocadura . . . 39
5.2.1. Estado de conexión . . . 40
5.2.2. Ancho desembocadura . . . 41
5.2.3. Profundidad y largo canal desembocadura . . . 44
5.3. Marea en Cáhuil . . . 45
5.3.1. Estimación de marea . . . 45
5.3.2. Análisis de componentes astronómicos . . . 47
5.4. Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado . . . 47
5.4.1. Simulación caso 1a . . . 48
5.4.2. Simulación caso 1b . . . 50
5.4.3. Simulación caso 2 . . . 51
5.4.4. Simulación caso 3 . . . 52
5.4.5. Métricas de error con datos medidos . . . 53

6. Discusión **56**
6.1. Procesamiento de Imágenes y Segmentación . . . 56
6.2. Morfología de la Desembocadura . . . 56
6.2.1. Estado de conexión . . . 56
6.2.2. Ancho de la desembocadura . . . 57
6.2.3. Profundidad y largo canal desembocadura . . . 57
6.3. Marea en Cáhuil . . . 57
6.4. Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado . . . 58
6.5. Sesgo Residual y sus Posibles Causas . . . 59
6.6. Limitaciones Metodológicas . . . 59

7. Conclusiones **60**

8. Anexos **62**
8.1. Desarrollo de las Ecuaciones Gobernantes . . . 62
8.1.1. Conservación de la Masa . . . 62
8.1.2. Conservación de la Cantidad de Movimiento . . . 63
8.2. Componentes Armónicos . . . 64
8.3. Resultados algoritmo de aperturas y anchos . . . 66
8.4. Resultados anchos por mensuales . . . 68
8.5. Rango intercuartílico de anchos diarios en cada mes . . . 69

1. Introducción

La gestión de sistemas costeros y lagunares representa un desafío crítico en la investigación ambiental y la planificación territorial, debido a su alta sensibilidad a forzantes naturales y presiones antrópicas. Estos ecosistemas cumplen funciones ecológicas, hidrológicas y socioeconómicas esenciales, pero están expuestos a procesos de variabilidad morfológica e hidrodinámica que afectan directamente su estabilidad. Comprender y modelar la interacción entre la morfología y la dinámica hídrica en lagunas costeras es fundamental para anticipar riesgos, mejorar la gestión de recursos y promover un desarrollo territorial sostenible.

A nivel global, muchos de estos cuerpos de agua se clasifican como lagunas costeras intermitentemente abiertas y cerradas, conocidas en la literatura científica como ICOLLs por sus siglas en inglés (McSweeney et al., 2017; Roy et al., 2001). El modelado numérico de estos ecosistemas es particularmente complejo, ya que el intercambio hídrico está estrictamente controlado por la morfodinámica de una barra de arena en la desembocadura. Sin embargo, debido a los altos costos operativos y a las dificultades logísticas que implica realizar levantamientos topobatimétricos continuos, la evolución de alta frecuencia de estos canales suele ser difícil de capturar in situ.

A nivel nacional, la laguna Cáhuil, ubicada en la Región de O'Higgins, constituye un caso de estudio emblemático. De acuerdo con las clasificaciones geomorfológicas clásicas, este sistema opera como un estuario de tipo barrera (Pritchard, 1967), cuyo comportamiento está fuertemente condicionado por el macrobioclima mediterráneo de Chile central (Amigo y Ramírez, 1998). Este cuerpo de agua, alimentado por el estero Nilahue y los aportes oceánicos, presenta una dinámica regulada precisamente por una barra de arena altamente inestable. Su morfología responde de forma rápida a procesos estacionales como el transporte de sedimentos, la energía del oleaje, el viento y las crecidas fluviales, generando fluctuaciones drásticas en el nivel de agua, la salinidad y la oxigenación de la laguna. Estas variaciones impactan directamente las condiciones ambientales y las actividades productivas históricas de las comunidades locales, tales como la salinería, la ostricultura y el turismo, vinculando estrechamente la física del sistema con su sostenibilidad socioeconómica.

En el marco del proyecto FONDEF IDeA I+D (ID22I10087) SIMONA COSTA, se han desarrollado herramientas de monitoreo en terreno y simulación para este sistema. Entre ellas destaca una base de datos fotográfica continua de la desembocadura y el modelo hidrodinámico simplificado propuesto por Soto (2024), el cual incorpora batimetría detallada, series de caudal fluvial y marea reconstruida mediante componentes armónicos. No obstante, al igual que en muchas aproximaciones clásicas empleadas en otros sistemas costeros (Malhadas et al., 2009), este modelo asume una geometría de desembocadura estática (ancho, profundidad y largo constantes). Esta simplificación impone una limitación importante a su capacidad predictiva, al ignorar la evolución morfológica de la barra de arena, la cual es el principal regulador físico del vaciado y llenado de la laguna.

La presente investigación busca superar esta brecha metodológica mediante la incorporación explícita de los cambios morfológicos de la barra en el modelo hidrodinámico existente, utilizando un registro fotográfico horario proveniente de cámaras fijas de bajo costo. El análisis sistemático de estas imágenes mediante visión computacional permite extraer y cuantificar la evolución real de la desembocadura para utilizarla como una condición de borde dinámica. Con ello, se espera no solo mejorar la precisión del modelo frente a los datos observados, sino también establecer un flujo de trabajo metodológico transferible a otras lagunas costeras con escasez de datos instrumentales.

1.1. Objetivos y Alcance

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de incorporar la variabilidad morfológica de la barra de arena en el canal de desembocadura a un modelo hidrodinámico existente de la laguna Cáhuil, mediante análisis fotográfico horario, con el fin de mejorar la estimación de niveles de agua y la capacidad predictiva del modelo lagunar.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Procesar la base de imágenes mediante técnicas de análisis fotográfico para caracterizar la evolución temporal del canal de desembocadura.

2. Integrar la formulación matemática del canal variable al modelo hidrodinámico existente.

3. Evaluar la mejora predictiva del modelo modificado frente a su versión estática y proponer recomendaciones de gestión e investigación costera.

1.2. Organización del Documento

El presente documento se estructura en siete capítulos que abordan de manera secuencial el desarrollo de la investigación.

El **Capítulo 1** corresponde a la introducción, donde se contextualiza el problema a nivel global y local, se identifica la brecha de investigación y se definen los objetivos general y específicos.

El **Capítulo 2** expone los antecedentes generales, incluyendo la ubicación geográfica de la laguna Cáhuil y una descripción del proyecto SIMONA COSTA, fuente principal de los registros fotográficos utilizados.

El **Capítulo 3** desarrolla el marco teórico, abarcando los fundamentos del procesamiento digital de imágenes (segmentación K-means, espacios de color HSV y Lab, morfología matemática), los forzantes hidrodinámicos (mareas, caudal fluvial), la formulación del modelo hidrodinámico simplificado y las métricas de error empleadas en la validación estadística.

El **Capítulo 4** detalla la metodología implementada, organizada en tres etapas fundamentales: caracterización morfológica mediante procesamiento de imágenes, simulación numérica del modelo acoplado con ancho variable, y validación frente a datos instrumentales observados.

El **Capítulo 5** presenta los resultados obtenidos, comenzando con el desempeño del algoritmo sobre las imágenes y la evolución temporal de los perímetros, seguido de la morfodinámica de la desembocadura (estado de conexión, ancho, profundidad y largo), la estimación de la marea en Cáhuil y las corridas hidrodinámicas junto con sus métricas de error.

El **Capítulo 6** discute críticamente estos resultados, analizando la robustez de la segmentación visual, la marcada estacionalidad morfológica observada y, como foco principal, el impacto físico y cuantitativo de transitar de un modelo de ancho constante a uno de geometría variable.

Finalmente, el **Capítulo 7** sintetiza las conclusiones derivadas de la investigación, validando el cumplimiento de los objetivos, destacando las limitaciones metodológicas encontradas y proponiendo líneas de trabajo futuro. Los anexos y las referencias bibliográficas complementan el documento.

2. Antecedentes Generales

2.1. Proyecto Simona Costa

El proyecto Simona Costa (Sistema de Monitoreo y Anticipación de la Resiliencia Costera) nace como una iniciativa orientada a la observación sistemática y de alta frecuencia de los sistemas costeros, combinando tecnologías de captura de imágenes, pronósticos meteorológicos y oceanográficos con un enfoque participativo dirigido a las comunidades locales. Consta de la integración de la observación continua mediante imágenes de video geo-rectificadas con la necesidad de anticipar la dinámica costera para la toma de decisiones informadas. El proyecto se ejecuta en la comuna de Pichilemu, Región de O'Higgins, abarcando las zonas de Punta de Lobos y la laguna Cáhuil, dos sistemas con alta relevancia socioeconómica y ambiental.

Los beneficiarios directos del proyecto incluyen a los actores productivos y comunitarios que dependen de la dinámica costera. En el sector de Cáhuil, coexisten ostricultores, salineros y prestadores de servicios recreativos cuyas actividades están condicionadas por el caudal del estero Nilahue, la salinidad, el nivel de oxígeno disuelto y niveles de agua, variables que a su vez están fuertemente influenciadas por la apertura y cierre de la barra de arena en la desembocadura. En Punta de Lobos, el interés se centra en las condiciones de oleaje para actividades náuticas y turísticas, así como en la conservación de la biodiversidad. El proyecto busca, en el mediano plazo, entregar información que contribuya a reducir la exposición a inundaciones costeras, fomentar un desarrollo turístico seguro y facilitar la adaptación al cambio climático, mediante la aplicación de herramientas de inteligencia artificial y pronósticos con ventanas de 1 a 7 días.

Para el desarrollo de esta investigación, el proyecto Simona Costa ha proporcionado tres insumos fundamentales. En primer lugar, la base de datos fotográfica de la desembocadura de la laguna Cáhuil, compuesta por imágenes horarias obtenidas desde una cámara fija, que constituye la fuente primaria para la caracterización morfológica del canal. En segundo lugar, la topo-batimetría de la laguna, levantada en campañas de terreno, que permite la construcción de la curva hipsométrica utilizada en el modelo hidrodinámico. Finalmente, las series de nivel de agua en la laguna, facilitadas por los investigadores del proyecto pero correspondientes a mediciones realizadas por el proyecto GEF Humedales Costeros, fueron empleadas para la validación de las simulaciones. Estos datos, en conjunto, han permitido abordar la hipótesis central de esta investigación: que la incorporación de la morfología variable de la desembocadura mejora significativamente la capacidad predictiva del modelo hidrodinámico existente.

2.2. Sitio de Estudio

La laguna Cáhuil (Lat. 34°28′48″ S; Long. 72°1′32″ O) se ubica en la comuna de Pichilemu, provincia de Cardenal Caro, Región de O'Higgins, Chile. Se trata de un sistema lagunar costero que presenta una conexión intermitente con el océano Pacífico a través de una desembocadura de características morfológicas variables (Figura 1).

De acuerdo con la clasificación geomorfológica de Pritchard (1967), este sistema corresponde a un estuario de tipo barrera. Su ubicación latitudinal lo sitúa dentro del macrobioclima mediterráneo característico de Chile central (Amigo & Ramírez, 1998), el cual condiciona fuertemente su hidrodinámica, clasificándolo globalmente como un sistema intermitente o ICOLL (McSweeney et al., 2017). Esta configuración climática impone un régimen estacional muy marcado en la barra de arena: durante el invierno, las altas precipitaciones y la ocurrencia de tormentas litorales mantienen la desembocadura mayoritariamente abierta y durante el verano, la escasez hídrica fluvial y la disminución de la energía del oleaje la mantienen mayoritariamente cerrada.

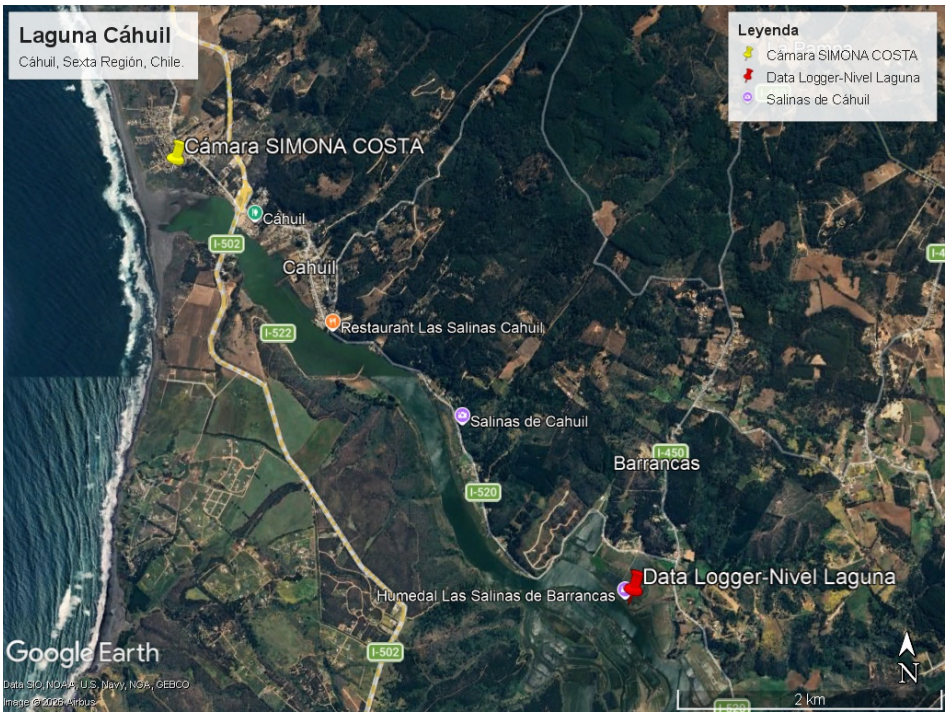


Figura 1: Ubicación laguna Cáhuil.
Fuente: Google Earth.

La desembocadura de la laguna, como se ve en la Figura 2 corresponde al sector de interacción entre el cuerpo lagunar y el mar. Su geometría (ancho, profundidad, longitud del canal) se desarrolla en la zona de estrangulamiento debido a la barra de arena.



Figura 2: Desembocadura laguna Cáhuil.
Fuente: www.tomasaereas.cl

3. Marco Teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos que sustentan las metodologías empleadas en esta investigación. Se abordan en primer lugar las técnicas de procesamiento digital de imágenes utilizadas para caracterizar la morfología de la desembocadura: segmentación mediante clustering K-means con inicialización guiada, espacios de color HSV y Lab, operaciones de morfología matemática, detección de agrupamientos con DBSCAN y cálculo del ancho del canal como distancia mínima entre curvas. A continuación, se revisan las forzantes hidrodinámicas: la marea, estimada en Cáhuil por interpolación IDW y análisis armónico con UTide, y el caudal fluvial del estero Nilahue a partir de registros de la DGA. Posteriormente, se describe el modelo hidrodinámico lagunar simplificado, basado en las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento resueltas numéricamente mediante Runge-Kutta de cuarto orden, detallando sus componentes: topo-batimetría, forzantes y geometría variable del canal. Finalmente, se exponen las métricas de error empleadas en la validación (MAE, RMSE y sesgo), que permiten evaluar cuantitativamente el desempeño del modelo modificado respecto a las observaciones de terreno.

3.1. Procesamiento de Imágenes

La cuantificación de los cambios morfológicos en la desembocadura requiere un conjunto de técnicas de visión computacional y aprendizaje automático. A continuación, se presentan los fundamentos teóricos de los métodos empleados en la etapa de procesamiento de imágenes.

3.1.1. Espacios de color HSV y Lab

La representación digital estandarizada de las imágenes capturadas en terreno se basa en el modelo RGB (Red, Green, Blue). Sin embargo, la literatura especializada en teledetección y fotogrametría advierte que la aplicación directa de algoritmos de segmentación sobre este espacio presenta deficiencias críticas en entornos naturales (Adeline et al., 2013). El modelo cúbico RGB exhibe una alta correlación cruzada entre sus tres bandas y carece de uniformidad perceptual. Ante variaciones naturales de iluminación —tales como el paso de nubes, el brillo especular del sol sobre el agua o la proyección de sombras topográficas—, los tres canales RGB se alteran de forma simultánea. Dado que K-means minimiza distancias en el espacio de características, estas fluctuaciones lumínicas introducen una alta varianza intra-clase, dificultando que el modelo distinga entre un cambio real de material físico y una simple condición de sombra.

Para resolver este problema, resulta indispensable proyectar la imagen hacia espacios de color que desacoplen la cromaticidad de la luminancia. Como demuestran Adeline et al. (2013) en su evaluación de robustez ante sombras en imágenes de alta resolución, los modelos de color invariantes como el cilíndrico HSV (Hue, Saturation, Value) son altamente efectivos para este propósito, ya que descomponen la señal en el matiz o tono puro (H), la saturación del color (S) y su intensidad o brillo (V). Al aislar la componente de iluminación en el canal V, el matiz (H) de un píxel permanece matemáticamente robusto frente a los cambios en la intensidad de la luz y la presencia de sombras.

De forma complementaria, el espacio Lab (o CIELAB) aporta una ventaja matemática crucial. Fue diseñado por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) para ser perceptualmente uniforme, garantizando que la distancia matemática entre dos puntos en el espacio corresponda proporcionalmente a la diferencia de color que percibe el ojo humano. Como destacan León et al. (2006), la transformación de coordenadas RGB a unidades $L^*a^*b^*$ es un paso fundamental cuando se busca una cuantificación objetiva e invariante del color, separando un canal de luminosidad (L) de dos canales cromáticos oponentes: el eje a (verde-rojo) y el eje b (azul-amarillo).

En la presente investigación, la metodología propone extraer y concatenar las características de ambos espacios, conformando un vector hiperdimensional de seis dimensiones (H, S, V, L, a, b) para cada observación. Esta hibridación asegura que el clustering opere en un espacio de características optimizado, maximizando la separabilidad estadística entre el agua y la arena, y minimizando el impacto de las fluctuaciones atmosféricas del registro fotográfico continuo.

3.1.2. Segmentación mediante clustering: K-Means

El algoritmo K-means es una técnica clásica de agrupamiento no supervisado ampliamente utilizada en la segmentación de imágenes por su eficiencia computacional (Jain, 2010). El objetivo de K-means es particionar un conjunto de n observaciones en k clústeres, donde cada observación se asigna al grupo cuyo centroide (vector medio) se encuentra más cercano. Matemáticamente, la partición óptima se obtiene minimizando la función objetivo basada en la suma de distancias cuadráticas intra-clúster:

$$J = \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} d(x, \mu_i)^2 \tag{1}$$

donde x representa un vector de características, C_i es el conjunto de puntos asignados al clúster i, μ_i es el centroide del clúster y d es la métrica de distancia empleada.

La calidad de la segmentación en K-means es altamente sensible a la inicialización de los centroides; una selección aleatoria frecuentemente conduce a la convergencia en mínimos locales subóptimos (Jain, 2010). Para mitigar este problema, en este trabajo se utiliza una inicialización guiada mediante muestras de referencia (semillas) seleccionadas manualmente, incorporando conocimiento a priori de la morfología costera. Esta estrategia comparte la filosofía del algoritmo de agrupamiento sustractivo propuesto por Dhanachandra et al. (2015), pero en lugar de basarse exclusivamente en la densidad de los datos, fuerza la representatividad física de las clases (agua y arena) a través de coordenadas espaciales fijas.

Adicionalmente, para vincular el espacio hiperdimensional (H, S, V, L, a, b) con la inicialización del modelo, el cálculo de los centroides a partir de los puntos de referencia no utiliza la tradicional métrica espacial. Para determinar la similitud y pertenencia de un píxel a estas clases semilla, se reemplaza la distancia euclidiana clásica por la distancia de Mahalanobis normalizada, representada en la Ecuación 2.

$$D_M(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}_i) = \sqrt{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)} \tag{2}$$

donde $\mathbf{x}$ representa el vector de características de seis parámetros para cada píxel evaluado, $\boldsymbol{\mu}_i$ es el vector del centroide correspondiente al clúster i, T el operador de transposición y $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ es la matriz inversa de covarianza, la cual ajusta la métrica considerando la dispersión y la correlación entre los distintos canales de color.

Como demuestra Perlibakas (2004), la distancia euclidiana asume independencia isotrópica entre las variables, lo cual es matemáticamente impreciso en imágenes digitales donde las características espectrales de los seis canales fusionados están correlacionadas. La distancia de Mahalanobis, al incorporar la matriz de covarianza de los datos, corrige esta correlación y estandariza las varianzas, proporcionando una medida de similitud estadística mucho más precisa para discriminar los materiales en la desembocadura.

3.1.3. Morfología matemática

La morfología matemática proporciona un marco teórico robusto y no lineal para el análisis de formas y estructuras espaciales en imágenes binarias y en escala de grises. Como expone Vincent (1993), las operaciones fundamentales de esta disciplina son la erosión y la dilatación, a partir de las cuales se definen transformaciones compuestas como la apertura (erosión seguida de dilatación) y el cierre (dilatación seguida de erosión). En el contexto de la segmentación de imágenes costeras, estas operaciones son vitales para homogeneizar las clases resultantes del *clustering*, permitiendo eliminar pequeñas imperfecciones debidas al ruido espectral y suavizar los bordes entre el agua y la arena.

Para abordar imperfecciones topológicas más complejas, se aplican operaciones avanzadas como la eliminación de objetos pequeños y el relleno de huecos. Estas funciones se basan en el concepto de reconstrucción morfológica detallado por Vincent (1993), un proceso algorítmico que permite filtrar componentes conectados según un umbral de área, preservando intacta la forma y topología de las regiones restantes. En la práctica, esto asegura la fusión de enclaves anómalos (por ejemplo, píxeles aislados de arena húmeda clasificados erróneamente como agua) que se encuentran completamente rodeados por otra clase, basándose en principios estrictos de conectividad espacial.

Finalmente, la morfología matemática facilita la extracción precisa de los bordes perimetrales entre las clases. Al aplicar una dilatación morfológica sobre la máscara binaria de la arena y restarle la máscara original, se aísla un contorno de un píxel de grosor. Este método analítico garantiza la detección exacta de la frontera exterior que define el límite físico entre la arena y el cuerpo de agua en la laguna.

3.2. Análisis de Patrones Espaciales: Clustering DBSCAN

Una vez extraído el contorno perimetral, es necesario identificar espacialmente las zonas clave para iniciar el seguimiento del borde. Dado que este problema requiere agrupar coordenadas físicas bidimensionales en lugar de valores de color, se emplea el algoritmo de *clustering* espacial basado en densidad DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), propuesto originalmente por Ester et al. (1996).

A diferencia del método K-means utilizado en la segmentación espectral, DBSCAN presenta la ventaja de no requerir la especificación del número de clústeres a priori, determinándolos de forma autónoma en función de la aglomeración espacial de los datos. El algoritmo define un clúster como una región de alta densidad de puntos separada por regiones de baja densidad, utilizando dos parámetros fundamentales: el radio de vecindad (ε) y el número mínimo de puntos para conformar una región densa (`minPts`).

Los puntos que no cumplen con los criterios de densidad geométrica no se asignan a ningún grupo y son catalogados explícitamente como ruido (Ester et al., 1996). En el análisis de la desembocadura, esta propiedad es excepcionalmente útil: permite aislar y agrupar con precisión las concentraciones densas de puntos perimetrales en los extremos de la Región de Interés (ROI), ignorando de manera automática aquellos puntos aislados o artefactos residuales que no representan una zona de inicio válida para el seguimiento morfológico de los bordes reales del canal de desembocadura.

3.3. Distancia Euclidiana Mínima entre Curvas

El ancho efectivo de la desembocadura se define operativamente como la distancia mínima entre los dos márgenes del canal (límite superior e inferior). Dados dos conjuntos finitos de puntos bidimensionales que representan ambos bordes del canal de desembocadura, $P = \{p_1, \ldots, p_m\}$ y

$Q = \{q_1, \ldots, q_n\}$, la métrica se calcula mediante la minima de la norma euclidiana entre todos los pares posibles:

$$d_{\text{mín}}(P, Q) = \min_{i,j} \|p_i - q_j\| \tag{3}$$

Este enfoque geométrico, basado en la distancia mínima entre conjuntos de vectores, permite capturar analíticamente el punto de mayor estrechamiento topográfico del canal. Desde una perspectiva física, esta sección transversal mínima representa el "cuello de botella" del sistema. De acuerdo con los principios fundamentales de la hidráulica de canales, una reducción en el área de flujo induce necesariamente un aumento en la magnitud de la velocidad para satisfacer la conservación de la masa (Chow, 1973). Por consiguiente, este estrangulamiento constituye el punto de mayor relevancia hidrodinámica de la desembocadura: no solo concentra las velocidades máximas de la corriente, sino que, como define la literatura especializada en morfodinámica lagunar, actúa como un filtro natural que condiciona el prisma de marea y restringe el intercambio de masa entre la laguna y el océano (Kjerfve, 1986).

Computacionalmente, este cálculo se implementa de forma eficiente mediante operaciones matriciales vectorizadas (tales como el *broadcasting* en bibliotecas de cálculo como NumPy). Esto permite evaluar la matriz completa de distancias cruzadas y extraer el mínimo global sin necesidad de iteraciones costosas ni algoritmos geométricos complejos. Como respaldan Pardo-Pascual et al. (2012), el uso de métricas de distancia euclidiana sobre fronteras discretizadas es un estándar robusto y validado en estudios de evolución costera para cuantificar cambios espaciales y variaciones en la posición de los márgenes.

3.4. Forzantes Hidrodinámicas

3.4.1. Mareas

Estimación de la Marea en Cáhuil Dado que la zona de estudio no cuenta con un mareógrafo local in situ, la serie de nivel del mar debe estimarse a partir de estaciones costeras adyacentes. Para ello, se emplea el método de interpolación por ponderación inversa a la distancia (IDW, por sus siglas en inglés), una técnica determinística ampliamente validada en ciencias geofísicas para estimar variables espaciales en ubicaciones no muestreadas (Shepard, 1968). El valor estimado $\hat{Z}$ en el punto de interés x_0 se calcula como un promedio ponderado de los niveles observados Z_i en las estaciones vecinas x_i, asignando pesos w_i inversamente proporcionales a la distancia d_i:

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i Z_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \quad w_i = \frac{1}{d_i^p} \tag{4}$$

donde p es el exponente de decaimiento que controla el radio de influencia. Como establece Shepard (1968), este parámetro define la topología de la superficie interpolada. Aunque empíricamente es común utilizar $p = 2$, en el presente trabajo se adopta $p = 1$. Esta decisión se fundamenta en la dinámica de propagación de la onda de marea en costas relativamente rectas, donde la fase y amplitud tienden a variar de forma lineal entre estaciones. El uso de $p = 1$ asume un gradiente lineal, evitando la generación de gradientes artificiales nulos en los puntos de control (efecto *bullseye*) y resultando en una estimación físicamente más representativa para la propagación mareográfica.

Para evaluar la matriz de distancias geodésicas (d_i) entre las estaciones y la desembocadura, se emplea la fórmula del haversine, la cual determina la distancia del gran círculo sobre la superficie esférica terrestre (Sinnott, 1984):

$$d = 2R \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right) \tag{5}$$

donde R es el radio terrestre medio (6371 km), ϕ corresponde a la latitud y λ a la longitud.

Es importante destacar que los datos de nivel del mar en bruto, obtenidos de las estaciones mareográficas, no están referidos al Nivel Medio del Mar (NMM) y contienen la superposición de la marea astronómica, ruido meteorológico y variaciones estacionales. Para homogeneizar las series y aislar la señal de interés, se aplica un filtro de paso alto restando a cada observación temporal una media móvil centrada de 7 días.

Esta decisión metodológica cumple un doble propósito físico y matemático. En primer lugar, sustrae el nivel medio y filtra las oscilaciones sub-mareales de baja frecuencia provocadas por forzantes meteorológicas de escala sinóptica (como el apilamiento de agua por viento y los cambios de presión atmosférica), cuya duración típica en la costa central de Chile oscila entre 3 y 7 días. En segundo lugar, aunque este filtro también elimina las componentes armónicas astronómicas de largo periodo (quincenales y mensuales), dicha atenuación es energéticamente despreciable. Como establece el SHOA (2023), la costa continental chilena presenta un régimen mareal mixto, dominado casi en su totalidad por las bandas de alta frecuencia correspondientes a los ciclos semidiurnos y diurnos (dos pleamares y dos bajamares diarias con desigualdades significativas). Además, el litoral central se clasifica como un ambiente micromareal, con rangos típicamente inferiores a los 2 metros (Hayes, 1975). Dado que la energía del sistema se concentra abrumadoramente en estas oscilaciones de 12 y 24 horas, el filtrado aísla de manera efectiva la señal gravitacional dominante y libre de ruido meteorológico, optimizando la convergencia matemática y la precisión de la herramienta U-Tide al extraer las constantes armónicas.

Análisis de Componentes Armónicas La marea astronómica es el resultado de la superposición de múltiples ondas armónicas, cuyas frecuencias están dictadas por la mecánica orbital del sistema Tierra-Luna-Sol. La altura de la marea $Z_m(t)$ en un instante t se modela matemáticamente mediante la serie finita:

$$Z_m(t) = Z_0 + \sum_{k=1}^{N} A_k \cos(\omega_k t - \phi_k) \tag{6}$$

donde Z_0 es el nivel medio del mar local, y A_k, ω_k y ϕ_k representan la amplitud, la frecuencia angular y la fase de la componente k, respectivamente. Mientras que las frecuencias astronómicas son universales, las amplitudes y fases sufren alteraciones locales por la batimetría y la morfología costera, por lo que deben extraerse empíricamente a partir de los registros observacionales.

Para resolver este sistema sobredeterminado ajustando el modelo de la Ecuación (6), se emplea la metodología unificada U-Tide (Codiga, 2011). Esta herramienta representa el estado del arte en el análisis armónico, ofreciendo un manejo robusto de series temporales irregulares y aplicando correcciones nodales precisas.

Con el objetivo de garantizar la reproducibilidad del método y la eficiencia computacional sin depender de paquetes adicionales, el algoritmo U-Tide se configuró bajo las siguientes premisas: resolución mediante mínimos cuadrados ordinarios (`OLS`), exclusión de la tendencia lineal secular (`NoTrend`) y asunción de ruido blanco para la estimación de los intervalos de confianza (`White`). Esta parametrización asegura la extracción precisa de las constantes armónicas esenciales, dando una condición de borde oceánica altamente confiable para el modelo hidrodinámico.

3.4.2. Caudal fluvial

El caudal del estero Nilahue (Q_r) constituye la principal forzante hidrológica del sistema lagunar de Cáhuil, actuando en conjunto con la marea oceánica. Hidráulicamente, se define como el volumen de agua continental que atraviesa una sección transversal del cauce por unidad de tiempo ($[L^3T^{-1}]$). Este flujo presenta una fuerte variabilidad estacional y episódica, modulada por eventos de precipitación, escorrentía superficial y la dinámica de la cuenca aportante. La correcta parametrización de esta serie temporal es un requisito indispensable para reproducir de forma realista el balance de masa y la evolución del nivel de agua en la laguna durante la modelación numérica.

Los datos hidrométricos utilizados en esta investigación provienen de la estación fluviométrica **Nilahue en Santa Teresa**, operada por la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile. Esta estación registra el nivel hidrométrico continuo, el cual es transformado a caudal instantáneo mediante las curvas de descarga (curvas de gasto) calibradas por dicho organismo estatal.[1]

Para acoplar esta forzante al dominio de estudio, se extraen las series temporales de caudal instantáneo estrictamente coincidentes con la ventana temporal del análisis de imágenes fotográficas y el registro mareográfico. Esta serie homogeneizada conforma la condición de borde de flujo fluvial (Q_r) del modelo hidrodinámico, cerrando el balance de las forzantes externas del sistema.

3.5. Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado

El modelo hidrodinámico base para la laguna de Cáhuil, desarrollado por Soto (2024), constituye el punto de partida sobre el cual se implementan las mejoras morfológicas propuestas en esta investigación. Este modelo se fundamenta en las ecuaciones promediadas de conservación de masa y cantidad de movimiento, resueltas numéricamente mediante el método de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4). Cabe destacar que la formulación original de Soto (2024) se guió por el trabajo de Malhadas et al. (2009), limitándose a una verificación visual de los resultados. En contraste, el modelo modificado en este estudio se valida de forma visual y cuantitativa, aplicando métricas de error (MAE, RMSE y sesgo) respecto a datos de nivel de agua medidos en terreno. A continuación, se detallan sus componentes y modificaciones principales:

- **Topo-batimetría:** El modelo incorpora una representación detallada de la topografía subacuática mediante una malla ráster generada por interpolación Kriging a partir de datos de terreno. Esta batimetría permite establecer curvas hipsométricas precisas para calcular el volumen $V(Z_L)$ y el área superficial $A(Z_L)$ en función del nivel de agua, representando con alta fidelidad la geometría real de la laguna.

- **Caudal fluvial (Estero Nilahue):** El aporte de agua dulce del estero Nilahue (Q_r) se incorpora como un término fuente continuo en la ecuación de conservación de masa, representando una de las dos forzantes principales del sistema.

- **Forzante mareal:** La elevación del nivel del mar se representa mediante una función armónica compuesta por constituyentes de amplitud y fase conocidas. Estas constantes se determinan aplicando la herramienta U-Tide (Codiga, 2011) a la serie de nivel del mar proyectada para Cáhuil. A diferencia del modelo base de Soto (2024), que empleaba un número reducido de componentes, esta investigación incorpora todos los constituyentes astronómicos significativos identificados por el filtro, capturando la dinámica mareal con mayor fidelidad energética.

[1] Los datos históricos y en tiempo real se encuentran disponibles en el Sistema Nacional de Información del Agua (SNIA): https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes.

- **Canal de desembocadura:** El modelo original asumía una geometría prismática estática para el canal, definida por un ancho (b_c), largo (L_c) y profundidad (h_c) constantes en el tiempo. La principal contribución de la presente investigación radica en la flexibilización de esta premisa, incorporando la variación temporal en su morfología, específicamente mediante un ancho dinámico $b_c(t)$ derivado del procesamiento de imágenes y estimaciones para las variables constantes de h_c y L_c.
- **Dinámica de conexión y desconexión:** Para simular los periodos de cierre de la barra, el modelo original de Soto (2024) utilizaba un umbral de altura crítico estático; si ambos niveles (mar y laguna) caían bajo este umbral, el caudal de intercambio (Q_c) se forzaba a cero. En el modelo modificado, la condición de apertura o cierre no depende de un umbral teórico predefinido, sino que se impone empíricamente a partir del análisis morfológico de las imágenes, el cual entrega directamente el ancho del canal como dato de entrada (anulándose durante los cierres).

La conceptualización espacial y geométrica de los parámetros descritos se ilustra en la Figura 3, que presenta una vista en elevación y planta del sistema lagunar.

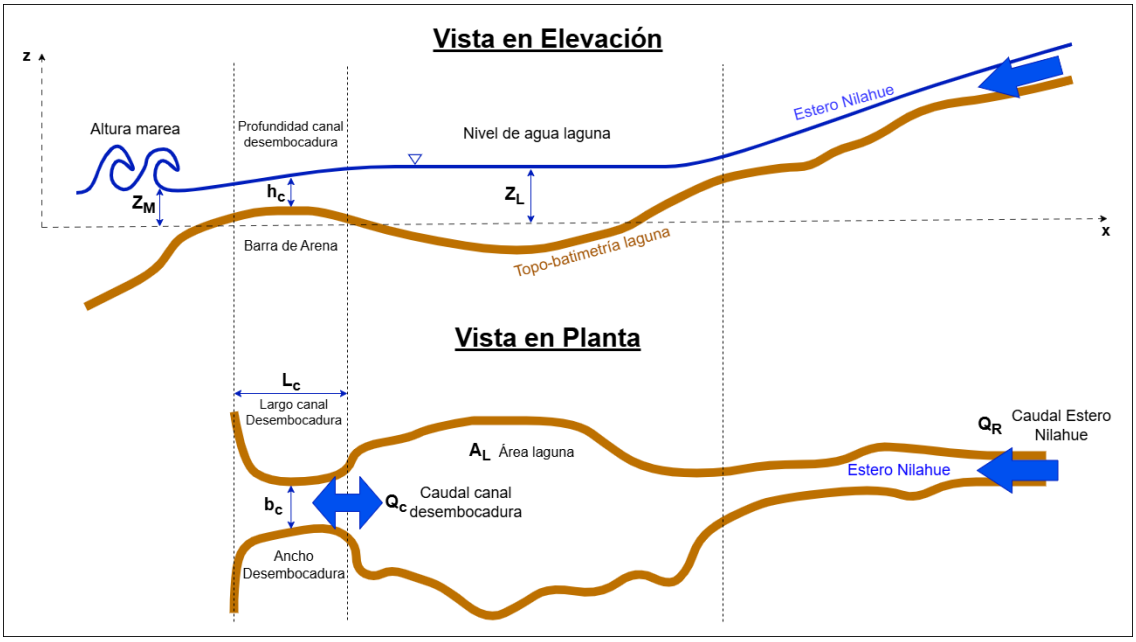


Figura 3: Esquema Modelo Hidrodinámico Simplificado.

En la dirección principal del flujo, el límite aguas arriba está definido por el caudal entrante del estero (Q_r) mediante una serie temporal. El cuerpo principal de la laguna queda caracterizado por su nivel de agua (Z_L), el cual gobierna instantáneamente el área superficial (A_L) y el volumen almacenado (V_L). Aguas abajo, el canal de conexión de dimensiones (b_c, h_c, L_c) actúa como elemento de control morfodinámico. A través de él, el caudal de intercambio se genera producto del gradiente hidráulico entre el nivel de la marea (Z_m) y el nivel de la laguna (Z_L), descontando las pérdidas de carga por fricción contra los contornos del canal.

De modo esquemático, la Figura 4 detalla el perfil longitudinal (elevación) del canal de desembocadura, destacando sus parámetros geométricos notables y las variables hidrodinámicas de contorno.

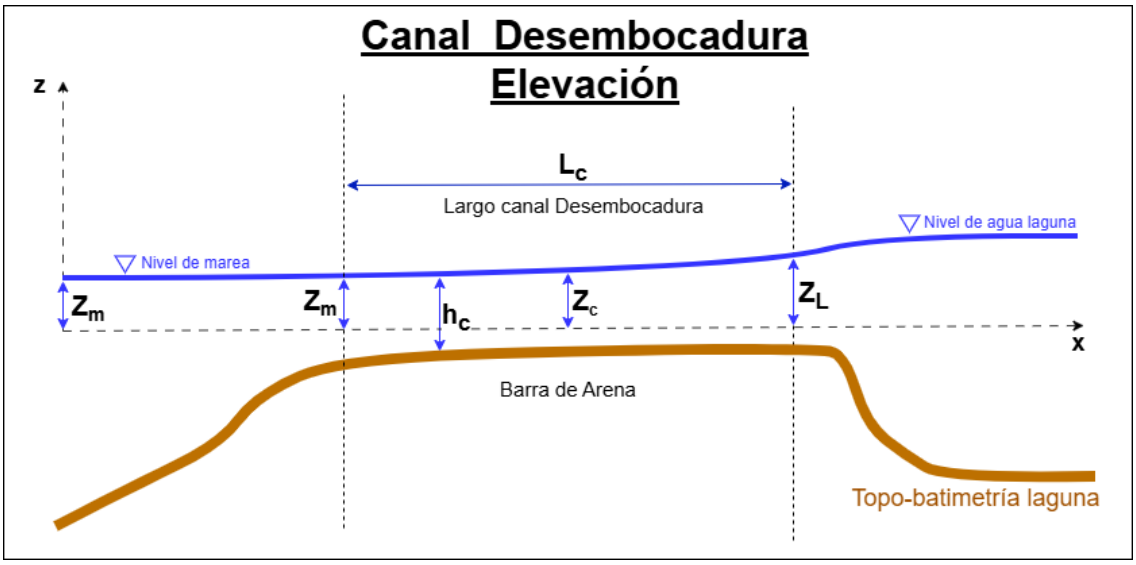


Figura 4: Esquema detallado Canal Desembocadura.

Es importante notar que el modelo conceptual simplificado asume una profundidad (h_c) y longitud (L_c) constantes en todo el trayecto del canal y en el timepo, concentrando la variabilidad hidrodinámica en los extremos debido a los niveles superficiales oscilantes de la laguna (Z_L) y del mar (Z_m).

Finalmente, cabe precisar que el plano de referencia vertical utilizado para todas las cotas superficiales y la topo-batimetría corresponde al Nivel Medio del Mar (NMM), establecido en la cota $Z = 0$, admitiendo de manera natural el registro de valores negativos durante las fases de bajamar.

3.5.1. Ecuaciones gobernantes

El comportamiento hidrodinámico del sistema lagunar se describe matemáticamente aplicando el Teorema de Transporte de Reynolds a un volumen de control espacialmente fijo. El sistema queda definido por dos ecuaciones acopladas ordinarias que imponen la conservación de la masa y la cantidad de movimiento. Las variables de estado a resolver son el nivel de agua en la laguna (Z_L) y el caudal de intercambio a través del canal de desembocadura (Q_c), los cuales evolucionan en función de la morfología del canal y las fluctuaciones forzantes del mar y la cuenca. El desarrollo exhaustivo de estas expresiones se detalla en la sección de Anexos.

La **ecuación de conservación de masa** (o de continuidad) se expresa en su forma integral general a través de la Ecuación 7:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV + \int_{SC}\rho\vec{v}\cdot\vec{n}dA = 0 \tag{7}$$

Al definir la totalidad de la laguna como el volumen de control (VC), los términos se simplifican de la siguiente manera:

- La tasa de cambio de la masa en la laguna: $\frac{\partial}{\partial t}\int_{VC}\rho dV = \rho\left(Z_L\frac{dA_L}{dZ_L}\frac{dZ_L}{dt} + A_L\frac{dZ_L}{dt}\right)$.
- El flujo másico neto a través de las superficies de control (SC): $\int_{SC}\rho\vec{v}\cdot\vec{n}dA = -\rho(Q_c + Q_r)$.

Asumiendo una densidad del agua (ρ) constante e incompresible, y factorizando respecto a la derivada del nivel, se obtiene la expresión para la conservación de volumen en la laguna (Ecuación 8):

$$\frac{dZ_L}{dt} = \frac{Q_c + Q_r}{Z_L \frac{dA_L}{dZ_L} + A_L} \tag{8}$$

Donde:

- Q_r: Caudal afluente del estero Nilahue (m^3/s).
- Q_c: Caudal a través de la desembocadura (m^3/s; positivo al ingresar a la laguna).
- A_L: Área superficial de la laguna en función de la cota Z_L (m^2).

Por su parte, la **conservación de la cantidad de movimiento** se rige por la Segunda Ley de Newton aplicada al volumen de control, tal como indica la Ecuación 9:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{v} dV + \int_{SC} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{F} \tag{9}$$

Definiendo ahora el canal de desembocadura como el volumen de control de interés, los términos adoptan la siguiente forma:

- El término temporal (local): $\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{v} dV = \rho L_c \frac{dQ_c}{dt}$.
- El término advectivo de momentum se asume nulo ($\int_{SC} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \approx 0$), dado que el canal se modela como unidimensional, con una velocidad promediada transversalmente y una geometría considerada prismática a lo largo de L_c.
- La sumatoria de fuerzas externas: ($\sum \vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_f$)

Dichas fuerzas externas se definen como:

- Fuerza de presión hidrostática entre el mar y la laguna: $\vec{F}_p = \rho g A_c (Z_m - Z_L)$:
- Fuerza resistiva por fricción del canal: $\vec{F}_f = -\rho C_d |Q_c| Q_c \frac{b_c L_c}{A_c^2}$

Sustituyendo estos términos en la ecuación general, considerando un flujo estrictamente unidimensional y dividiendo por ρL_c, se obtiene la ecuación diferencial ordinaria que gobierna la dinámica del caudal en la desembocadura (Ecuación 10):

$$\frac{dQ_c}{dt} = \underbrace{\frac{g A_c (Z_m - Z_L)}{L_c}}_{\text{Fuerza del gradiente de presión}} - \underbrace{\frac{C_d |Q_c| Q_c b_c}{A_c^2}}_{\text{Pérdida por fricción}} \tag{10}$$

Donde:

- Z_m: Nivel de la marea oceánica (m).
- Z_L: Nivel de agua en la laguna (m).
- L_c: Longitud longitudinal del canal de conexión (m).

- b_c: Ancho del canal (m).
- g: Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Geométricamente, el canal de conexión se aproxima como una sección transversal, donde el área mojada promedio de intercambio (A_c) se estima mediante la Ecuación 11. El parámetro resistivo se evalúa a través de un coeficiente de fricción de fondo (C_d) derivado empíricamente de la formulación de Manning (Chow, 1973), expresado en la Ecuación 12.

$$A_c = b_c \cdot \left(h_c + \frac{|Z_L - Z_m|}{2} \right) \tag{11}$$

$$C_d = g \cdot n^2 \cdot h_c^{-1/3} \tag{12}$$

Donde:

- A_c: Área mojada transversal media del canal (m^2).
- C_d: Coeficiente adimensional de fricción de fondo.
- h_c: Profundidad de referencia del canal (m).
- n: Coeficiente empírico de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$).

El modelo numérico considera una condición de contorno especial que altera estructuralmente el sistema de ecuaciones: el **estado de cierre de la barra**. Cuando el análisis morfológico dicta la desconexión hidrodinámica entre el océano y la laguna, el caudal de intercambio se restringe instantáneamente a cero (Ecuación 13). Bajo este escenario, la ecuación de cantidad de movimiento pierde validez física y el nivel de la laguna evoluciona obedeciendo exclusivamente al llenado provocado por el caudal del estero (Ecuación 14).

$$Q_c = 0 \quad \text{(Condición de barra cerrada)} \tag{13}$$

$$\frac{dZ_L}{dt} = \frac{Q_r}{Z_L \frac{dA_L}{dZ_L} + A_L} \tag{14}$$

En síntesis, la simulación hidrodinámica en condición de apertura se ejecuta resolviendo simultáneamente la Ecuación 8 y la Ecuación 10, conformando un sistema de dos ecuaciones diferenciales ordinarias para determinar las variables de estado Z_L y Q_c en cada instante de tiempo.

3.5.2. Método numérico

La solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) que gobierna la hidrodinámica del sistema se aproxima mediante el método explícito de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4). Este esquema iterativo es ampliamente utilizado por su excelente balance entre estabilidad numérica y costo computacional. Matemáticamente, el avance temporal del vector de estado se calcula mediante las Ecuaciones 15 a 19:

$$k_1 = f(t_n, y_n) \tag{15}$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + k_1 \frac{\Delta t}{2} \right) \tag{16}$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + k_2 \frac{\Delta t}{2}\right) \tag{17}$$

$$k_4 = f(t_n + \Delta t, y_n + k_3 \Delta t) \tag{18}$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \tag{19}$$

Donde:

- $f(t, y)$: Función no lineal que representa el sistema de EDOs acopladas (conservación de masa y cantidad de movimiento).
- y_n: Vector de estado en el paso temporal n, definido como $\vec{y} = [Z_L, Q_c]^T$.
- Δt: Paso de integración temporal discreto (s).
- k_1, k_2, k_3, k_4: Pendientes o incrementos estimados, evaluados en diferentes puntos del subintervalo temporal para maximizar la precisión del método.

3.6. Métricas de error

La validación cuantitativa de modelos hidrodinámicos en sistemas costeros exige una comparación estadística rigurosa entre las variables de estado simuladas (en este caso, el nivel de agua en la laguna) y las observaciones empíricas de terreno. Para cuantificar la bondad de ajuste de manera robusta e interpretable, este estudio emplea tres métricas estadísticas complementarias: el Error Absoluto Medio (MAE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Sesgo (Bias).

El **Error Absoluto Medio (MAE)** se define como el promedio aritmético de las magnitudes absolutas de los residuos, tal como indica la Ecuación 20:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |Z_{\text{sim},i} - Z_{\text{obs},i}| \tag{20}$$

Donde $Z_{\text{sim},i}$ y $Z_{\text{obs},i}$ corresponden a las cotas de nivel de agua simuladas y observadas en el instante i, respectivamente, y N representa el tamaño total de la muestra temporal pareada. El MAE expresa el error medio de predicción conservando las mismas unidades de la variable analizada (m), facilitando su interpretación física. Su principal ventaja radica en su robustez frente a valores atípicos (outliers), ya que el crecimiento de la penalización es estrictamente lineal.

Por otro lado, la **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)** es una métrica estándar en la evaluación de modelos morfodinámicos y costeros (Malhadas et al., 2009; Pardo-Pascual et al., 2012; Vos et al., 2019), definida mediante la Ecuación 21:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (Z_{\text{sim},i} - Z_{\text{obs},i})^2} \tag{21}$$

Al elevar los residuos al cuadrado antes de promediarlos, el RMSE asigna un peso desproporcionadamente mayor a los errores de gran magnitud. Esta característica la convierte en un indicador altamente sensible para detectar episodios donde el modelo presenta desviaciones críticas. El análisis comparativo entre el RMSE y el MAE permite diagnosticar la varianza de los errores: si el RMSE

es sustancialmente mayor que el MAE, se infiere la presencia de discrepancias puntuales severas en la simulación.

Finalmente, el **Sesgo (Bias)** o error medio, cuantifica la tendencia sistemática del modelo predictivo a sobreestimar o subestimar la variable de interés (Ecuación 22):

$$\text{Bias} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Z_{\text{sim},i} - Z_{\text{obs},i}) \tag{22}$$

Un sesgo de signo positivo revela que el modelo tiende a predecir niveles de agua sistemáticamente más altos que los registrados instrumentalmente, mientras que un valor negativo acusa una subestimación crónica. En un modelo calibrado de manera óptima, el sesgo debe aproximarse a cero.

En conjunto, la triada estadística MAE-RMSE-Bias proporciona una radiografía integral del desempeño numérico: el MAE establece la magnitud del error típico, el RMSE alerta sobre la severidad de los errores extremos, y el Sesgo direcciona las posibles correcciones paramétricas ante desviaciones sistemáticas del balance hídrico.

4. Metodología

La metodología propuesta se estructura en tres etapas secuenciales que integran técnicas de procesamiento digital de imágenes, modelación hidrodinámica y análisis estadístico para caracterizar la dinámica morfológica de la desembocadura de la laguna Cáhuil y evaluar su influencia en el régimen de niveles. En primer lugar, se procesan 4978 imágenes costeras mediante algoritmos de segmentación y extracción de perímetros, obteniendo series temporales del estado de apertura y ancho del canal. A continuación, estos resultados se incorporan como condición de borde variable en un modelo hidrodinámico simplificado de la laguna, que resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum con forzantes de marea y caudal fluvial. Finalmente, se validan las simulaciones con datos observados y se analiza la capacidad predictiva del modelo modificado respecto al caso de geometría fija, estableciendo la base para recomendaciones en gestión costera.

4.1. Etapas de la Investigación

La implementación metodológica de esta investigación se organiza en tres etapas secuenciales, cada una compuesta por dos fases operativas específicas. Este diseño garantiza una progresión lógica desde la caracterización morfológica hasta la validación predictiva y transferencia aplicada del conocimiento.

Etapa 1: Caracterización Morfológica de la Desembocadura

Fase 1: *Exploración.* Revisión de literatura especializada en dinámica morfosedimentaria de desembocaduras, técnicas de fotografía costera y análisis de series temporales para la definición de protocolos de procesamiento digital de imágenes.

Fase 2: *Fase Descriptiva.* Análisis cuantitativo de la base de imágenes diarias mediante algoritmos de procesamiento digital para la extracción automatizada de la serie temporal de la morfología en la desembocadura.

Etapa 2: Implementación y Validación Predictiva del Modelo Modificado

Fase 3: *Integración al Modelo.* Análisis de ecuaciones gobernantes en la evolución temporal del canal e incorporación al modelo hidrodinámico simplificado.

Fase 4: *Validación Empírica.* Estabilidad numérica debida al paso de tiempo y validación estadística mediante datos hidrológicos meididos en terreno de altura de agua en la laguna Cáhuil.

Etapa 3: Análisis comparativo y Aplicación

Fase 5: *Analítica.* Análisis comparativo de resultados del modelo existente versus el modificado con métricas estadísticas.

Fase 6: *Aplicaciones Prácticas.* Elaboración de recomendaciones basadas en evidencia para la gestión del riesgo costero y propuesta de lineamientos para futuros desarrollos en modelación morfodinámica de desembocaduras.

4.2. Técnicas e Instrumentos

- **Técnicas de recolección de datos:** Revisión documental especializada, análisis de imágenes en cámaras de video, recopilación de datos hidrológicos de la zona (mareas, niveles de agua, caudales) y topo-batimetría lagunar.
- **Instrumentos:** Código (Python y MatLab) para procesamiento de imágenes y para modelación hidrodinámica mediante análisis numérico. Repositorios climáticos e hidrológicos de la DGA para las series temporales de caudales, y bases de datos de niveles de agua lagunar dadas por GEF Humedales.
- **Técnicas de análisis de datos:** Estadística descriptiva, análisis de series temporales y validación comparativa entre predicciones modeladas y datos observados en terreno.

4.3. Procesamiento de Imágenes

4.3.1. Base de datos imágenes

La fuente principal de información morfológica corresponde a imágenes costeras adquiridas en el marco del proyecto SIMONA COSTA. El conjunto de datos abarca un período desde el 27 de abril de 2023 hasta la fecha (Marzo de 2026), con una frecuencia horaria que cubre once instantes diarios entre las 08:00 y las 18:00 horas. Cada imagen se almacena en formato TIFF, con una resolución espacial de 570×1000 píxeles en el espacio de color RGB (Figura 5). Esta base de datos constituye el insumo fundamental para la caracterización espacio-temporal de la dinámica en el canal de desembocadura.

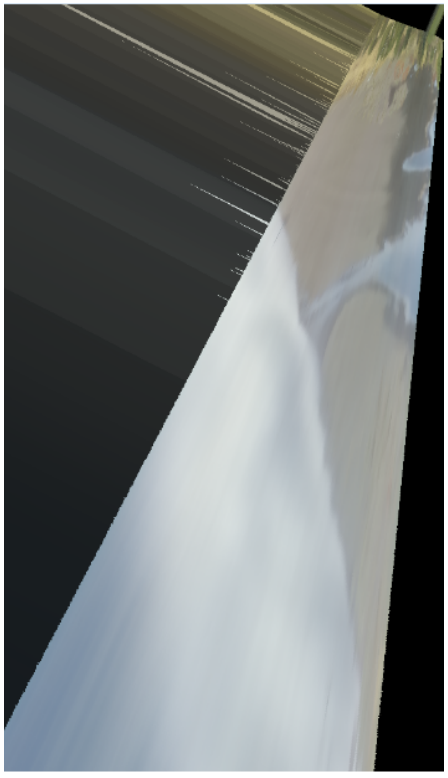


Figura 5: Ejemplo del formato de imagen original, día 2023-05-08 a las 13:00 hrs.

4.3.2. Segmentación de imágenes mediante K-Means

El objetivo de esta etapa es generar máscaras binarias que discriminen entre las zonas de agua y arena en la región de la desembocadura, empleando un enfoque de segmentación basado en el algoritmo de agrupamiento K-Means. La metodología se fundamenta en los principios de preprocesamiento y agrupamiento descritos por Chen et al. (2008) y Dhanachandra et al. (2015).

El procesamiento comienza con la lectura de la imagen en formato TIFF y la aplicación de una región de interés (ROI) poligonal (representada por el borde azul en la Figura 6). Esta ROI se define manualmente para acotar el análisis de forma exclusiva al área de la desembocadura, excluyendo elementos perturbadores como vegetación o zonas sin información (fondo negro). Para garantizar la homogeneidad en las condiciones de iluminación, las intensidades de la imagen se normalizan al rango $[0, 255]$. Posteriormente, se aplica un filtro de mediana de tamaño 5×5 para atenuar el ruido de tipo "sal y pimienta" (Dhanachandra et al., 2015). Adicionalmente, se realiza un ajuste de contraste mediante el estiramiento del histograma para realzar la diferenciación entre las zonas húmedas y secas, un paso especialmente útil en condiciones de baja iluminación o presencia de neblina.

Con el fin de explotar las propiedades perceptuales y discriminativas de los espacios de color, la imagen se transforma desde el espacio RGB original a los espacios HSV (tono, saturación, valor) y Lab (luminosidad y componentes oponentes). Esta doble transformación amplía el enfoque de Chen et al. (2008), quien utiliza únicamente HSV, permitiendo una separación más robusta: en el espacio HSV, el tono y la saturación discriminan eficazmente la arena seca (alta saturación) del agua (baja saturación), mientras que el espacio Lab proporciona una métrica de distancia perceptual uniforme.

Una característica distintiva de este algoritmo es la inicialización guiada de los centroides para el K-Means. Para ello, se seleccionan manualmente pequeñas regiones circulares fijas (con un radio de 20 píxeles) que son representativas de agua pura y arena pura, tal como se observa en la Figura 6. A partir de estas muestras, se extraen estadísticos locales (media y desviación estándar) en los espacios de color correspondientes (HSV para agua, Lab para arena). Utilizando estos estadísticos, se calcula la distancia de Mahalanobis normalizada desde cada píxel de la ROI hacia las características de las clases de referencia. Esto permite asignar una etiqueta preliminar y calcular los centroides iniciales como la media de los valores de los píxeles en cada clase. Este enfoque de inicialización mediante semillas es conceptualmente análogo al algoritmo de agrupamiento sustractivo propuesto por Dhanachandra et al. (2015), pero con la ventaja de utilizar información de referencia directa en lugar de un criterio de densidad.

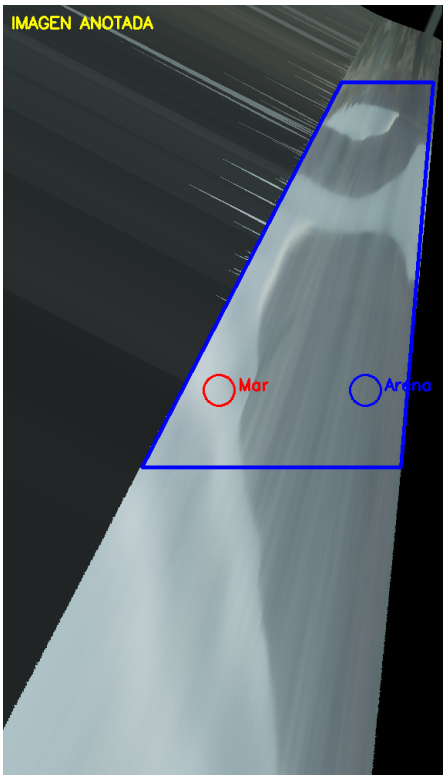


Figura 6: Región de interés (ROI) y puntos de referencia fijos para la extracción de firmas espectrales. Instante: 2024-07-10 08:00.

Con los centroides inicializados, se ejecuta el algoritmo K-Means ($k = 2$) sobre un vector de características de seis dimensiones, el cual concatena los valores normalizados de los espacios HSV y Lab. Dado que la inicialización es determinística, basta con realizar una sola ejecución con un límite máximo de 300 iteraciones. Una vez obtenidos los dos grupos, se asigna la etiqueta semántica correspondiente ("agua" o "arena") a cada clúster en función de su similitud con las características de las muestras de referencia originales.

La etapa final de la segmentación consiste en un riguroso postprocesamiento morfológico, fundamentado en los principios de la morfología matemática y, en particular, en las técnicas de reconstrucción morfológica descritas por Vincent (1993). Sobre las máscaras binarias iniciales se aplican las siguientes operaciones secuenciales:

1. Eliminación de objetos pequeños (área inferior a 300 píxeles) basada en reconstrucción morfológica (Vincent, 1993);

2. Relleno de huecos pequeños (área inferior a 300 píxeles), también fundamentado en reconstrucción (Vincent, 1993);

3. Suavizado de bordes mediante una apertura morfológica con un elemento estructurante tipo disco de radio 5, seguida de un cierre con un disco de radio 10;

4. Resolución de superposiciones, otorgando prioridad a la clase "agua" en caso de conflicto espacial;

5. Fusión de enclaves (islas de una clase completamente rodeadas por la otra) cuando su área es inferior a 7000 píxeles;

6. Garantía de cobertura completa de la ROI, asignando las áreas no clasificadas a la clase más cercana utilizando la distancia euclidiana.

Finalmente, los resultados (las máscaras binarias definitivas de agua y arena) se almacenan en un archivo NetCDF junto con metadatos esenciales, tales como las fechas y horas extraídas de los nombres de los archivos originales, la información de las correcciones aplicadas y los parámetros de procesamiento. Este formato estructurado facilita el análisis temporal posterior y se alinea con las buenas prácticas de almacenamiento de datos masivos en teledetección costera (Vos et al., 2019).

4.3.3. Generación de la grilla de muestreo

Para transformar las máscaras segmentadas en datos cuantitativos susceptibles de análisis espacial y temporal, se implementa un algoritmo de grillado sistemático sobre la región de interés (ROI). El procedimiento, inspirado en las técnicas de muestreo utilizadas en estudios de dinámica costera (Pardo-Pascual et al., 2012; Vos et al., 2019), convierte la información ráster en una serie de puntos de muestreo con coordenadas (x, y) que permiten un seguimiento preciso de la interfaz agua-arena.

Inicialmente, se define una grilla cartesiana regular dentro del rectángulo delimitador de la ROI, con un espaciado uniforme especificado por el usuario (en píxeles). Mediante algoritmos de contención espacial geométrica, se filtran los puntos de la grilla que quedan estrictamente dentro del polígono de la ROI, obteniendo así un conjunto de puntos de muestreo que cubren exclusivamente el área de interés, tal como se ilustra en la Figura 7. Esta grilla única se genera una sola vez y se aplica consistentemente a toda la serie temporal.

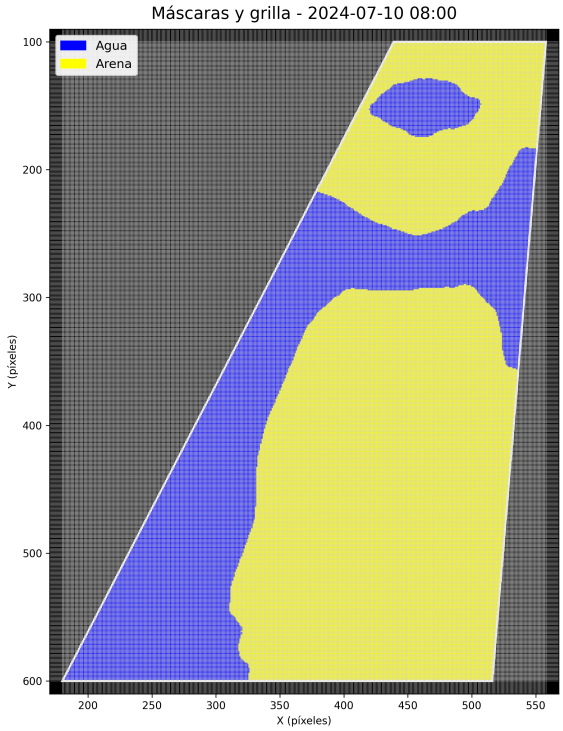


Figura 7: Ejemplo de grillado en la región de interés completa.

Para cada instante temporal, se cargan las máscaras binarias de agua y arena desde el archivo NetCDF generado en la etapa de segmentación. Las coordenadas de los puntos de la grilla se redondean a índices enteros para realizar un muestreo vectorizado sobre las máscaras, obteniendo simultáneamente los valores correspondientes a ambas clases en todos los puntos. Este proceso iterativo a lo largo del tiempo produce arreglos tridimensionales que contienen la historia completa de la ocupación de cada punto por agua o arena. Los resultados, junto con las coordenadas de los puntos de muestreo y metadatos temporales (fechas e indicadores de control de calidad), se consolidan en un nuevo archivo NetCDF. Esta estructura de datos, que sigue los lineamientos de Vos et al. (2019) para la organización eficiente de series temporales costeras, constituye la base para los análisis morfológicos posteriores, como la extracción del perímetro y el cálculo de parámetros geométricos del canal de la desembocadura.

4.3.4. Extracción del perímetro agua-arena

A partir de la grilla de muestreo y sus valores temporales, se desarrolla un algoritmo para extraer el perímetro que define la interfaz entre las zonas de agua y arena, con un grosor de exactamente un píxel. Este procedimiento se basa en operaciones de morfología matemática y tiene como objetivo aislar la línea de contacto entre los dos cuerpos, excluyendo los bordes artificiales de la ROI para obtener los contornos perimetrales reales en cada instante de tiempo.

El proceso comienza con la lectura del archivo que contiene la grilla de puntos y las series temporales de clasificación agua-arena. Se identifican los puntos que yacen en los bordes extremos de la ROI (mínimos y máximos de las coordenadas x e y), los cuales son excluidos del análisis para evitar que los límites artificiales de la región sean interpretados como parte del perímetro natural del canal.

Para cada instante temporal, los datos de la grilla se reconstruyen en una matriz bidimensional que refleja la disposición espacial original de los puntos. Esta reconstrucción es posible gracias a la naturaleza regular de la grilla y permite aplicar operaciones morfológicas bidimensionales. Utilizando una estructura de conectividad ortogonal (vecindad de 4), se aplica una dilatación binaria a los puntos correspondientes de la máscara de arena. El perímetro de la interfaz se obtiene entonces como la diferencia entre la máscara dilatada y la máscara original de arena:

$$\text{Perímetro} = \text{Dilatación}(\text{Arena}) - \text{Arena}$$

Esta operación produce un contorno de un píxel de ancho que representa el límite físico entre el agua y la arena, evidenciado en color rojo.

Una vez detectado el perímetro, los puntos que lo constituyen se traducen de vuelta al formato vectorial unidimensional. En esta conversión, se aplica simultáneamente el filtro de exclusión, eliminando cualquier punto del perímetro que coincida con los bordes artificiales previamente identificados. Finalmente, para optimizar el almacenamiento, se extraen solo aquellos puntos que forman parte del perímetro en al menos un instante temporal, reduciendo la dimensionalidad de los datos entre un 90 % y un 95 %. El conjunto de datos resultante se almacena conservando exclusivamente las coordenadas de los puntos perimetrales para cada tiempo. Este producto es el insumo fundamental para los análisis de conectividad y morfología del canal.

4.4. Detección Morfológica de la Desembocadura

Para caracterizar morfológicamente la desembocadura, se desarrolla un método que integra dos componentes fundamentales: el estado de apertura del canal y la dimensión de su anchura. Se implementa un algoritmo de detección automática de curvas perimetrales a partir de los contornos agua-arena previamente extraídos. Estas curvas, candidatas a representar los límites reales del canal, son jerarquizadas mediante criterios geométricos y de conectividad para identificar únicamente aquellas que corresponden a los márgenes superior e inferior de la desembocadura. Una vez seleccionado este par de curvas, se calcula la zona de estrangulamiento como la mínima distancia euclidiana entre ambos contornos, lo que define el ancho instantáneo del canal. Este enfoque permite caracterizar integralmente la dinámica morfológica, vinculando la apertura y cierre con la evolución temporal de su anchura.

4.4.1. Estado de conexión

Para evaluar la dinámica de apertura y cierre, se implementa un algoritmo que analiza automáticamente los perímetros agua-arena y determina si existe una conexión hidráulica continua entre la laguna y el mar en cada instante temporal.

El algoritmo toma como entrada los puntos del perímetro para toda la serie temporal. Sobre estos puntos, se aplica inicialmente un filtro para seleccionar aquellos que se encuentran a una distancia predefinida de la ROI poligonal. Los puntos filtrados se agrupan mediante el algoritmo de agrupamiento espacial basado en densidad (DBSCAN, utilizando un umbral ϵ de 15 píxeles), lo que permite identificar regiones de alta concentración de puntos perimetrales sin requerir un número predeterminado de clústeres. Estas zonas, que además cumplen con la tolerancia de distancia a la ROI, representan los extremos de cada curva perimetral.

En cada zona identificada, se selecciona el punto más cercano al límite de la ROI como origen. A partir de este, se ejecuta un algoritmo iterativo del vecino más cercano que recorre la curva perimetral en ambas direcciones, empleando un umbral máximo de distancia para garantizar la continuidad

espacial. Este procedimiento iterativo genera las curvas perimetrales candidatas a conformar los bordes reales del canal.

La validación de estas curvas se fundamenta en tres criterios geométricos y topológicos simultáneos:

1. **Convergencia de trayectorias**: Las curvas iniciadas desde extremos opuestos deben compartir puntos intermedios, indicando que forman un contorno continuo.

2. **Conectividad espacial**: Las curvas deben conectar dos zonas extremas distintas de la región de análisis.

3. **Intersección de control**: Las curvas deben cruzar una línea vertical de referencia predefinida ($X = X_{\text{límite}}$), asegurando que el canal se extiende efectivamente desde el cuerpo lacustre hasta el medio marino.

Se considera que el canal se encuentra en estado **abierto** si al menos dos curvas cumplen simultáneamente con los tres criterios descritos. En caso contrario, el estado se clasifica como **cerrado**. Para los instantes de apertura, se conservan únicamente las dos curvas de mayor longitud que satisfacen las condiciones, representando los límites superior e inferior de la desembocadura. Los resultados consolidados permiten generar reportes estadísticos temporales sobre la conectividad del sistema.

4.4.2. Ancho de la desembocadura

Una vez identificados los márgenes para los instantes de apertura, se procede a calcular el ancho de la desembocadura mediante la mínima distancia entre ambos vectores espaciales.

Para cada instante de conexión, el algoritmo extrae las coordenadas de los límites superior e inferior y, mediante operaciones vectorizadas, calcula una matriz de distancias euclidianas exhaustiva entre todos los pares de puntos de ambos márgenes. El ancho instantáneo de la desembocadura se define como el valor mínimo de esta matriz, localizando la zona de máximo estrangulamiento del canal. Para expresar esta métrica en unidades métricas convencionales, se aplica un factor de conversión basado en la resolución espacial de la imagen fotográfica (0.6 metros por píxel).

Posteriormente, se aplica un protocolo de filtrado para corregir valores anómalos derivados de condiciones ambientales adversas (neblina, sombras) o perturbaciones algorítmicas, el cual opera en dos fases:

- **Filtro de falsas aperturas:** Se identifican eventos clasificados como abiertos con un ancho superior a 40 metros, pero que se encuentran temporalmente aislados (precedidos y sucedidos inmediatamente por estados de cierre). Estos eventos se reclasifican como cerrados (ancho nulo).

- **Suavizado de extremos temporales:** Para los instantes abiertos restantes, se evalúa la variabilidad local. Si la diferencia absoluta entre el ancho en un instante t y el promedio de una ventana móvil ($t-1$, t, $t+1$) supera los 40 metros, el valor atípico se reemplaza mediante interpolación lineal de los instantes adyacentes.

Todas las correcciones aplicadas se registran en una bitácora detallada para garantizar la trazabilidad metodológica. La serie temporal depurada de anchos constituye la base definitiva para la posterior modelación y evaluación estadística.

4.4.3. Estimación de parámetros geométricos constantes (L_c y h_c)

Para el desarrollo del modelo hidrodinámico acoplado a esta investigación, se requiere la estimación simplificada de dos parámetros geométricos asumidos como constantes: la longitud (L_c) y la profundidad (h_c) del canal de la desembocadura.

La longitud del canal (L_c) se estima calculando la distancia lineal entre los extremos del canal sobre un subconjunto representativo de imágenes de la desembocadura, obteniendo un valor medio y su respectiva desviación estándar.

Por su parte, la profundidad (h_c) se determina relacionando los períodos de apertura detectados con los registros de amplitud de marea observados durante dichos intervalos de conexión física. El cálculo consiste en obtener la máxima variación de marea para cada evento de apertura y, posteriormente, promediar estos valores a escala mensual para establecer una profundidad representativa. Esta aproximación permite definir condiciones de borde realistas para las simulaciones numéricas durante los períodos de estudio estipulados.

4.5. Forzantes Hidrodinámicas

4.5.1. Estimación de marea en Cáhuil

Las series temporales de marea se obtienen a partir de estaciones de monitoreo disponibles, extraídas de Flanders Marine Institute (VLIZ) y Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) (2023), abarcando la totalidad del periodo de análisis fotográfico. Dado que los registros originales se presentan en cotas absolutas, estos se referencian al nivel medio del mar (NMM). Para ello, se calcula una media móvil semanal (considerando un margen de media semana anterior y posterior al día de análisis) y se sustrae este valor medio a cada dato de la serie.

Debido a la ausencia de un mareógrafo *in situ* en la localidad de Cáhuil, la marea local se estima mediante un método de interpolación espacial basado en la ponderación inversa de la distancia (IDW, por sus siglas en inglés) utilizando los registros de las estaciones más cercanas. El procedimiento se estructura de la siguiente manera:

1. **Método IDW aplicado a las estaciones disponibles:**

   Se plantea la estimación de marea en la zona de estudio mediante una combinación ponderada de las estaciones cercanas que cuentan con datos disponibles:

   - **Estimación en Cáhuil**: Combinación entre las estaciones de Boyeruca (23.25 km) y San Antonio (106.71 km).
   - **Validación cruzada con Boyeruca**: Combinación entre las estaciones de San Antonio (129.43 km) y Constitución (82.74 km).

   Las distancias geodésicas (en kilómetros) entre estaciones se calcularon utilizando la fórmula de Haversine (Sinnott, 1984), la cual considera la curvatura terrestre para determinar separaciones precisas entre coordenadas geográficas.

2. **Validación del método:**

   La precisión del método se verificó comparando métricamente los valores estimados con los datos observados directamente en la estación de Boyeruca, lo que demostró la efectividad de la aproximación espacial implementada.

4.5.2. Análisis armónico de marea

La serie temporal de altura de marea estimada para la localidad de Cáhuil, la cual posee una resolución temporal de 10 minutos y abarca desde el 5 de mayo de 2023 hasta el 31 de julio de 2024, se somete a un riguroso análisis armónico. Este procedimiento se ejecuta mediante algoritmos estandarizados basados en mínimos cuadrados, los cuales determinan las frecuencias, amplitudes y fases de los componentes astronómicos principales.

A partir de los coeficientes obtenidos, se calcula el Nivel de Reducción de Sondajes (NRS) siguiendo el criterio establecido por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA):

$$\mathrm{NRS} = \eta_0 - (O_1 + K_1 + M_2 + S_2 + N_2) \tag{23}$$

donde η_0 es el nivel medio de la serie y los términos restantes corresponden a las amplitudes de los principales constituyentes astronómicos diurnos y semidiurnos. Este parámetro permite referenciar las alturas de marea a un plano de reducción consistente con la cartografía náutica y, de manera recíproca, trasladar las mediciones de terreno (tales como el nivel de agua en la laguna de Cáhuil) al NMM.

Finalmente, utilizando los componentes armónicos resueltos, se reconstruye una serie sintética de marea astronómica para un período extendido (dos años a partir del 1 de enero de 2023) con un paso temporal de 5 minutos. Esta serie continua constituye la condición de borde oceánica para el modelo hidrodinámico lagunar.

4.5.3. Caudal fluvial

La serie temporal de descargas fluviales del estero Nilahue, registrada en la estación fluviométrica Santa Teresa de la Dirección General de Aguas (DGA) con una frecuencia de 30 minutos, constituye la condición de borde continental del modelo hidrodinámico. Dado que la integración numérica de la laguna requiere un paso temporal más fino (como se detalla en la Sección 4.6.2), los datos de caudal se someten a una interpolación lineal temporal. Este procedimiento permite generar un valor instantáneo $Q_r(t)$ para cada iteración del modelo, preservando la tendencia local del hidrograma sin introducir oscilaciones espurias ni alterar el balance de masa total.

El caudal interpolado se incorpora al modelo como un término fuente en la ecuación de conservación de masa del cuerpo de agua (Ecuación 8). Se asume que el aporte fluvial se distribuye de manera instantánea y uniforme en todo el dominio lagunar. Esta simplificación es físicamente razonable dado el carácter somero y el alto grado de mezcla que caracteriza a la laguna de Cáhuil. Bajo esta premisa, se omite la resolución de patrones de circulación internos (como los inducidos por el *jet* de entrada y los fenómenos de distribución longitudinal), cuyos efectos se consideran de segundo orden frente a las variaciones del nivel medio y los flujos de intercambio con el océano a escala horaria. En consecuencia, durante cada paso de tiempo, el caudal $Q_r(t)$ rige directamente la tasa de cambio volumétrico del sistema a través de la derivada temporal del nivel en la ecuación gobernante.

4.6. Simulación Numérica del Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado

Para evaluar el comportamiento hidrodinámico del sistema bajo distintas condiciones morfológicas, la metodología contempla la ejecución de cuatro escenarios de simulación principales: un primer escenario asumiendo ancho de desembocadura constante y simulado en todo el tiempo de simulación

(simulación 1a). El segundo también con ancho constante pero simulado solo en los intervalos donde se tienen datos de anchos variable, para hacerlo equivalente en la cuatificación de error con el ancho variable (simulación 1b). El tercer escenario con ancho variable y simulado en solo en los intervalos (simulación 2). Finalmente, el cuarto escenario también con ancho variable pero con caudal de río constante (por falta de datos DGA) en un tiempo donde se presenta estado de conexión mayoritariamente cerrada con el fin de observar el comportamiento de llenado en la laguna. Cabe mencionar que la variabilidad temporal del ancho es obtenida a partir del análisis fotográfico.

La implementación numérica del modelo se desarrolla integrando los datos de entrada procesados (topo-batimetría, caudal fluvial, series de marea y morfología variable de la desembocadura) para resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias gobernantes mediante un esquema explícito de Runge-Kutta de cuarto orden. A continuación, se describen las etapas del algoritmo, los métodos de interpolación empleados y la estructura computacional del modelo.

4.6.1. Procesamiento de datos de entrada

Topo-batimetría. A partir de los puntos con coordenadas (x, y, z) obtenidos en los levantamientos en terreno, se construyó una superficie continua utilizando el método de interpolación Kriging ordinario. Este método permite estimar la profundidad o elevación en zonas donde no hay mediciones directas, calculando una suma ponderada de los datos observados cercanos y buscando el menor margen de error posible:

$$\hat{Z}(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(x_i, y_i)$$

Los pesos λ_i de la ecuación se definen analizando matemáticamente la relación espacial entre las mediciones, otorgando mayor influencia a los puntos que están más cerca entre sí. El resultado final es un modelo digital de elevaciones (MDE) que representa fielmente la geometría de la laguna, el cual se puede observar en la Figura 8.

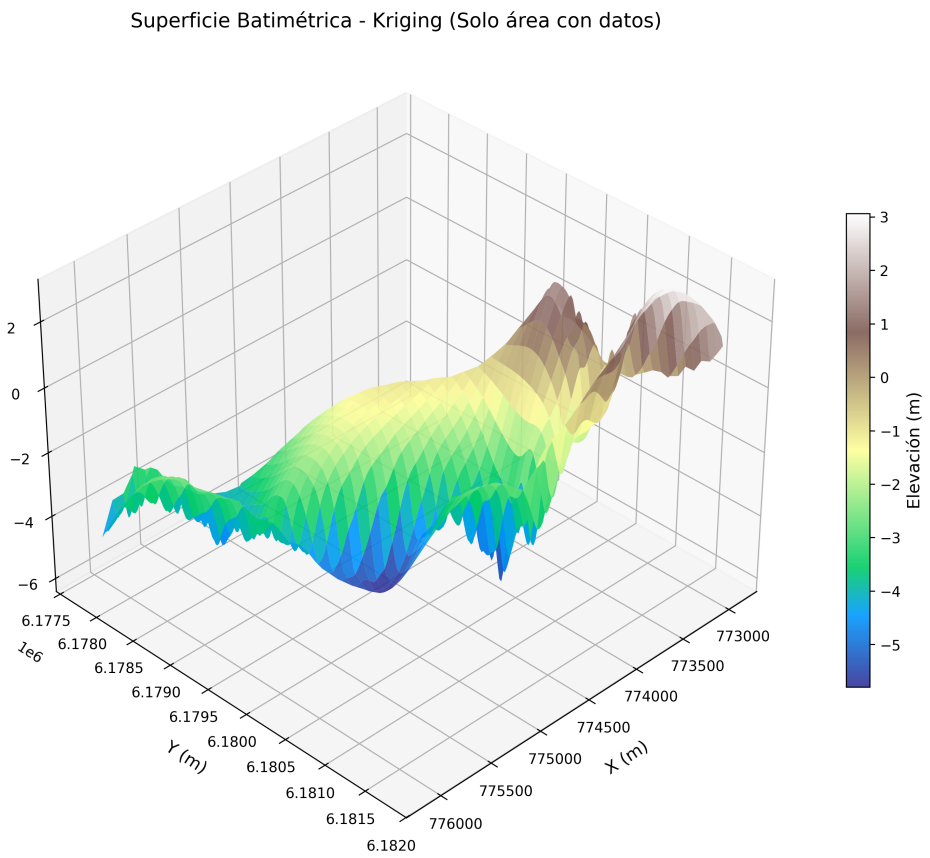


Figura 8: Mallado kriging resolución de 20 metros.

A partir de esta superficie tridimensional, se calculan relaciones hipsométricas fundamentales: el volumen $V_L(Z_L)$ y el área superficial inundada $A_L(Z_L)$ para cualquier cota de nivel de agua Z_L, así como la derivada del área superficial respecto a la cota $\frac{dA_L}{dZ_L}$. Estas relaciones se precalculan y almacenan para optimizar el rendimiento computacional durante la integración temporal.

Caudales del estero Nilahue. Los registros de descargas fluviales horarias (Q_r) se obtienen de la estación fluviométrica Santa Teresa, operada por la Dirección General de Aguas (DGA). Las series temporales mensuales se procesan, concatenan y almacenan en una base de datos estructurada. Posteriormente, estos registros se someten a una interpolación lineal para sincronizarlos con el paso de tiempo interno de la simulación numérica. Cabe destacar que la disponibilidad temporal de estos registros hidrológicos condiciona el horizonte de modelación, limitando las simulaciones continuas (para el presente estudio) a partir de julio de 2024.

Marea oceánica. Ante la ausencia de registros mareográficos *in situ*, la elevación de marea oceánica en la zona de estudio se estima mediante interpolación espacial por ponderación inversa a la distancia (IDW, Shepard (1968)) a partir de las estaciones costeras más cercanas, conforme a lo descrito en la Sección 3.4.1. La serie sintética resultante ($Z_m(t)$) es sometida a un análisis de componentes armónicos astronómicos (Codiga, 2011), detallado en la Sección 4.5.2. Este procedimiento permite reconstruir una señal de marea continua y puramente astronómica para los años 2023 y

2024, sobre la cual se interpola directamente para obtener la condición de borde oceánica en cada instante de integración del modelo.

Ancho de la desembocadura. La parametrización morfológica del canal, definida por su ancho superficial $b_c(t)$ y su estado binario de conexión (abierto/cerrado), se deriva del procesamiento de imágenes fotográficas detallado en la Sección 4.4. Para acoplar esta información discreta a la integración continua del modelo, se aplican las siguientes reglas de interpolación lógica en cada paso de tiempo t:

- **Ambos extremos temporales abiertos:** Se realiza una interpolación lineal del ancho b_c y el estado se mantiene como abierto.
- **Ambos extremos temporales cerrados:** Se impone un estado cerrado y se asigna un ancho mínimo residual de 0.01 m exclusivamente para garantizar la estabilidad numérica de las ecuaciones gobernantes.
- **Transición (un extremo abierto y otro cerrado):** El estado se fuerza a abierto para modelar el proceso transitorio. El ancho se interpola linealmente entre el valor observado de apertura y un valor umbral de 0.25 m (representativo del inicio fisiográfico del cierre).

Finalmente, como control de consistencia física y numérica, se aplica la siguiente restricción post-interpolación:

- Si el estado es cerrado: $b_c = 0.01$ m.
- Si el estado es abierto: $b_c = \text{máx}(b_c, 0.01)$ m.

Cabe destacar, que la incorporación de los anchos variables a la simulación numérica se realiza solo en los tiempos que haya presencia de análisis fotográfico para obtener el estado y magnitud de ancho reales, dejando inactivos los intervalos donde no se tiene información de anchos.

4.6.2. Configuración inicial de la simulación

La inicialización del modelo requiere la definición del horizonte de simulación (fecha de inicio y duración) y el paso de integración. Previo a la ejecución, algoritmos internos verifican la coherencia temporal y el solapamiento de todas las series de forzantes. Los parámetros físicos y numéricos invariantes adoptados para las simulaciones se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros fijos del modelo hidrodinámico.

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Aceleración de gravedad	g	9.81 m/s^2
Coeficiente de rugosidad de Manning	n	0.022
Caudal inicial en el canal ($t = 0$)	$Q_c(0)$	0 m^3/s
Paso de integración temporal	Δt	0.25 min

El paso de integración Δt fue calibrado empíricamente para satisfacer las condiciones de estabilidad numérica (criterio de Courant-Friedrichs-Lewy) del esquema de Runge-Kutta y garantizar

la convergencia de la solución en todo el dominio temporal. El coeficiente de rugosidad de Manning se asignó en base a literatura estándar (Chow, 1973) para canales excavados en tierra, rectos, uniformes y limpios tras exposición a la intemperie.

Por otro lado, los parámetros geométricos correspondientes a la profundidad (h_c) y longitud (L_c) del canal, así como la condición inicial del nivel lagunar ($Z_L(0)$), se determinan específicamente para cada escenario de simulación, ya que representan condiciones particulares del período analizado. Finalmente, la evolución temporal del ancho del canal (b_c) se prescribe dinámicamente según el escenario (constante o forzado por los datos fotográficos).

4.6.3. Estructura computacional

El modelo de simnulación numérica se estructura para los diferentes escenarios, donde cada código resuelve cada caso de forma independiente. La arquitectura se compone de los siguientes módulos funcionales:

- **Gestor de forzantes:** Rutinas encargadas de importar y sincronizar las series temporales (caudal fluvial, nivel oceánico y morfología de la boca). Implementa interpoladores lineales dinámicos que suministran los valores de $Q_r(t)$, $Z_m(t)$ y $b_c(t)$ en cualquier instante requerido por el solucionador numérico.
- **Módulo hipsométrico:** Algoritmos que, dado un nivel instantáneo de la laguna Z_L, consultan el MDE para determinar espacialmente el área inundada $A_L(Z_L)$ y el volumen acumulado $V_L(Z_L)$. La derivada $\frac{dA_L}{dZ_L}$ se aproxima mediante un esquema de diferencias finitas centrales finas.
- **Gestor morfológico de la desembocadura:** Controla la geometría del canal operando en dos modos:
  - *Modo estático:* Asigna un valor de ancho b_c constante y fuerza una condición de canal perpetuamente abierto.
  - *Modo dinámico:* Utiliza la serie temporal de anchos proveniente de la segmentación fotográfica y aplica las reglas de interpolación lógica y restricciones numéricas detalladas previamente para calcular $b_c(t)$.
- **Núcleo de resolución (Ecuaciones Gobernantes):** Función central que evalúa el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas. Recibe el vector de estado $\mathbf{y} = [Q_c, Z_L]^T$ y el tiempo t, y computa los gradientes $\frac{dQ_c}{dt}$ (ecuación de momentum en el canal) y $\frac{dZ_L}{dt}$ (ecuación de continuidad lagunar).
- **Integrador numérico:** Modelo que avanza paso a paso la solución temporal del vector de estado empleando el método de Runge-Kutta clásico de cuarto orden (RK4). En simulaciones de modo dinámico, el integrador detecta vacíos temporales (*gaps*) en las observaciones morfológicas y segmenta la integración en ventanas continuas, omitiendo la solución en los períodos sin información de contorno fiable.

4.6.4. Post-procesamiento y validación

Al finalizar la integración numérica, el modelo ejecuta rutinas de consolidación de datos para la evaluación hidrodinámica del sistema, generando los siguientes productos:

- **Base de datos estructurada:** Archivo consolidado que almacena, para cada paso de tiempo válido, las variables de estado (Q_c, Z_L), los forzantes interpolados (Z_m, Q_r), las propiedades geométricas instantáneas de la laguna $(V_L, A_L, \frac{dA_L}{dZ_L})$ y los parámetros morfológicos aplicados al canal (estado y b_c).
- **Paneles gráficos de series temporales:** Representaciones visuales multipanel que contrastan sincronizadamente:

  1. Elevaciones oceánicas y lagunares (Z_m vs. Z_L).
  2. Evolución del ancho operativo de la boca ($b_c(t)$).
  3. Flujos de intercambio a través de la desembocadura (Q_c).
  4. Área de la sección transversal efectiva del canal (A_c).
  5. Hidrograma de aportes fluviales (Q_r).
  6. Volumen almacenado en la laguna (V_L).

  En escenarios dinámicos, las series simuladas exhiben discontinuidades explícitas correspondientes a los períodos sin registro fotográfico, lo que previene la interpretación errónea de datos interpolados a gran escala.
- **Reporte analítico:** Documento que sintetiza los estadísticos descriptivos (extremos, tendencias centrales y dispersión) de los flujos e hidrodinámica lagunar. Incluye métricas específicas sobre la dinámica de la barrera, tales como la fracción temporal de apertura, facilitando la validación del modelo frente a observaciones históricas y el análisis del balance hídrico del sistema.

4.7. Validación del modelo numérico

La evaluación del desempeño del modelo hidrodinámico se realizó comparando los niveles de agua simulados con registros de terreno obtenidos mediante instrumentación *in situ* en la laguna de Cáhuil. Dado que la integración numérica entrega resultados con un paso temporal de 15 segundos, mientras que los sensores registraron datos cada 10 minutos, fue estrictamente necesario aplicar un protocolo de alineamiento temporal previo al cálculo de las métricas de error.

4.7.1. Ajuste de referencia vertical

Los datos observados del nivel de agua lagunar se encontraban originalmente referidos al Nivel de Reducción de Sondas (NRS), plano de referencia estandarizado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). En contraste, el modelo conceptual y numérico (incluyendo la batimetría, la forzante de marea y los niveles simulados resultantes) utiliza el Nivel Medio del Mar (NMM) como datum vertical. Para homogeneizar ambas series y permitir su comparación directa, se aplicó una corrección constante determinada mediante el análisis armónico previo:

$$Z_{L(\mathrm{NMM})}^{\mathrm{corr}} = Z_{L(\mathrm{NRS})}^{\mathrm{med}} - \mathrm{NRS}$$

donde el valor de NRS corresponde al desfase vertical entre ambos sistemas de referencia espacial, calculado previamente mediante la Ecuación 23. Esta traslación vertical se aplicó a la totalidad de

las observaciones de terreno antes de ejecutar cualquier contraste analítico con los resultados del modelo, siguiendo el esquema conceptual ilustrado en la Figura 9.

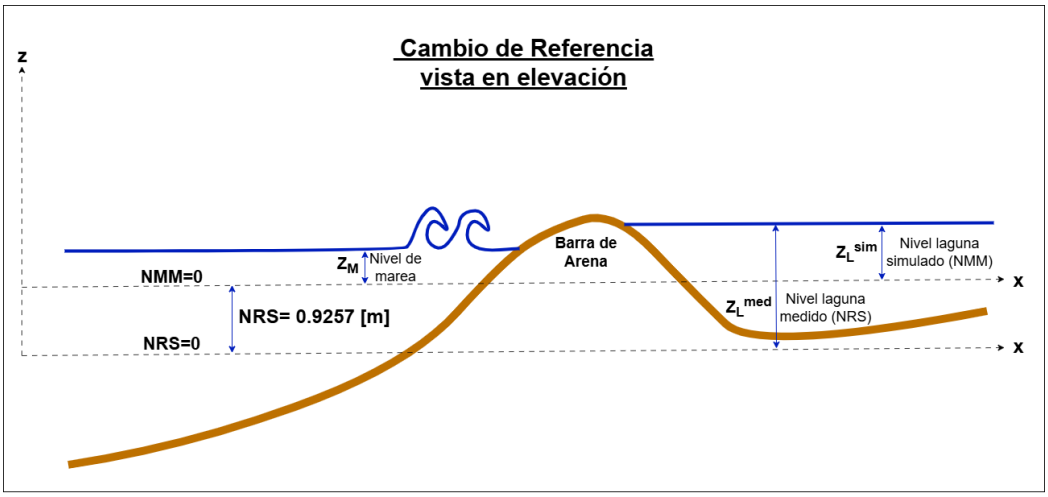


Figura 9: Esquema de cambio de referencia vertical de NRS a NMM.

4.7.2. Alineamiento temporal

Para subsanar la discrepancia entre las frecuencias de muestreo de las observaciones (cada 10 minutos) y la salida de la simulación (cada 15 segundos), se implementó un algoritmo de interpolación lineal sobre la serie temporal simulada. Este procedimiento generó valores numéricos sintéticos exactamente en los mismos instantes discretos en que se registraron las mediciones de terreno. La interpolación se restringió de manera estricta a los intervalos del dominio temporal que contaban con datos simulados continuos, evitando la extrapolación en períodos sin información y garantizando así una comparabilidad punto a punto libre de sesgos metodológicos.

4.7.3. Métricas de error

Una vez consolidados los pares de valores simultáneos (observado y simulado), se procedió al cálculo de tres métricas estadísticas estándar, ampliamente documentadas en la literatura para la validación de modelos hidrodinámicos y morfodinámicos costeros (Malhadas et al., 2009; Pardo-Pascual et al., 2012; Vos et al., 2019):

- **Error Absoluto Medio (MAE):** Representa la magnitud promedio de los residuales en valor absoluto, expresada en metros. Su interpretación lineal e insensibilidad relativa ante valores atípicos la convierten en un estimador robusto del error típico del modelo.
- **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):** Al elevar al cuadrado las diferencias antes de promediarlas, esta métrica penaliza de manera más severa las desviaciones de gran magnitud. Es un indicador crítico para evaluar el ajuste en eventos extremos (como pleamares máximas o aperturas súbitas) y es fundamental en estudios hidrodinámicos.
- **Sesgo (Bias):** Cuantifica la tendencia sistemática del modelo predictivo, indicando si existe una propensión general a sobreestimar (sesgo positivo) o subestimar (sesgo negativo) los niveles observados en la realidad.

Estas métricas se computaron exclusivamente sobre el subconjunto de puntos donde ambas series presentaron valores temporalmente alineados y espacialmente válidos. El tamaño de la muestra (N efectivo) se documenta junto a los resultados estadísticos para certificar la representatividad del análisis.

4.7.4. Visualización de resultados

Para complementar la evaluación cuantitativa con un diagnóstico cualitativo del ajuste, se diseñaron rutinas de graficación analítica enfocadas en dos escalas temporales de inspección:

- **Serie temporal completa:** Despliega simultáneamente los niveles medidos, los niveles simulados y la forzante de marea astronómica oceánica durante todo el período de intersección de datos. Se superponen marcadores específicos en los instantes en que el modelo establece el cierre morfológico de la desembocadura. Adicionalmente, se integra un panel informativo con el resumen de las métricas globales (MAE, RMSE y Sesgo).
- **Ventanas de alta resolución (4 días):** La serie global se segmenta sistemáticamente en intervalos consecutivos de 96 horas. Esta desagregación temporal permite examinar con alto nivel de detalle los gradientes de la curva de nivel lagunar, el desfase de fase en la propagación de la onda de marea y la respuesta hidrodinámica exacta ante los eventos de cierre o apertura de la barrera arenosa.

Los productos gráficos resultantes se exportan en formatos digitales de alta resolución, constituyendo el soporte visual para la discusión del grado de acuerdo entre la formulación numérica y la realidad física del sistema lagunar.

4.7.5. Consideraciones del período de validación

Para asegurar el rigor estadístico, el análisis comparativo se delimitó estrictamente a la intersección de los dominios temporales de las series observadas y simuladas. Esta ventana de análisis garantiza que la validación abarque un espectro representativo de estados hidrodinámicos, capturando las oscilaciones de los ciclos de sicigia y cuadratura, las variaciones transitorias del caudal fluvial y los procesos discontinuos de apertura y cierre de la desembocadura. La combinación de métricas de error globales y la inspección visual detallada proporciona una evaluación integral de la capacidad predictiva del modelo modificado sobre la dinámica de la laguna de Cáhuil.

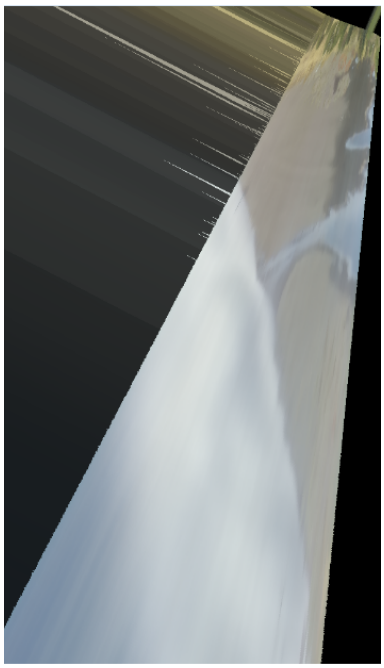
5. Resultados

Se detallan a continuación los resultados del procesamiento de imágenes, detección morfológica, la estimación de marea y simulaciones realizadas en la investigación.

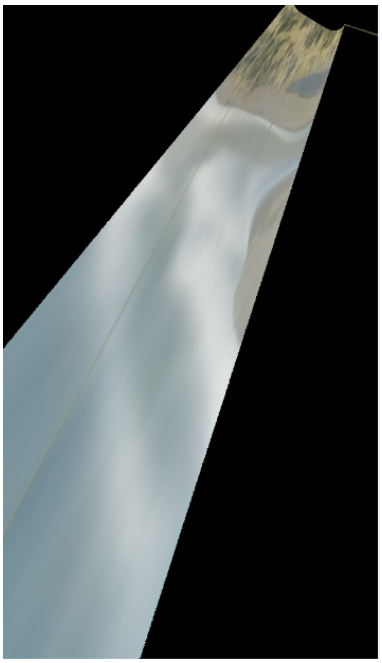
5.1. Procesamiento de Imágenes

A continuación se presentan los resultados del procesamiento de imágenes completo, desde la carga de imágenes individuales hasta la identificación de perímetros entre agua y arena en cada instante.

La base de datos completa es de aproximadamente 3 años continuados hasta la fecha (cerca de 10.000 imágenes y sumando) pero en esta investigación se procesaron 4978 imágenes, las cuales corresponden a la primera posición y dirección de cámara comprendido desde el 2023-04-27 hasta el 2024-07-30, la cual se identifica como ROI-1. Luego, del 2024-07-31 en adelante la dirección de la cámara y área de visión cambia, provocando que la ROI-1 ya no sirva y se deba modificar a una ROI-2. Este cambio provoca que los puntos de referencia también lo hagan, pero en muchas imágenes se pierde la locación de "arena pura" para el algoritmo de segmentación de clustering por k-means. Por lo cual se opta por trabajar solo con la ROI-1 por el momento. En la Figura 10 se puede ver el cambio en 2 instantes distintos.



(a) ROI-1: Instante 2023-05-08 13:00.



(b) ROI-2: Instante 2024-08-12 16:00.

Figura 10: Cambio en la posición de la cámara.

Cabe mencionar, que la cámara aún sigue vigente, entregando imágenes cada una hora entre las 08:00 a las 18:00 todos los días, con la posición y dirección de una posible ROI-2.

Por otro lado, el tiempo total de procesamiento para el grupo de algoritmos es de 6.12 horas, siendo 5.7 horas solo en la segmentación debido al criterio iterativo de cierre de enclaves menores

a 7000px rodeados completamente de otra clase, esto hace que las áreas de agua y arena sean más uniformes y sin huecos. Sin embargo, sin este criterio de cierre de enclaves la segmentación tomaría solo 33.2 minutos.

5.1.1. Segmentación imágenes

El algoritmo de segmentación analiza 4978 imágenes correspondiente a 1 año y 3 meses desde el 2023-04-27 hasta 2024-07-30 de las cuales 55 se catalogan como saturadas/oscuras. Esto quiere decir, que solo el 1.1 % de las imágenes procesadas no se pudo identificar 2 clusters distintos.

En la Figura 11 se muestra un ejemplo de dos días distintos con el resultado final.

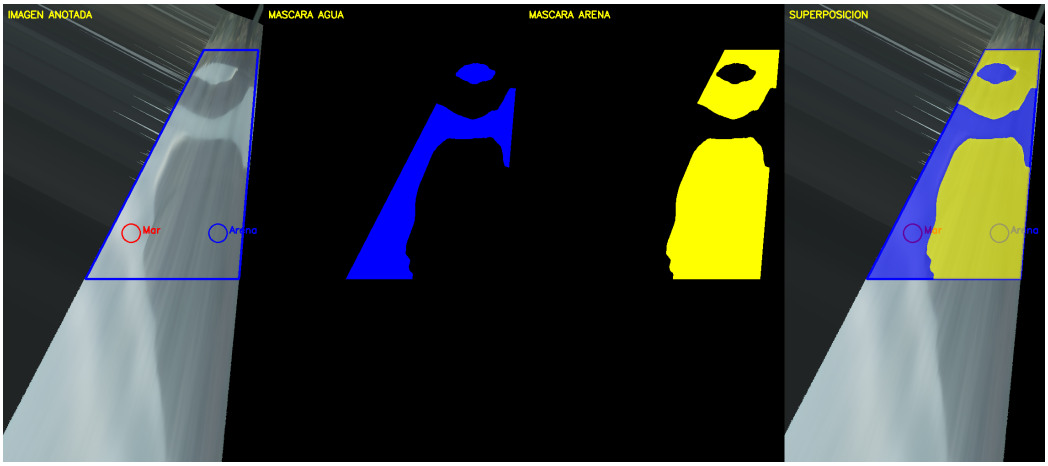


Figura 11: Resultado segmentación en un instante de ejemplo.

Se nota el uso de 2 puntos de referencia en ubicaciones fijas (circunferencia de color rojo para el agua y de color azul para arena), en donde se analiza en detalle la región de interés (ROI) por medio del cuadrilátero azul. Finalmente, el resultado se muestra en el área azul que representa agua, y el área amarilla representa arena. Donde estos determinan la forma 2D completa de la desembocadura, en este caso la Figura 11 muestra instantes de conexión abierta entre mar y laguna, lo cual es evaluado más adelante.

5.1.2. Evolución temporal del perímetro agua-arena

Luego de la segmentación y disposición en grilla, se detecta el perímetro entre agua y arena, donde los resultados se pueden apreciar en la Figura 12 para instantes cualquiera.

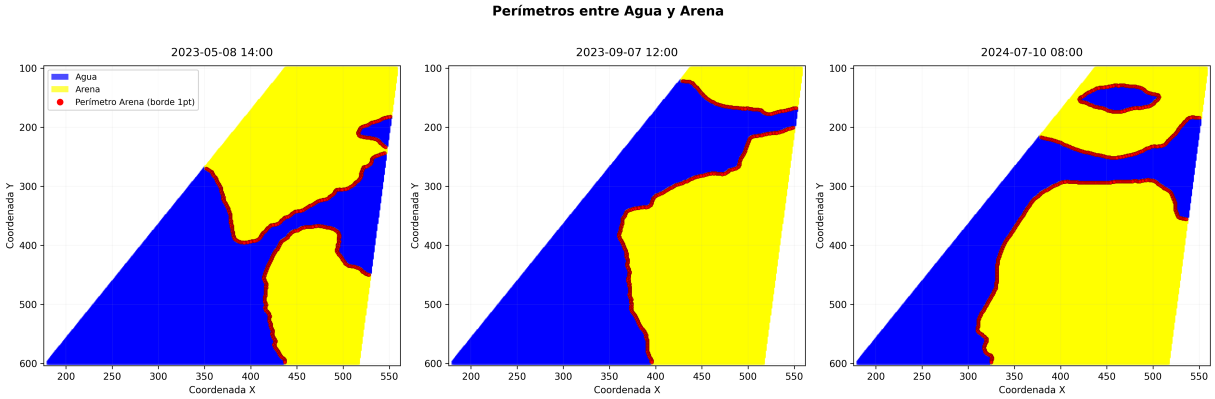
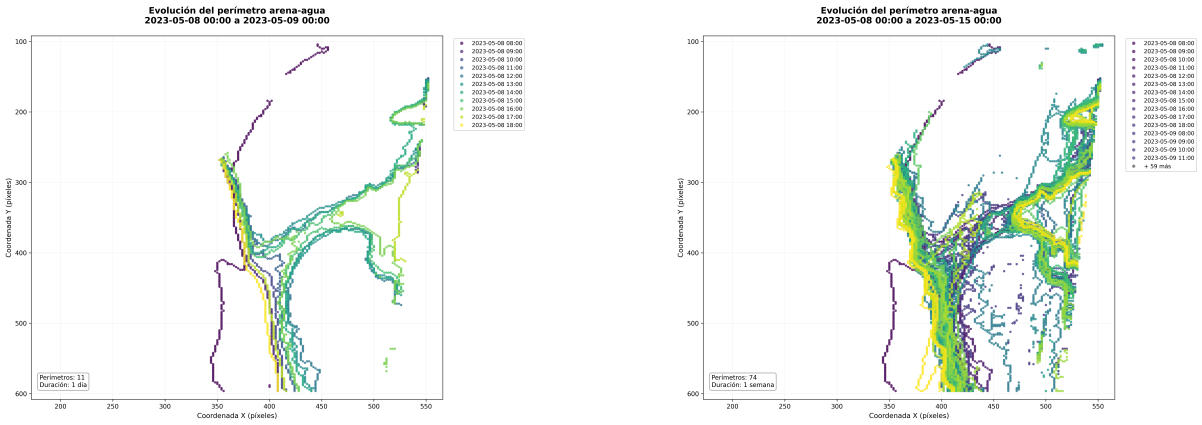


Figura 12: Perímetro detectado para 3 instantes distintos.

Se obtiene un contorno claro del perímetro entre agua y arena de espesor 1 punto grilla (coincidente con 1 pixel de espesor), donde se puede ver que existen instantes de apertura (imágenes de ambos costados) y de cierre (imagen del centro), donde la zona más contraída sería específicamente donde se ubica el canal de desembocadura limitado por la barra de arena. Cabe mencionar, que hay instantes en que el área de agua es confundido con el de arena o viceversa, pero esto no causa problemas al identificar el contorno/perímetro de unión, ya que es compartido por ambos grupos.

Para visualizar la evolución espacial de los perímetros a lo largo del tiempo, se presenta a continuación en la Figura 13, curvas de perímetro superpuestas para 1 día y 1 semana respectivamente, recordando que los datos obtenidos son cada 1 hora desde las 08:00 a las 18:00, es decir, 11 imágenes por día.



(a) Evolución durante 1 día.

(b) Evolución durante 1 semana.

Figura 13: Evolución temporal de la morfología en la desembocadura.

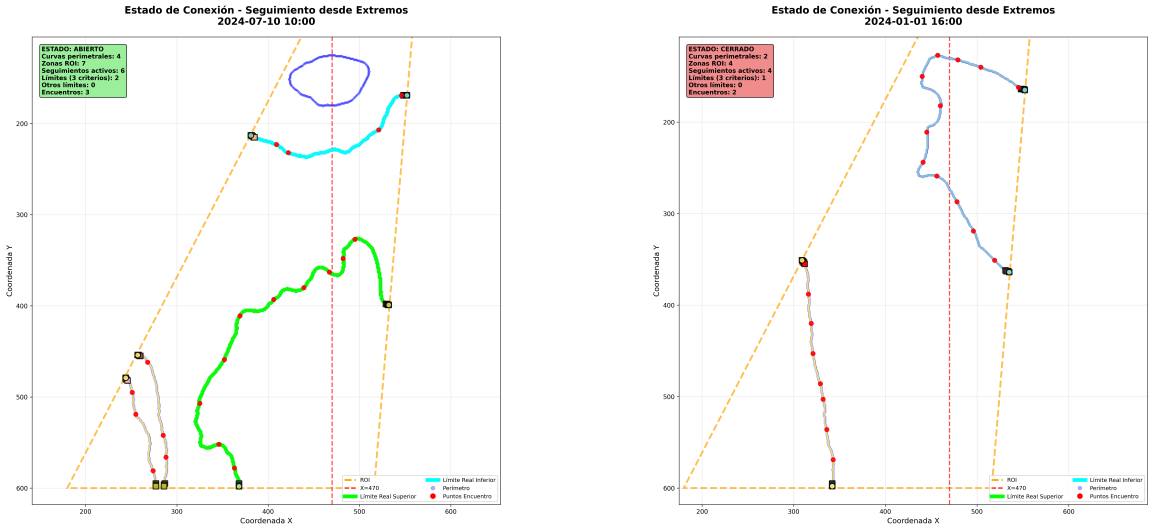
5.2. Morfología de la desembocadura

Para este apartado se muestran los resultados obtenidos desde la identificación de estado de conexión hasta el cálculo de ancho en cada instante que haya apertura efectiva del canal de desembocadura. Para esto, se toman los perímetros agua-arena anteriores y se corren los algoritmos correspondientes en cada caso.

5.2.1. Estado de conexión

En primera instancia, se identifica los límites reales que pertenecen al canal de desembocadura y su estado de conexión mediante el algoritmo de detección automática descrito en la Sección 4.4.1.

Por medio de la Figura 14 notamos lo que hace el algoritmo para detectar el estado de conexión.



(a) Instante con estado "Abierto".

(b) Instante con estado "Cerrado".

Figura 14: Estado de conexión canal desembocadura.

Para el caso abierto de la figura 14a se encuentran cuatro cuervas perimetrales (curva gris, verde, celeste y azul), de las cuales solo tres cumplen para hacer el seguimiento desde los extremos (curva gris, verde y celeste) y, finalmente, solo dos clasifican como límites cumpliendo los 3 criterios del método (curva verde y celeste). Nótese que si bien la curva gris tiene "dos" partes, esta se toma como una sola debido a la cercanía de sus extremos por la parte inferior (menor a un umbral dado en el algoritmo). Por otro lado, para el caso cerrado de la figura 14b existen 2 curvas perimetrales (curva gris y azul), de las cuales las dos cumplen para hacer seguimiento, pero luego solo una es la que cumple los tres criterios para ser límite real del canal de desembocadura, donde para que el estado sea "abierto" se necesitan mínimo dos curvas que lo cumplan.

Finalmente, se obtiene el análisis para la totalidad de instantes (4978) y se resume por mes en la Tabla 2.

Tabla 2: Estadísticas mensuales del estado de conexión.

Año-Mes	Total	Abiertos	% Abierto	Cerrados	% Cerrado
2023-04	44	0	0.0	44	100.0
2023-05	339	23	6.8	316	93.2
2023-06	328	24	7.3	304	92.7
2023-07	337	178	52.8	159	47.2
2023-08	350	263	75.1	87	24.9
2023-09	306	246	80.4	60	19.6
2023-10	341	175	51.3	166	48.7
2023-11	308	125	40.6	183	59.4
2023-12	321	101	31.5	220	68.5
2024-01	340	52	15.3	288	84.7
2024-02	314	115	36.6	199	63.4
2024-03	337	126	37.4	211	62.6
2024-04	318	144	45.3	174	54.7
2024-05	334	248	74.3	86	25.7
2024-06	330	188	57.0	142	43.0
2024-07	331	280	84.6	51	15.4
Total	**4978**	**2288**	**46.0 %**	**2690**	**54.0 %**

Cabe mencionar, que los 55 instantes saturado/oscuro de la segmentación anterior fueron clasificados como "Cerrado" en su estado de conexión.

5.2.2. Ancho desembocadura

En segunda instancia, luego de tener los límites reales y estado de conexión del canal de desembocadura, se calcula la zona de estrangulamiento como la mínima distancia entre ambos límites encontrados con el método. Este ancho se calcula para cada instante que esté "abierto", así, para visualizar de forma rápida la distribución a nivel global de los anchos calculados, se presenta por medio de la Figura 15 todos los instantes procesados.

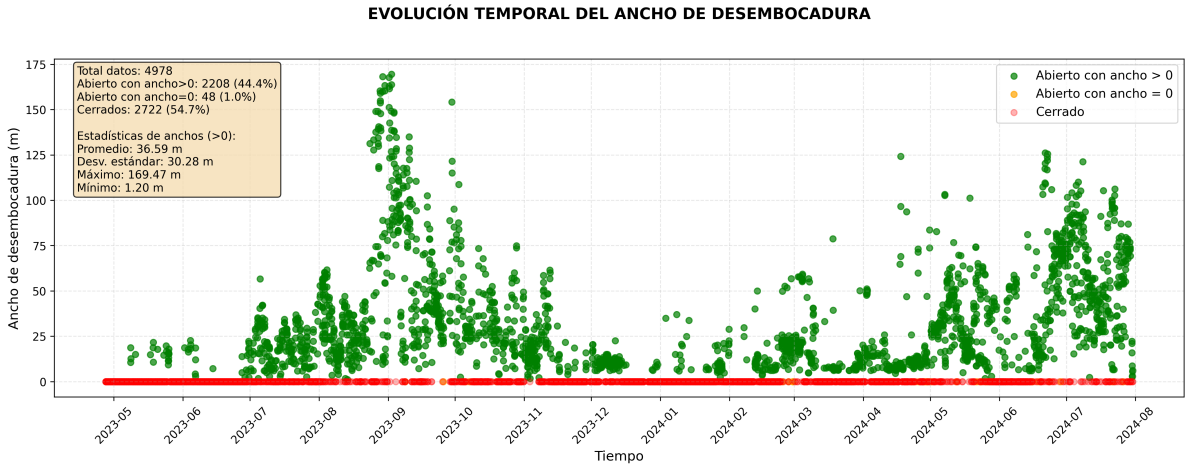


Figura 15: Resultado total de anchos calculados.

Por otro lado, mediante la Figura 16 se presentan los valores de anchos para el mes de Agosto a modo de ilustrar el detalle diario de los anchos.

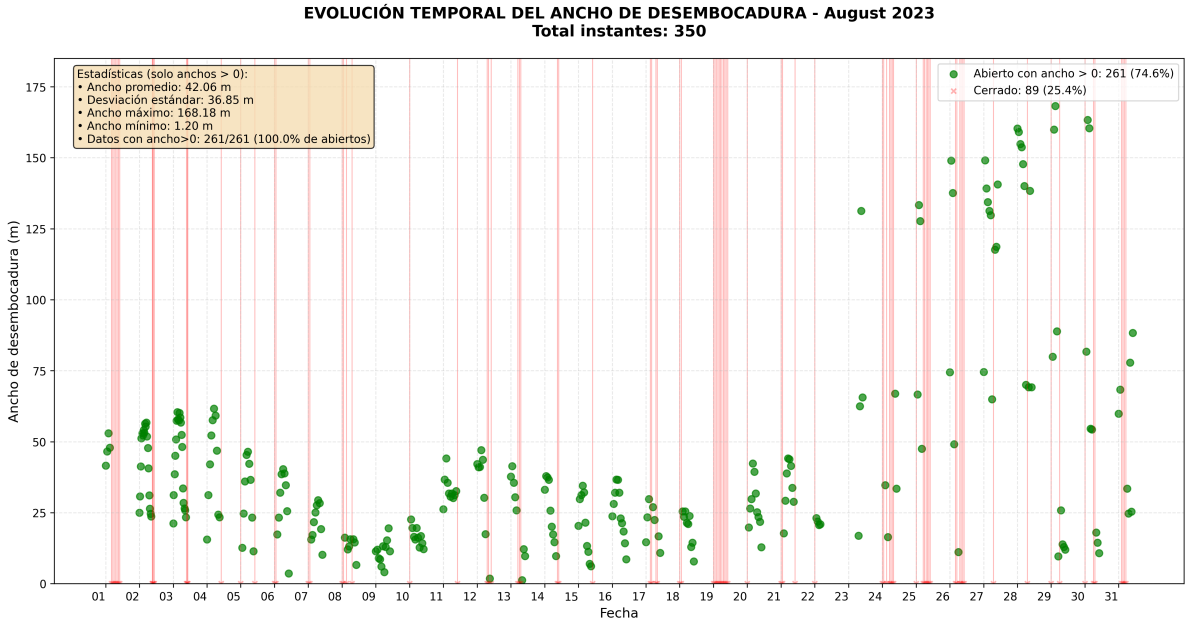


Figura 16: Resultado mensual de anchos calculados en Agosto 2023.

A continuación, se presentan los resultados resumidos por mes en la Tabla 3.

Tabla 3: Estadísticas mensuales de anchos de desembocadura.

Año-Mes	Total	Abiertos	Cerrados	Prom (m)	Std (m)	Max (m)	Min (m)
2023-04	44	0	44	0.00	0.00	0.00	0.00
2023-05	339	22	317	15.12	3.29	21.64	9.31
2023-06	328	24	304	13.25	6.85	22.64	2.40
2023-07	337	177	160	20.31	10.22	56.62	1.80
2023-08	350	261	89	42.06	36.85	168.18	1.20
2023-09	306	244	62	67.57	39.20	169.47	7.22
2023-10	341	174	167	34.82	18.27	108.66	2.47
2023-11	308	123	185	20.58	13.22	61.48	1.70
2023-12	321	95	226	10.95	3.05	22.55	6.04
2024-01	340	50	290	13.52	8.41	36.97	2.55
2024-02	314	110	204	17.62	10.35	56.75	3.60
2024-03	337	125	212	19.62	16.21	78.70	4.84
2024-04	318	141	177	19.59	20.82	124.22	4.57
2024-05	334	247	87	33.74	18.38	103.20	1.80
2024-06	330	186	144	48.78	29.40	126.18	6.03
2024-07	331	277	54	56.48	25.98	121.24	2.40
Total	**4978**	**2256**	**2722**	**36.59**	**22.27**	**169.47**	**0.00**

Cabe mencionar, que la variación en la cantidad de instantes abiertos o cerrados con respecto a

la Tabla 2 es debido a la "limpieza" de outliers en los resultados de anchos.

Para analizar la variación interanual contamos con 15 meses continuos donde solo 3 de ellos se repiten en 2023 y 2024. Lo cual se muestra la la Figura 17.

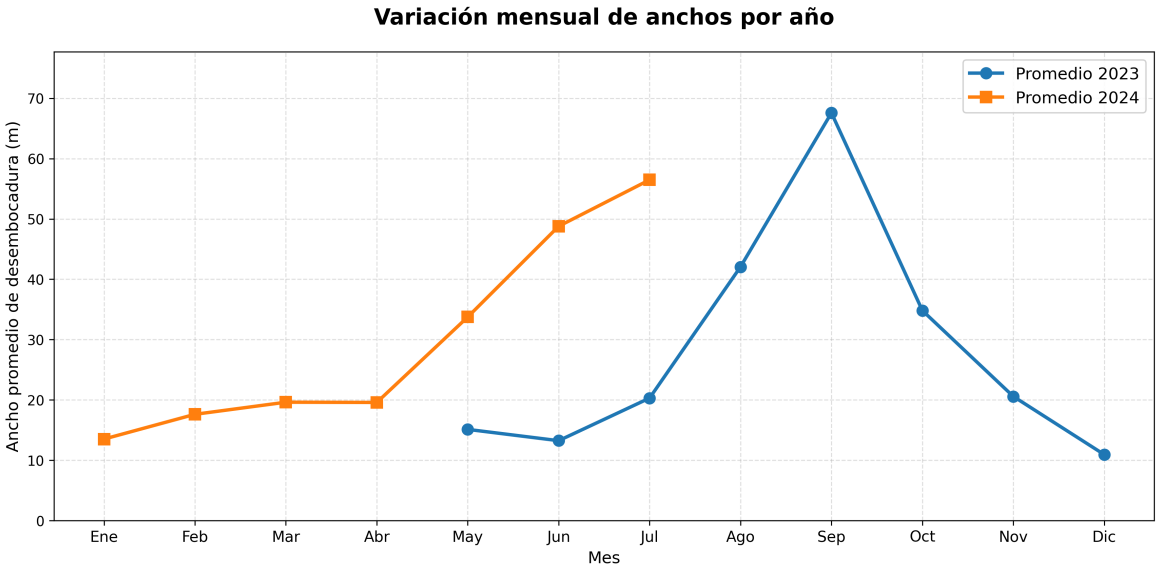


Figura 17: Vacriación mensual de anchos por año.

En la Figura 18 se presenta el rango intercuartílico calculado para cada mes de análisis.

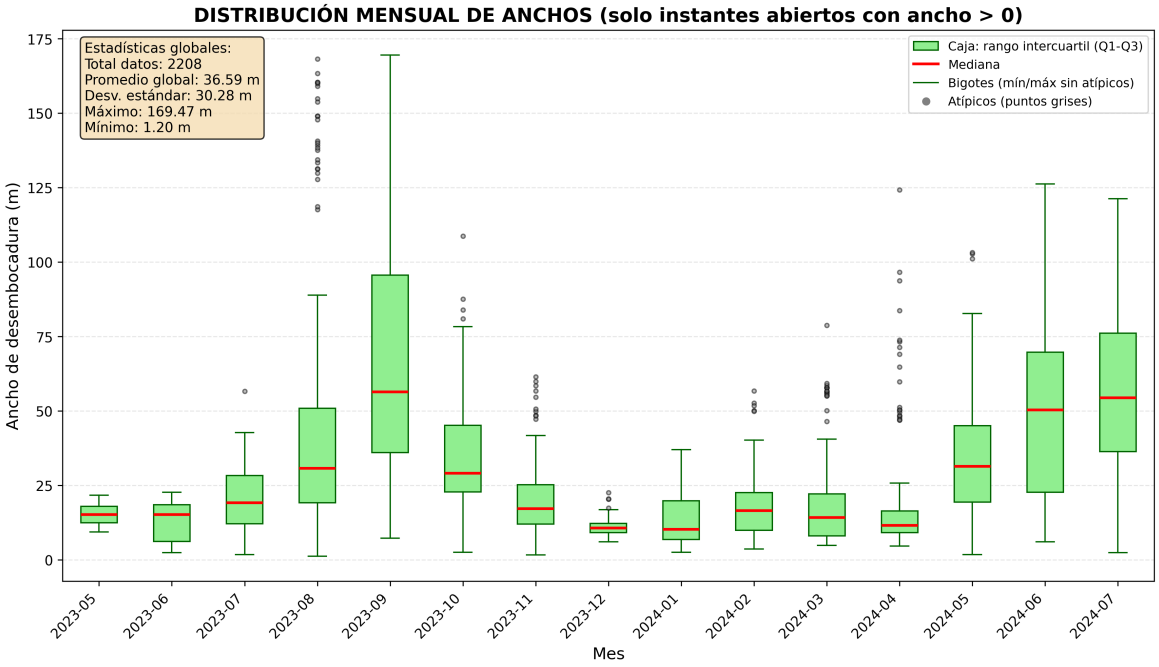


Figura 18: Rango intercuartílico de anchos calculados.

Por medio de la Figura 19 se muestra el rango intercuartil diario correspondiente al mes de

Agosto 2023 como ejemplo.

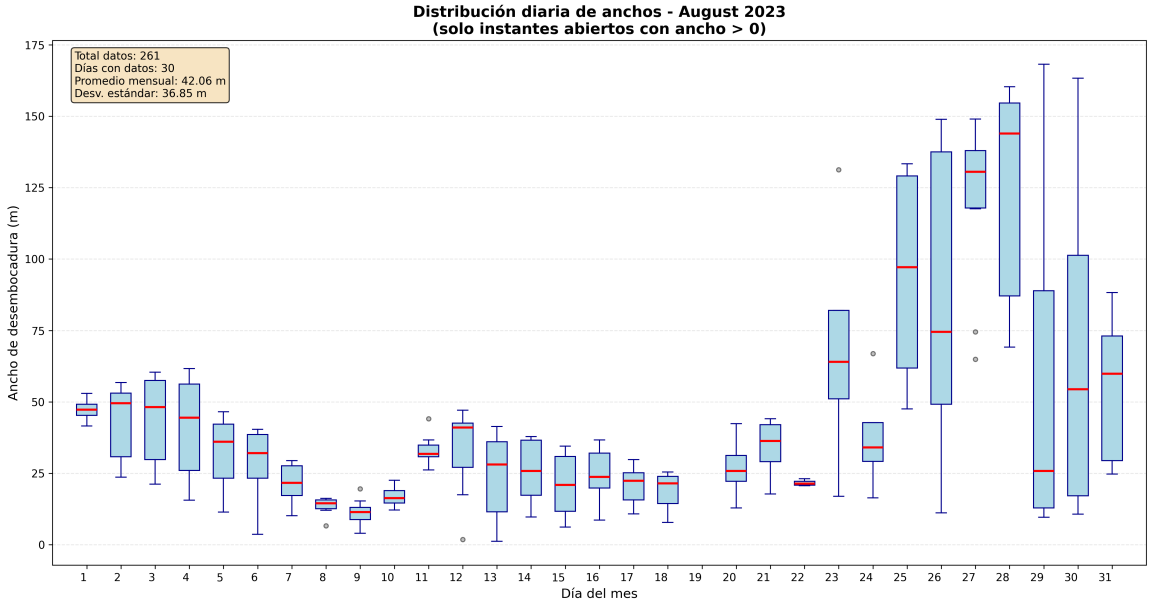


Figura 19: Rango intercuartílico de anchos Agosto 2023.

5.2.3. Profundidad y largo canal desembocadura

Para el cálculo estimado del largo de canal L_c se utiliza 4 instantes representativos, donde se desarrolla el canal completo y con facilidad de elegir puntos inicio y fin del mismo. Por medio de la Tabla 4 se presentan los resultados.

Tabla 4: Mediciones de largo del canal.

Archivo	Largo (m)
20230715-1000_MN-REC.tiff	93.59
20230827-1000_MN-REC.tiff	97.46
20240521-1100_MN-REC.tiff	100.82
20240710-1000_MN-REC.tiff	112.48
Promedio	101.09
Desviación estándar	8.15

En el caso de la profundidad del canal h_c, se estima en cada intervalo de apertura encontrado, los cuales fueron 409 y luego se calcula el promedio mensual y la duración de la apertura. Así, se obtuvieron los resultados de la Tabla 5, donde se estima por cada mes analizado.

Tabla 5: Resumen mensual de la amplitud promedio del canal (h_c) y duración de apertura total.

Mes	$\overline{h_c}$ (m)	Desv (m)	Max (m)	Min (m)	Suma dur (h)	Fecha max amp
2023-05	0.34	0.25	0.62	0.06	14.00	2023-05-08 12:00
2023-06	0.52	0.39	0.88	0.06	28.00	2023-06-06 12:00
2023-07	0.71	0.39	1.45	0.06	180.00	2023-07-06 09:00
2023-08	0.83	0.44	1.58	0.07	333.37	2023-08-03 08:00
2023-09	0.70	0.37	1.43	0.18	480.00	2023-09-02 08:00
2023-10	0.56	0.35	1.23	0.04	233.00	2023-10-27 09:00
2023-11	0.45	0.31	0.92	0.05	196.00	2023-11-01 08:00
2023-12	0.53	0.20	0.75	0.22	149.00	2023-12-04 14:00
2024-01	0.38	0.27	0.73	0.07	55.00	2024-01-28 11:00
2024-02	0.54	0.39	1.20	0.10	128.00	2024-02-12 09:00
2024-03	0.43	0.32	1.08	0.10	159.00	2024-03-08 11:00
2024-04	0.40	0.34	1.23	0.03	215.00	2024-04-24 10:00
2024-05	0.76	0.42	1.49	0.15	296.00	2024-05-09 08:00
2024-06	0.73	0.43	1.34	0.04	180.00	2024-06-23 11:00
2024-07	0.79	0.39	1.42	0.08	377.00	2024-07-24 09:00
Promedio	**0.58**	**0.35**	**1.58**	**0.03**	**3023.37**	–

5.3. Marea en Cáhuil

5.3.1. Estimación de marea

A continuación se presenta la estimación de la marea en Cáhuil por el método de ponderación inversa mediante la Figura 20, para un total de 14 meses desde el 2023-05-05 hasta el 2024-07-31 de la data bruta de las estaciones utilizadas.



Figura 20: Serie tiempo estimación de marea Cáhuil.

A modo de verificar el método de triangulación inversa para la estimación de marea, se presenta mediante la Figura 21 los resultados en la estimación de la marea en Boyeruca para comparar con la real medida en la estación.

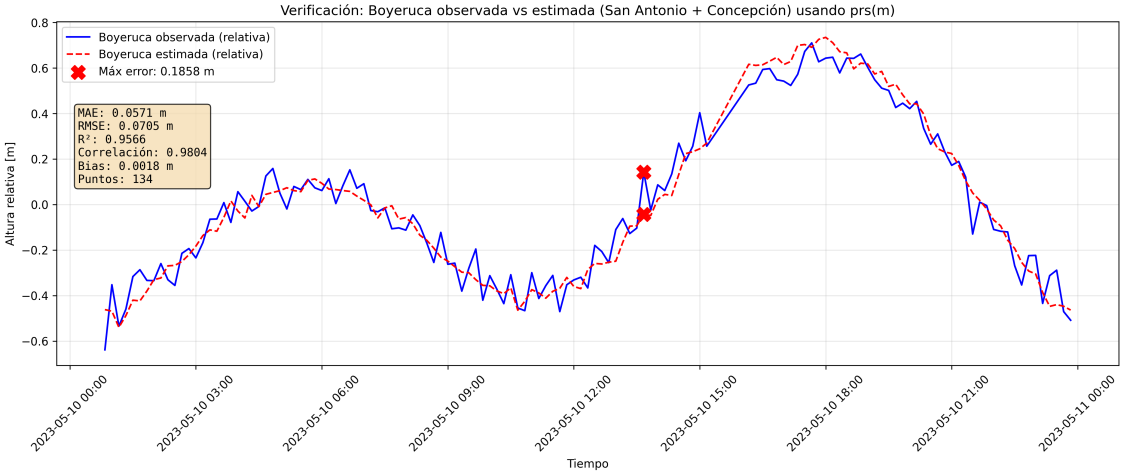


Figura 21: Verificación método de estimación de marea.

5.3.2. Análisis de componentes astronómicos

Los valores de período, amplitud y fase de los 67 constituyentes armónicos encontrados por U-Tide son los expresados en la Tabla 9 en la sección de Anexos.

Con esos valores se puede reconstruir la marea para Cáhuil, la cual se presenta en la Figura 22.

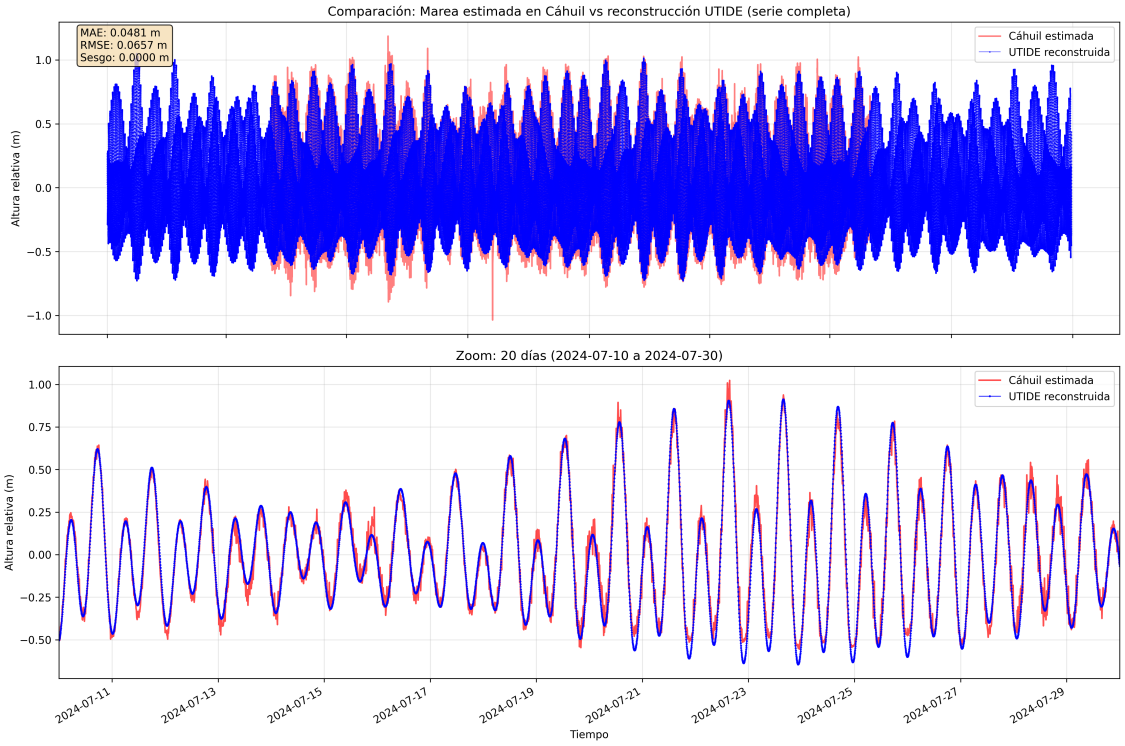


Figura 22: Marea de Cáhuil reconstruida con UTide.

Por otro lado, el Nivel de Reducción de Sondas para Cáhuil se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6: Componentes armónicos principales utilizados en el cálculo del NRS.

Componente	Amplitud (m)
O1	0.1075
K1	0.1524
M2	0.4274
S2	0.1447
N2	0.0951
η_0	0.0014
NRS:	**0.9257**

5.4. Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado

Se presenta a continuación en la Tabla 7 características de la simulación del Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado, tanto el existente con ancho constante como el modificado con ancho variable. Se realizan simulaciones para 4 casos a modo de representar escenarios con distintos parámetros.

Tabla 7: Características de las simulaciones realizadas.

Característica	Simulación 1a	Simulación 1b	Simulación 2	Simulación 3
Tipo de modelo	Existente	Existente	Modificado	Modificado
Fecha inicio	2024-07-10	2024-07-10	2024-07-10	2023-05-01
Fecha fin	2024-07-30	2024-07-30	2024-07-30	2023-05-31
Duración (días)	20.00	20.00	20.00	30.00
Paso temporal (min)	0.25	0.25	0.25	0.25
Total pasos	115201	47781	47781	71550
Tiempo simulación (min)	4.40	1.95	4.47	5.98
Nivel inicial laguna $Z_L(0)$ (m)	0.25	0.25	0.25	1.00
Ancho del canal b_c	50.00	50.00	Variable	Variable
Profundidad del canal h_c (m)	0.79	0.79	0.79	0.34
Longitud del canal L_c (m)	101.00	101.00	101.00	101.00
Coeficiente de Manning	0.0220	0.0220	0.0220	0.0220
Caudal río (m^3/s)	Data DGA	Data DGA	Data DGA	1.00 (*)

(*) Caudal constante debido a no disponibilidad en base de datos DGA.

Notamos que la simulación 1a y 1b son en el mismo periodo total pero la diferencia es que la primera se genera calculo de variables en todo el tiempo continuo y la segunda el calculo se da solo en los intervalos que existe data de ancho de canal, tomando las condiciones finales de un intervalo como las iniciales del siguiente. Esto con el fin de poder comparar adecuadamente el modelo existente y el modificado bajo misma condición de simulación.

Por otro lado, se genera de forma anexa la simnulación 3 en un mes donde se presenta muy poca apertura, solo un 6.8 % del tiempo. Esto con el fin de evaluar el desempeño y la dinámica que se da en momentos de acumulación debido solo al caudal del río, con un mínimo de aperturas con su respectivo ancho variable. Cabe reiterar, que se utiliza un caudal constante del río debido a que no se cuenta con series desde el repositorio de la DGA.

5.4.1. Simulación caso 1a

A continuación, en la Figura 23 se presenta la ventana de resultados para la simulación del modelo hidrodinámico simplificado existente con geometría constante del ancho, notamos que esta modelación se realiza en todo instante de los 20 días de forma continua.

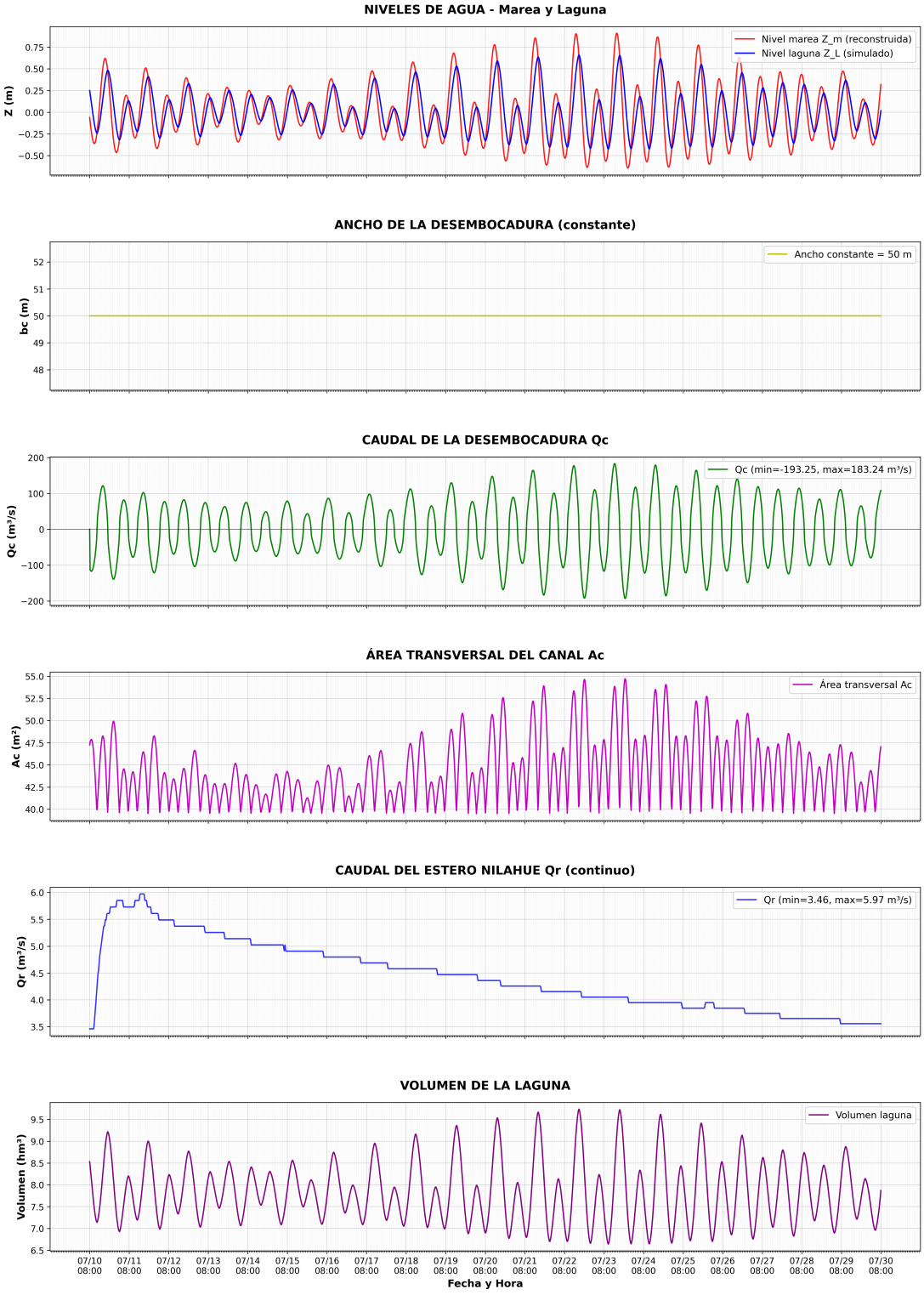


Figura 23: Resultados simulación 1a.

5.4.2. Simulación caso 1b

A continuación, en la Figura 24 se presenta la ventana de resultados para la simulación del modelo existente con geometría constante del ancho, notamos que esta modelación se realiza en intervalos donde existe data de anchos para comparar su desempeño.

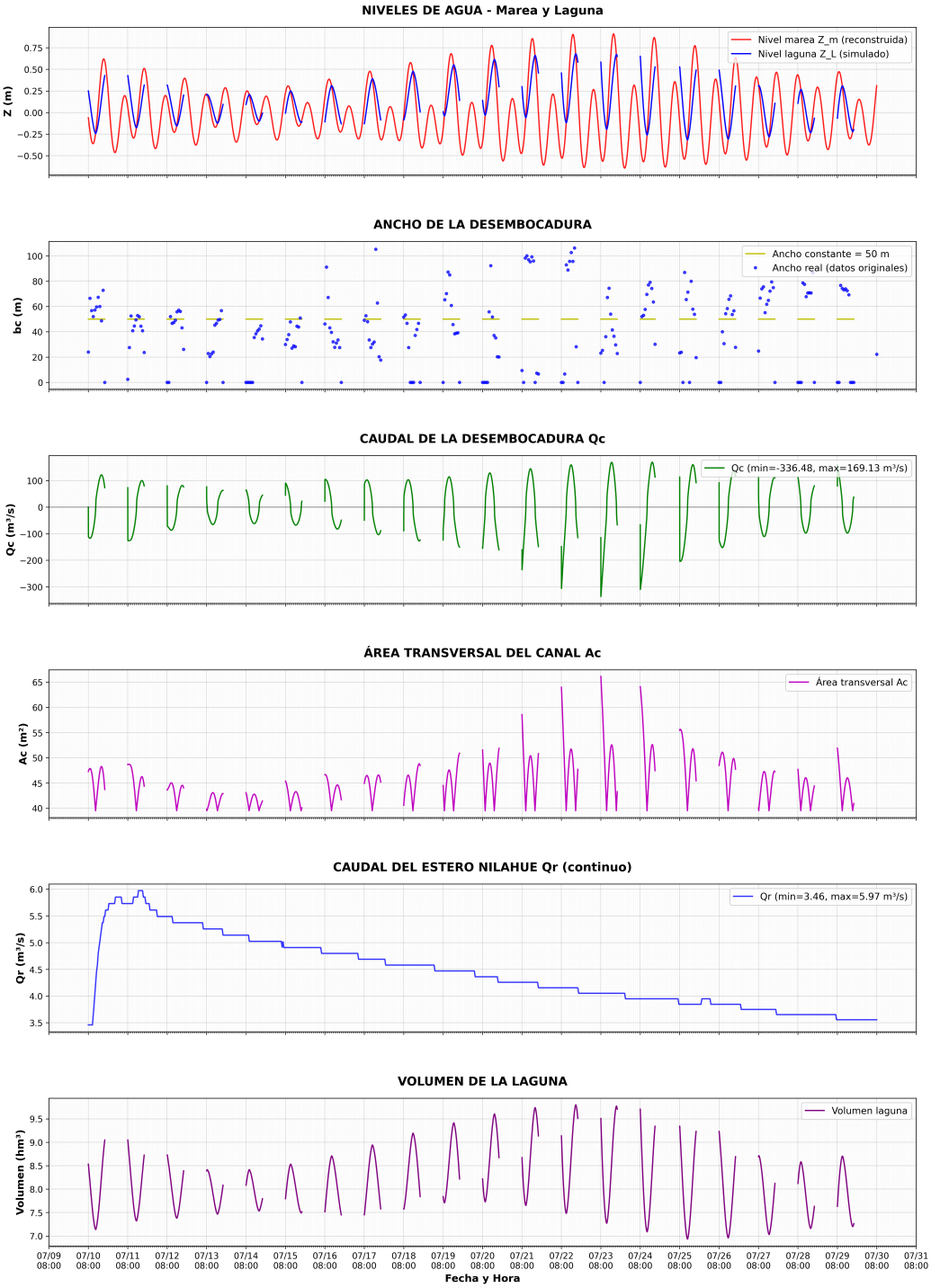


Figura 24: Resultados simulación 1b.

5.4.3. Simulación caso 2

Por medio de la Figura 25 se presenta la ventana de resultados para la simulación del modelo hidrodinámico simplificado modificado con geometría variable del ancho, notamos que esta modelación se realiza en intervalos de los 20 días donde existe data de anchos.

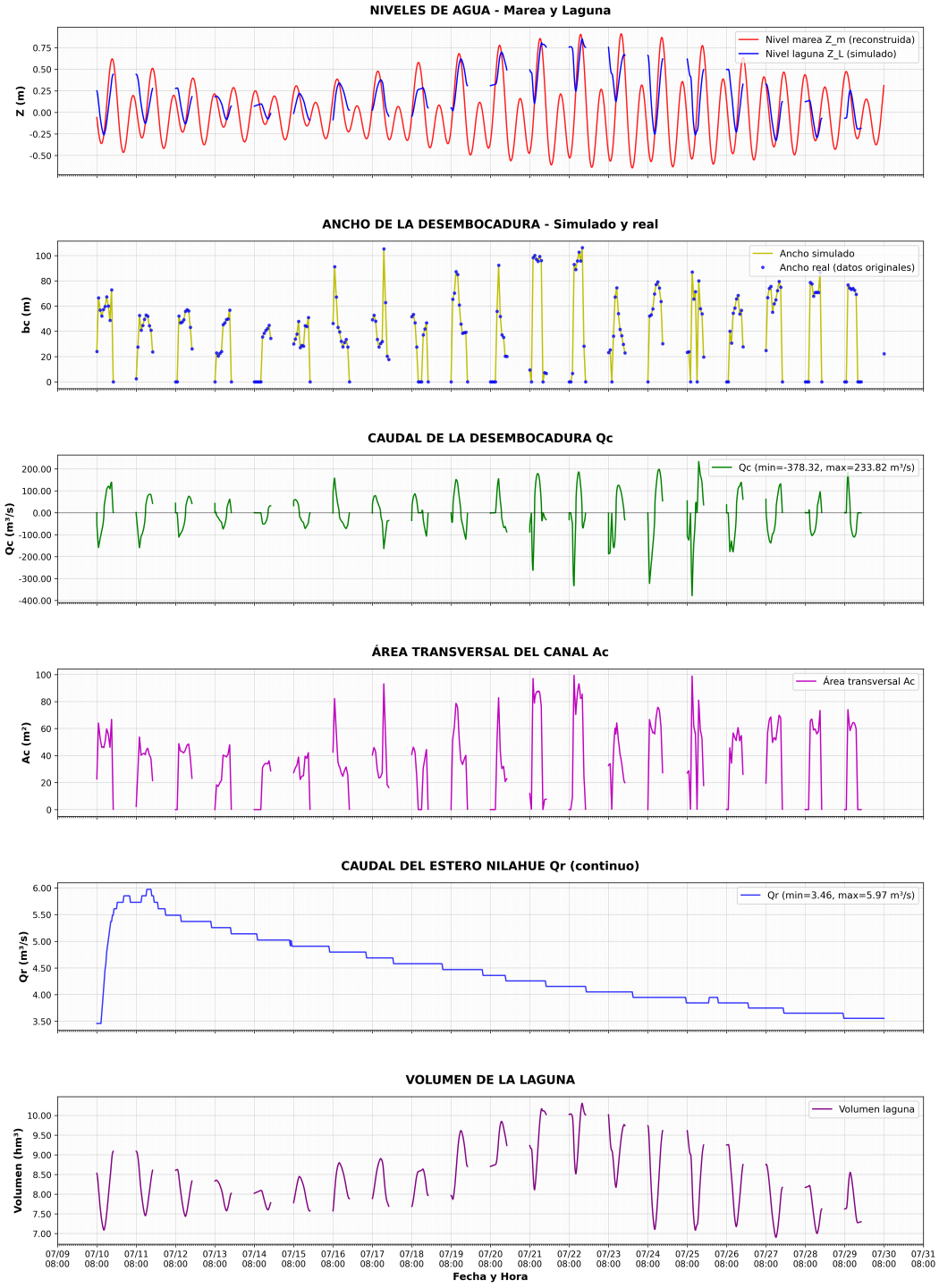


Figura 25: Resultados simulación 2.

5.4.4. Simulación caso 3

Finalmente, por medio de la Figura 26 se presenta la ventana de resultados para la simulación del modelo hidrodinámico simplificado modificado con geometría variable del ancho y caudal del río constante para ver su desempeño en casos de canal cerrado la mayor parte del tiempo.

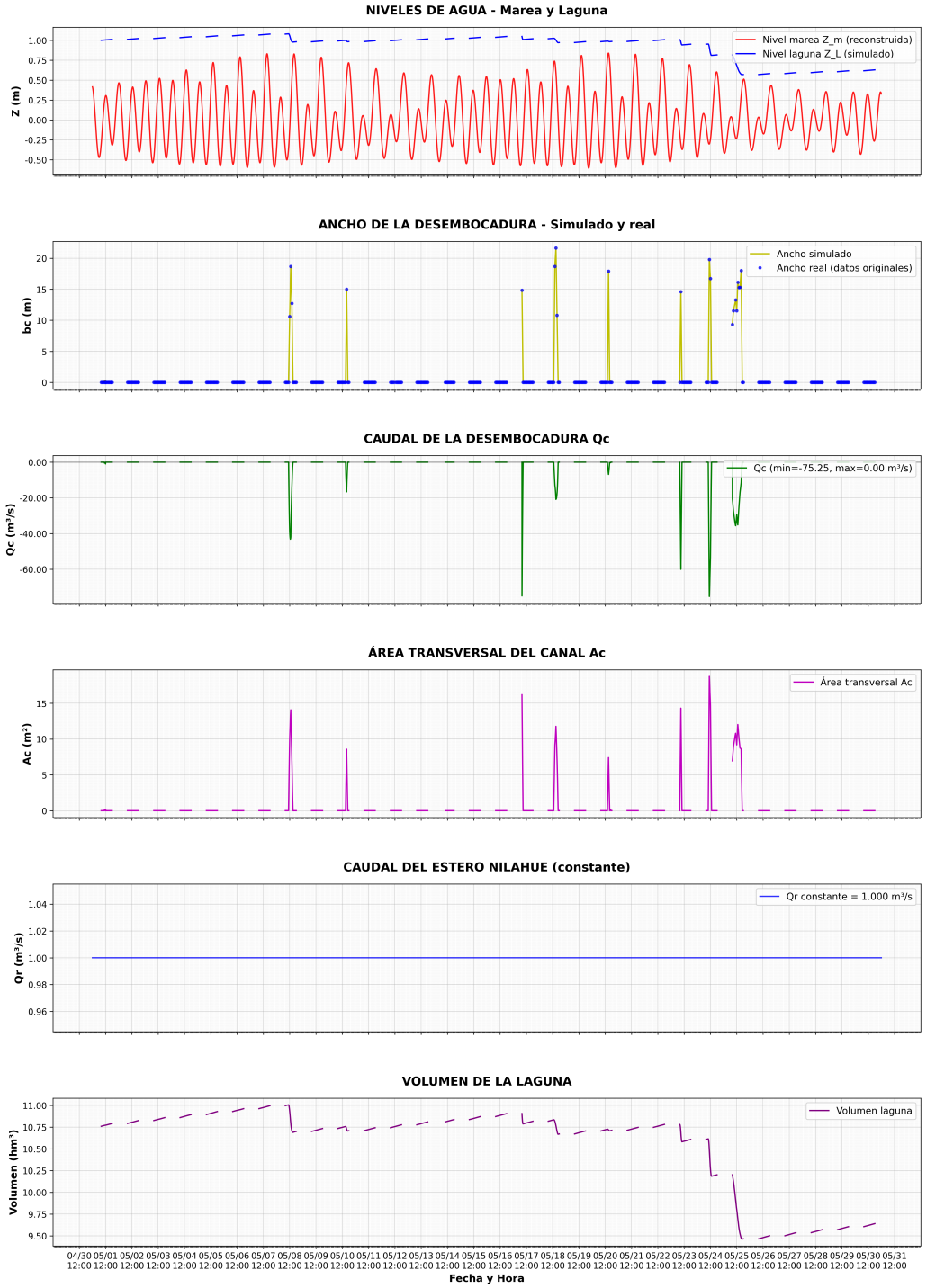


Figura 26: Resultados simulación 3.

5.4.5. Métricas de error con datos medidos

Para las 4 simulaciones realizadas se cuantifica el error que presentan con respecto a los datos reales del nivel lagunar, mediante la Tabla 8 se presentan los errores en cada una de las simulaciones.

Tabla 8: Métricas de error de las simulaciones realizadas.

Métrica	Sim. 1a	Sim. 1a	Sim. 1b	Sim. 2	Sim. 3
Tipo de modelo	Existente	Existente	Existente	Modificado	Modificado
Mes simulado	2024-07	2024-07	2024-07	2024-07	2023-05
N° de días	20	20	20	20	30
Instantes simulados	Todo el tiempo	Todo el tiempo	Intervalos	Intervalos	Intervalos
Instantes métrica	Todo el tiempo	Intervalos	Intervalos	Intervalos	Intervalos
Puntos utilizados	115201	47781	47781	47781	71550
MAE (m)	0.327	0.299	0.252	0.230	0.247
RMSE (m)	0.369	0.332	0.291	0.290	0.314
Sesgo (m)	-0.327	-0.299	-0.244	-0.176	-0.247

Para ver de forma visual el desempeño de la simulación contrastado con la medición real se presentan a continuación las gráficas comparativas de las 4 simulaciones en la Figura 27, 28, 29 y 30, respectivamente.

Simulación 1a:

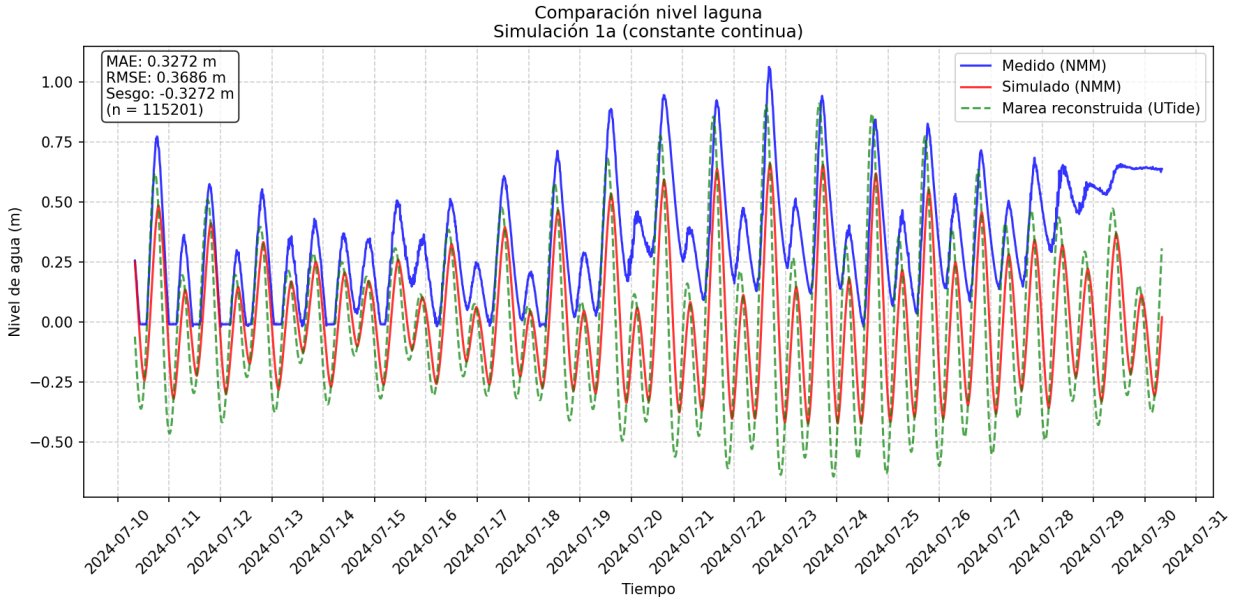


Figura 27: Comparación nivel lagunar simulación 1a.

Simulación 1b:

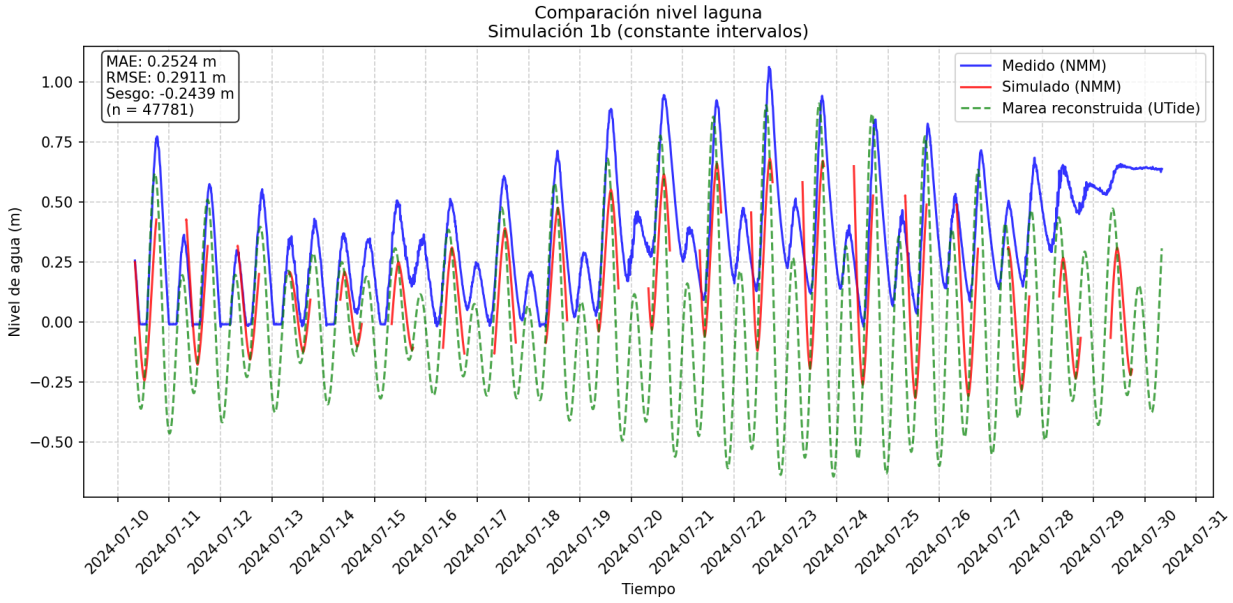


Figura 28: Comparación nivel lagunar simulación 1b.

Simulación 2:

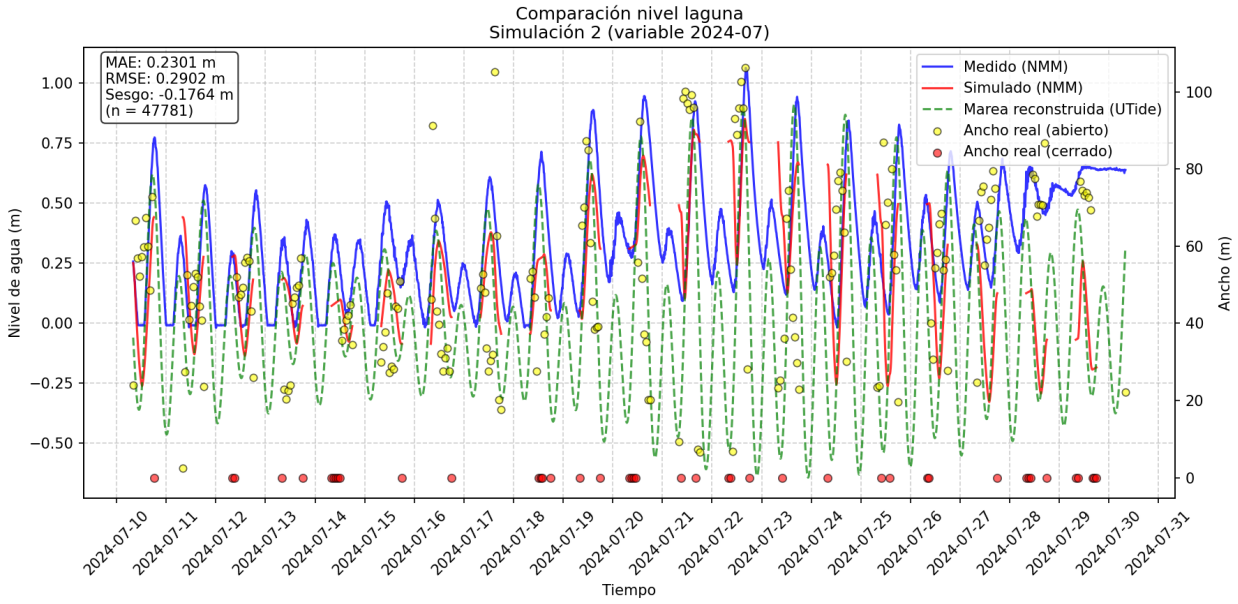


Figura 29: Comparación nivel lagunar simulación 2.

Simulación 3:

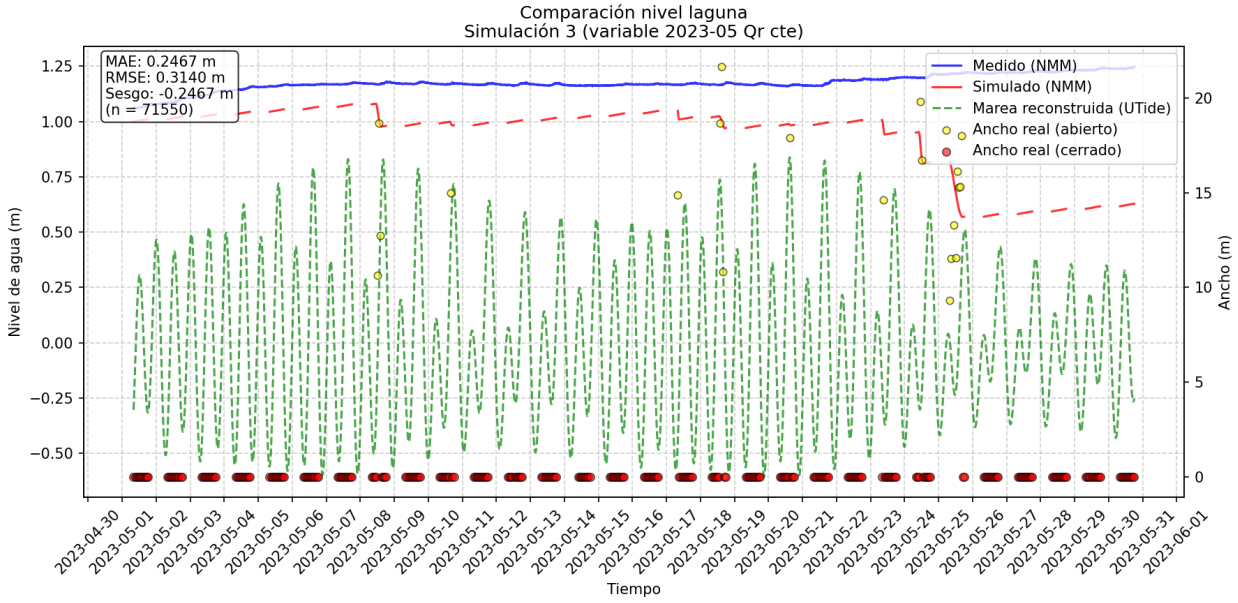


Figura 30: Comparación nivel lagunar simulación 3.

6. Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación constituyen la primera caracterización cuantitativa de alta frecuencia de la dinámica morfológica de la desembocadura de la laguna Cáhuil, y su incorporación a un modelo hidrodinámico simplificado ha permitido evaluar el impacto de la variabilidad del ancho del canal en la estimación de los niveles de agua lagunares. A continuación, se analizan estos hallazgos, se discute el desempeño de las metodologías aplicadas y se profundiza en la comparación entre las simulaciones con ancho constante y ancho variable, que constituye el núcleo de esta investigación.

6.1. Procesamiento de Imágenes y Segmentación

El algoritmo de segmentación basado en K-means con inicialización guiada procesó exitosamente 4978 imágenes, de las cuales solo 55 (un 1,1 %) fueron descartadas por saturación u oscuridad severa (Sección 5.1.1), una tasa baja que valida la robustez del método frente a las condiciones cambiantes de iluminación, niebla o sombras proyectadas por la topografía. Si bien en ocasiones se observa una confusión semántica entre los clusters de agua y arena, esta no afecta la identificación del perímetro, ya que ambos grupos colindan permanentemente. La generación de contornos de un píxel de espesor a partir de las máscaras binarias permitió capturar la evolución horaria de la interfaz agua-arena, y la superposición de perímetros (Figura 13) revela una estructura de curvas de nivel del canal de desembocadura. Esta información, en futuras investigaciones, podría cruzarse con los datos de marea para reconstruir la forma tridimensional del canal.

El cambio en la orientación de la cámara a partir del 31 de julio de 2024 (Figura 10) representa una limitación operativa importante. La nueva ROI-2 carece de los puntos de referencia estáticos de "arena pura" que permitían una inicialización determinística del algoritmo, lo que impide extender la serie morfológica más allá de esa fecha utilizando la misma metodología. Esta discontinuidad acota el período de análisis para la simulación y validación del modelo.

6.2. Morfología de la Desembocadura

6.2.1. Estado de conexión

El método desarrollado para la detección automática del estado de conexión demostró ser capaz de identificar correctamente los instantes de apertura y cierre, extrayendo además los dos límites reales del canal (Figura 14). La estadística mensual (Tabla 2) revela una marcada estacionalidad: durante el invierno y primavera de 2023 (julio a octubre) el canal permaneció abierto más del 50 % del tiempo, con un máximo de 80,4 % en septiembre, mientras que en el verano de 2024 (enero a marzo) el estado cerrado predominó con más del 60 % del tiempo, alcanzando 84,7 % en enero. Este comportamiento es consistente con la dinámica esperada para una barra de arena en clima mediterráneo, donde el balance entre la energía del oleaje y el caudal fluvial controla la morfología de la desembocadura.

La alta variabilidad interanual observada —contraste entre mayo de 2023 (6,8 % abierto) y mayo de 2024 (74,3 % abierto)— sugiere que, además de la estacionalidad media, intervienen factores de intensidad variable, como la ocurrencia de tormentas, la dirección y energía del oleaje, o intervenciones antrópicas en la subcuenca del estero Nilahue. Cabe mencionar que el sesgo introducido al clasificar las 55 imágenes saturadas como cerradas (1,1 % del total) no altera las tendencias estacionales aquí descritas.

6.2.2. Ancho de la desembocadura

El ancho del canal presenta una variabilidad extrema, con un rango desde 1,2 m hasta 169,5 m, un promedio de 36,6 m y una desviación estándar de 30,3 m como se observa en la evolución temporal global de la Figura 15. A escala diaria, se observan cambios de un orden de magnitud en el ancho en cuestión de días (Figura 16), lo que tiene implicancias directas sobre la hidrodinámica lagunar, ya que la sección transversal del canal controla la magnitud del intercambio de agua con el mar.

A escala mensual, (Tabla 3) se observa que los periodos con anchos medios elevados (superiores a 40 m) y alta desviación estándar (>30 m), como agosto y septiembre de 2023, son indicativos de un sistema energéticamente activo, donde la barra experimenta continuas fluctuaciones por efecto de posibles tormentas y pulsos de caudal desde el estero Nilahue, como los precensiados en casi toda la zona central del país con el temporal entre el 18 y 23 de agosto 2023. La distribución mensual de los anchos se complementa con el análisis del rango intercuartílico mostrado en la Figura 18, donde existen varios valores atípicos altos en agosto 2023 y el mes que más variabilidad hacia valores alto es justamenten el mes de septiembre.

A escala interanual, como se muestra en la Figura 17, se puede ver que la diferencia es amplia en los meses de mayo, junio y julio (los únicos meses que se repiten en la ventana de tiempo analizada), esto podría indicar una alta variabilidad debido a frentes temporales anómalos o bien intervenciones antrópicas en la subcuenca costera.

El procedimiento de depuración de datos, que eliminó 32 falsas aperturas aisladas y corrigió 9 valores atípicos, fue necesario para evitar que errores puntuales de segmentación se tradujeran en condiciones de borde físicamente inconsistentes. Esto no generó mayores efectos en lso resultados.

6.2.3. Profundidad y largo canal desembocadura

La longitud del canal (L_c) mostró una relativa estabilidad, con un promedio de 101,1 m y una desviación de 8,2 m en las cuatro muestras analizadas (Tabla 4), lo que justifica el uso de un valor constante en las simulaciones. En cambio, la profundidad estimada (h_c) presenta una clara dependencia estacional, con máximos invernales (>0,7 m), mínimos estivales (0,4 m) y un promedio global de 0,58 m (Tabla 5), valor acorde a un canal somero excavado en una barra arenosa. Sin embargo, la metodología de cálculo que infiere h_c a partir de la variación de la marea durante los períodos de apertura podría estar sobreestimando o subestimando los valores, ya que atribuye toda su magnitud a la variación mareal sin considerar los efectos de acumulación o erosión dado por el transporte de sedimentos, tanto en la playa como en la laguna y canal de desembocadura.

6.3. Marea en Cáhuil

La estimación de la marea mediante interpolación IDW a partir de las estaciones de Boyeruca y San Antonio generó una serie sintética para Cáhuil (Figura 20). La verificación del método, estimando la marea en Boyeruca y comparándola con la observada, arrojó diferencias medias de 0,06 m y máximas del orden de 0,19 m (Figura 21), lo que valida la técnica para este estudio.

El análisis armónico con UTide identificó 67 componentes (Tabla 9 en Anexos), confirmando un régimen mixto predominantemente semidiurno, con la componente lunar M2 dominante (amplitud 0,43 m), seguida por la diurna K1 (0,15 m) y la semidiurna solar S2 (0,14 m). Este patrón es característico de la costa de Chile central. La reconstrucción de la marea a partir de los coeficientes armónicos se presenta en la Figura 22. El cálculo del NRS en 0,93 m (Tabla 6) permitió referenciar

los datos observados de nivel de la laguna (originalmente en NRS) al NMM utilizado por el modelo, corrección esencial para la validación cuantitativa.

6.4. Modelo Hidrodinámico Lagunar Simplificado

La comparación entre las simulaciones realizadas (cuyas características se resumen en la Tabla 7) permite evaluar el efecto de incorporar la morfología variable del canal, que constituye el objetivo central de esta investigación. Las métricas de error (Tabla 8) muestran una mejora sistemática al pasar del modelo con ancho constante al modelo con ancho variable, aunque todas las simulaciones presentan una subestimación del nivel de la laguna, reflejada en sesgos negativos.

La Simulación 1a, que corresponde al modelo existente con geometría constante ($b_c = 50$ m) ejecutado de forma continua durante los 20 días de julio de 2024 (Figura 23), presenta las métricas más desfavorables: MAE de 0,327 m, RMSE de 0,369 m y sesgo de -0,327 m (Figura 27). Este resultado confirma que simular ininterrumpidamente con ancho fijo amplifica el error, ya que se fuerza al modelo a operar con una sección invariable incluso durante períodos en que el canal real estaba cerrado o muy restringido. Para aislar el efecto de la geometría constante de la falta de datos, la Simulación 1b ejecuta el mismo modelo con ancho fijo pero restringido a los intervalos donde existe información morfológica (Figura 24), mejorando las métricas: MAE de 0,252 m, RMSE de 0,291 m y sesgo de -0,244 m (Figura 28). Esta mejora de error puede atribuirse a que los niveles simulados son más acertivos en los intervalos que hay data de anchos (de 08:00 a 18:00 hrs) donde se dan las amplitudes más grandes de marea en todo el día. Aun así, la subestimación persiste, indicando que incluso cuando el canal está abierto, la hipótesis de un ancho constante de 50 m no representa la variabilidad real de la sección.

Por su parte, la Simulación 2 que incorpora la serie temporal de ancho variable $b_c(t)$ obtenida del procesamiento de imágenes (Figura 25), reduce el MAE a 0,230 m, el RMSE a 0,290 m y, más notablemente, disminuye el sesgo a -0,176 m (Figura 29). La comparación directa entre la Simulación 1b (modelo existente) y la Simulación 2 (modelo modificado) es la que refleja el aporte de esta investigación, ya que ambas comparten el mismo período, paso de tiempo y discretización por intervalos, diferenciándose únicamente en la representación del ancho del canal. La reducción del sesgo en un 27,9 % (de -0,244 m a -0,176 m) y del MAE en casi un 9 % (de 0,252 a 0,230 m) demuestra que la morfología variable captura información relevante sobre la resistencia que ofrece la desembocadura al flujo: cuando el ancho real es pequeño, el modelo restringe el caudal permitiendo que la laguna retenga agua; cuando es grande, facilita el intercambio.

Finalmente, la Simulación 3, correspondiente a mayo de 2023 (un mes con muy baja apertura, 6,8 %), se generó con el objetivo de evaluar el efecto de acumulación en la laguna, donde el ingreso de agua proviene exclusivamente del caudal del estero Nilahue (constante de 1 m^3/s por falta de datos DGA) y la descarga ocurre solo en breves instantes de apertura del canal (Figura 26). Al comparar con el nivel real de la laguna (Figura 30), se observa que prácticamente no presenta cambios significativos asociados a las aperturas, lo que sugiere que los episodios de conexión registrados no generan perturbaciones relevantes en el nivel lagunar. Esta respuesta puede atribuirse a que las simplificaciones morfológicas del canal (ancho variable, pero profundidad y largo constantes) sobreestiman el efecto del intercambio de aguas, produciendo cambios instantáneos en el nivel que no se condicen con la realidad. Alternativamente, el caudal constante de 1 m^3/s podría ser poco representativo de los aportes reales del estero, o bien, la omisión de otros componentes del balance hídrico (evaporación, precipitación directa, infiltración) impide capturar adecuadamente la dinámica de acumulación.

6.5. Sesgo Residual y sus Posibles Causas

A pesar de la mejora lograda, el modelo con ancho variable (Simulación 2) mantiene un sesgo negativo de -0,176 m, indicando que aún existen factores no considerados que contribuyen a la subestimación del nivel. A partir de los resultados y la metodología, es posible identificar múltiples causas que actúan de forma combinada.

En primer lugar, la profundidad del canal (h_c) utilizada (0,79 m para julio de 2024) promedia estimaciones en períodos de apertura (Tabla 5), acoplando el efecto fluvial y morfológico al atribuir la variación de nivel al canal. Si este valor sobreestima la profundidad real, el modelo permitiría un mayor flujo de salida, profundizando el sesgo. En segundo lugar, mantener constantes la longitud (L_c) y el coeficiente de Manning ($n = 0,022$) ignora sus variaciones debidas a la dinámica de la barra y al transporte de sedimentos. Por otro lado, el modelo omite otros términos del balance hídrico (evaporación, precipitación e infiltración), los cuales, aunque pequeños por evento, pueden acumularse en períodos prolongados. Tambien, la omisión del oleaje puede estar generando una subestimación generalizada, ya que, en general, este término incrementa los niveles de agua dentro de la laguna. Además, la marea estimada por IDW introduce un error de hasta 0,19 m (Figura 21), y la interpolación lineal del caudal fluvial podría no capturar pulsos de alta frecuencia. Finalmente, el cambio de referencia del nivel lagunar medido (NRS a NMM) podría estar induciendo sesgos, al estimarse mediante análisis armónicos que utilizan mareas IDW y promedios móviles semanales desde los datos brutos.

6.6. Limitaciones Metodológicas

A la luz de los resultados, se identifican varias limitaciones que condicionan la interpretación de los fenómenos observados:

- El método de segmentación basado en K-means con inicialización guiada, aunque robusto, depende de la discretización entre agua y arena mediante la combinación de los espacios de color HSV y Lab y la posterior reclasificación semántica con puntos de referencia fijos. Esta clasificación no es exacta y puede presentar errores puntuales, ya que la asignación de cada píxel a un cluster se basa en un criterio óptimo pero no físico, pudiendo sobrestimar o subestimar la extensión del agua en ciertas condiciones de iluminación o reflectancia.
- La discontinuidad en el registro visual por el cambio de orientación de la cámara (Figura 10) impide analizar la evolución morfológica más allá de julio de 2024 con la misma metodología, limitando la extensión de la serie temporal.
- La estimación indirecta de la profundidad del canal (h_c) a partir de la señal de marea acopla el efecto del caudal fluvial y la morfología, generando una incertidumbre no cuantificada.
- La ausencia de un mareógrafo local introduce un error en la condición de borde marina que, aunque acotado (del orden máximo de 0,2 m según la validación de la Figura 21), puede explicar parte del sesgo residual.
- La simplificación del balance hídrico y la parametrización constante de la fricción (n) son fuentes de error que no han sido calibradas con datos de terreno.

Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero acotan el alcance de las interpretaciones y señalan los aspectos donde sería necesario profundizar en investigaciones futuras para lograr una representación más completa y fiable de los procesos que gobiernan el sistema lagunar.

7. Conclusiones

En esta investigación se desarrolló una metodología para caracterizar la evolución morfológica de alta frecuencia de la desembocadura de la laguna Cáhuil mediante procesamiento digital de imágenes y se incorporó dicha variabilidad como condición de borde en un modelo hidrodinámico simplificado, evaluando su impacto en la estimación de los niveles de agua. Los principales resultados permiten extraer las siguientes conclusiones.

El algoritmo de segmentación basado en K-means con inicialización guiada mediante puntos de referencia fijos, utilizando los espacios de color HSV y Lab, procesó exitosamente 4978 imágenes con una tasa de descarte de solo el 1,1 %, demostrando su robustez frente a condiciones cambiantes de iluminación y reflectancia. La posterior extracción de perímetros agua-arena y la detección automática de los márgenes del canal permitieron obtener, por primera vez para este sistema, una serie horaria continua del estado de apertura y del ancho de la desembocadura durante 15 meses.

La estadística mensual del estado de conexión reveló una marcada estacionalidad: en invierno y primavera el canal permaneció abierto más del 50 % del tiempo, con máximos de 84,6 % en julio de 2024, mientras que en verano predominó el estado cerrado, alcanzando 84,7 % en enero de 2024. El ancho del canal presentó una variabilidad extrema (rango de 1,2 a 169,5 m; promedio de 36,6 m), reflejando la sensibilidad de la sección transversal a los forzantes de corto plazo, como la marea semiduirna, pulsos de caudal y eventos de oleaje o tormentas.

La incorporación del ancho variable en el modelo hidrodinámico (Simulación 2) produjo una mejora sistemática respecto al modelo existente con geometría constante (Simulación 1b), ambos ejecutados en los mismos intervalos con datos morfológicos. El sesgo se redujo en un 27,9 % (de -0,244 m a -0,176 m) y el MAE disminuyó un 8,7 % (de 0,252 m a 0,230 m). Esta mejora cuantitativa demuestra que la morfología variable del canal es un factor relevante para explicar la dinámica de niveles en la laguna: cuando el ancho se reduce o el canal se cierra, el modelo restringe el intercambio, permitiendo que la laguna retenga agua; cuando el ancho es grande, facilita el drenaje.

A pesar de la mejora, todas las simulaciones presentaron un sesgo negativo persistente (subestimación del nivel). El sesgo residual de -0,176 m en el modelo modificado indica que la variabilidad del ancho, si bien necesaria, no es suficiente por sí sola. La principal hipótesis es que el modelo hidrodinámico simplificado, al considerar únicamente la marea astronómica, el caudal fluvial y la geometría del canal, omite forzantes de primer orden que afectan el nivel de la laguna, en particular el oleaje (que genera *wave setup* elevando la carga hidráulica sobre la desembocadura), el viento (que induce *set-up* o *set-down* local) y los eventos de tormenta (que modifican rápidamente la morfología y el nivel medio). La omisión de estos procesos explica la magnitud del sesgo residual y sugiere que futuras investigaciones deben orientarse a su inclusión paramétrica o dinámica.

Las limitaciones metodológicas identificadas incluyen la dependencia de la segmentación a puntos de referencia fijos, lo que impidió extender la serie más allá de julio de 2024 tras el cambio de orientación de la cámara; la estimación indirecta de la profundidad del canal (h_c) a partir de la señal de marea, que acopla efectos del caudal y la morfología; la ausencia de un mareógrafo local, que introduce un error medio de 0,06 m en la condición de borde; la falta de validación propia del método de detección de anchos y su medida; y la simplificación del balance hídrico (evaporación, precipitación, infiltración) y de la rugosidad (n constante). Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, pero acotan el alcance de las interpretaciones y señalan los aspectos donde es necesario profundizar.

Para futuras investigaciones se recomienda: (1) incorporar una parametrización del *wave setup* y la acción del viento en la condición de borde marina y en la ecuación de momentum, siguiendo enfoques como el de Malhadas et al., 2009; (2) implementar mediciones directas de batimetría del

canal para calibrar la profundidad h_c y el coeficiente de Manning; (3) extender la serie morfológica mediante la recalibración de los puntos de referencia en la nueva orientación de la cámara; (4) validar los resultados numéricos de los anchos estimados; (5) incluir términos de balance hídrico adicionales (evaporación, precipitación) para mejorar la precisión en períodos prolongados; y (6) evaluar la sensibilidad del modelo a la resolución temporal de los forzantes (marea, caudal) y a la incertidumbre en la estimación espacial de la marea.

En síntesis, esta investigación ha demostrado que es posible caracterizar cuantitativamente la morfología horaria de una desembocadura costera mediante técnicas de visión computacional y que dicha información mejora significativamente la capacidad predictiva de un modelo hidrodinámico simplificado. No obstante, el sesgo residual evidencia que la dinámica de niveles en lagunas costeras como Cáhuil responde a un balance acoplado entre morfología, marea, caudal fluvial, oleaje y viento, por lo que su representación adecuada requiere modelos que integren estos procesos de manera combinada. Los resultados obtenidos constituyen una base sólida para avanzar hacia modelos más completos y para apoyar la gestión integrada de estos ecosistemas costeros.

8. Anexos

8.1. Desarrollo de las Ecuaciones Gobernantes

El presente anexo detalla la derivación matemática de las ecuaciones diferenciales ordinarias que gobiernan la hidrodinámica del sistema, basadas en la aplicación del Teorema de Transporte de Reynolds (TTR) a los volúmenes de control respectivos.

8.1.1. Conservación de la Masa

La ecuación general de conservación de masa para un volumen de control (VC) estacionario se expresa como:

$$\frac{d}{dt}\int_{VC}\rho dV + \int_{SC}\rho\vec{v}\cdot\vec{n}dA = 0 \tag{24}$$

Considerando la laguna en su totalidad como el volumen de control y asumiendo que la densidad del agua (ρ) es constante (fluido incompresible), la ecuación puede dividirse en dos componentes principales: el almacenamiento local y los flujos en las fronteras.

1. Tasa de cambio de almacenamiento: El volumen de la laguna se puede aproximar en función de su nivel de agua (Z_L) y su área superficial (A_L) como $V \approx Z_L A_L$. Aplicando la regla de la cadena para derivar respecto al tiempo, y considerando que el área superficial es a su vez función del nivel ($A_L = f(Z_L)$), se obtiene:

$$\frac{d}{dt}\int_{VC} dV = \frac{d(Z_L A_L)}{dt} = Z_L\frac{dA_L}{dt} + A_L\frac{dZ_L}{dt} \tag{25}$$

Expresando el cambio de área en función del nivel de agua ($\frac{dA_L}{dt} = \frac{dA_L}{dZ_L}\frac{dZ_L}{dt}$), el término temporal queda:

$$\frac{d}{dt}\int_{VC} dV = \left(Z_L\frac{dA_L}{dZ_L} + A_L\right)\frac{dZ_L}{dt} \tag{26}$$

2. Flujo másico en las superficies de control: Los aportes al sistema se consideran positivos cuando ingresan al volumen de control (vectores de velocidad opuestos a la normal de la superficie). Los flujos son el caudal del estero (Q_r) y el caudal de intercambio por el canal (Q_c):

$$\int_{SC}\vec{v}\cdot\vec{n}dA = -Q_c - Q_r \tag{27}$$

Sustituyendo (26) y (27) en la Ecuación 24 y dividiendo por ρ:

$$\left(Z_L\frac{dA_L}{dZ_L} + A_L\right)\frac{dZ_L}{dt} - (Q_c + Q_r) = 0 \tag{28}$$

Al despejar la derivada del nivel de la laguna, se obtiene la expresión constitutiva final:

$$\frac{dZ_L}{dt} = \frac{Q_c + Q_r}{Z_L\frac{dA_L}{dZ_L} + A_L} \tag{29}$$

8.1.2. Conservación de la Cantidad de Movimiento

La Segunda Ley de Newton expresada mediante el TTR para la cantidad de movimiento en una dimensión es:

$$\frac{d}{dt}\int_{VC}\rho v dV + \int_{SC}\rho v(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = \sum F \tag{30}$$

Definiendo el canal de desembocadura como el volumen de control, modelado analíticamente como un canal unidimensional de área transversal (A_c) y longitud (L_c) representativas, se desglosan los siguientes términos.

1. Inercia Local: Integrando la velocidad sobre el volumen del canal ($V_c = A_c L_c$) y recordando que $Q_c = vA_c$:

$$\frac{d}{dt}\int_{VC}\rho v dV = \frac{d}{dt}(\rho v A_c L_c) = \rho L_c \frac{dQ_c}{dt} \tag{31}$$

2. Flujo Advectivo de Momentum: Al asumir una sección transversal prismática ($A_{\text{ent}} \approx A_{\text{sal}}$) y flujo unidimensional ($v_{\text{ent}} \approx v_{\text{sal}}$), el flujo neto de cantidad de movimiento a través de las fronteras se anula:

$$\int_{SC}\rho v(\vec{v}\cdot\vec{n})dA = -\rho v_{\text{ent}}^2 A_{\text{ent}} + \rho v_{\text{sal}}^2 A_{\text{sal}} \approx 0 \tag{32}$$

3. Fuerzas Externas ($\sum F$): Las componentes de fuerza predominantes son el gradiente de presión hidrostática (F_p) y la fricción del lecho (F_f).

a) Fuerza debida al gradiente de presión (F_p): Se obtiene integrando la distribución hidrostática de presión $p = \rho g(\text{Cota} - z)$ sobre las superficies de entrada y salida:

$$F_p = \int_{A_m}\rho g(Z_m - z)dA - \int_{A_L}\rho g(Z_L - z)dA \tag{33}$$

Asumiendo un área transversal constante (A_c) para el volumen de control y coordenadas z referidas al mismo datum:

$$F_p = \rho g A_c(Z_m - Z_L) \tag{34}$$

b) Fuerza de fricción (F_f): Se modela mediante la relación empírica de Manning, que asocia el esfuerzo cortante de fondo (τ_w) con la velocidad media:

$$\tau_w = \rho g n^2 \frac{|v|v}{R_h^{1/3}} \tag{35}$$

Para un canal natural donde el ancho es considerablemente mayor que la profundidad ($b_c \gg h_c$), se aplica la suposición de canal ancho. Bajo esta premisa, el perímetro mojado (P) se aproxima al ancho del fondo ($P = b_c + 2h_c \approx b_c$), y el radio hidráulico equivale a la profundidad media ($R_h = A_c/P \approx h_c$).

La fuerza resistiva total se obtiene integrando el esfuerzo cortante sobre el área mojada longitudinal del canal ($A_{\text{mojada}} = P \cdot L_c \approx b_c L_c$):

$$F_f = -\tau_w \cdot A_{\text{mojada}} = -\left(\rho g n^2 \frac{|v|v}{h_c^{1/3}}\right)(b_c L_c) \tag{36}$$

Sustituyendo la velocidad en términos del caudal ($v = Q_c/A_c$) y agrupando las constantes de fricción en el parámetro $C_d = gn^2 h_c^{-1/3}$:

$$F_f = -\rho \left(gn^2 h_c^{-1/3} \right) \frac{|Q_c| Q_c}{A_c^2} (b_c L_c) = -\rho C_d \frac{|Q_c| Q_c b_c L_c}{A_c^2} \tag{37}$$

Ecuación Completa de Momentum: Finalmente, igualando la inercia local (31) a la suma de las fuerzas (34) y (37):

$$\rho L_c \frac{dQ_c}{dt} = \rho g A_c (Z_m - Z_L) - \rho C_d \frac{|Q_c| Q_c b_c L_c}{A_c^2} \tag{38}$$

Dividiendo toda la expresión por ρL_c, se obtiene la ecuación diferencial ordinaria gobernante en su forma final:

$$\frac{dQ_c}{dt} = \underbrace{\frac{g A_c (Z_m - Z_L)}{L_c}}_{\text{Fuerza del gradiente de presión}} - \underbrace{\frac{C_d |Q_c| Q_c b_c}{A_c^2}}_{\text{Pérdida por fricción}} \tag{39}$$

Donde:

- F_p: Fuerza neta de presión ejercida por el gradiente de superficie libre.
- F_f: Fuerza neta de resistencia o fricción del cauce.
- τ_w: Esfuerzo cortante en la frontera fluida-sólida.
- R_h: Radio hidráulico del canal.
- P: Perímetro mojado.

8.2. Componentes Armónicos

Tabla 9: Resultados del análisis de componentes armónicos U-Tide: periodo, amplitud y fase.

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	12.4206	0.4274	66.0711
K1	23.9345	0.1524	43.9139
S2	12.0000	0.1447	86.5537
O1	25.8193	0.1075	359.2875
N2	12.6584	0.0951	36.2478
P1	24.0659	0.0493	38.5737
K2	11.9672	0.0408	78.5855
Q1	26.8680	0.0225	335.2755
MU2	12.8716	0.0175	8.2635
L2	12.1917	0.0170	98.2680
NU2	12.6260	0.0139	28.5521
H2	12.4030	0.0113	133.0727
2N2	12.9056	0.0099	1.1733
T2	12.0165	0.0098	56.3965
H1	12.4382	0.0086	154.8707
MKS2	12.3856	0.0080	242.3241
LDA2	12.2218	0.0058	45.0299

Continúa en la siguiente página

Tabla 9 – Continuación

Componente	Período (h)	Amplitud (m)	Fase (°)
MSF	354.3602	0.0057	46.7341
NO1	24.8332	0.0057	26.4867
J1	23.0986	0.0051	87.2647
R2	11.9836	0.0049	346.8818
OO1	22.3062	0.0046	134.5400
RHO1	26.7228	0.0045	326.2941
MF	327.8600	0.0043	104.4021
SA	8766.0000	0.0040	3.3880
MSN2	11.7862	0.0039	281.0460
MS4	6.1034	0.0035	140.7034
M4	6.2103	0.0032	86.5880
MK4	6.0949	0.0030	137.8606
PI1	24.1322	0.0028	51.3254
MSM	763.4780	0.0028	284.8835
ETA2	11.7545	0.0027	66.2658
SK3	7.9927	0.0027	176.7242
EPS2	13.1272	0.0026	307.3837
M3	8.2804	0.0026	248.9299
TAU1	25.6684	0.0026	348.8656
2Q1	28.0060	0.0024	297.3822
MN4	6.2692	0.0024	80.1920
PSI1	23.8693	0.0021	56.1745
S4	6.0000	0.0020	212.1446
SN4	6.1602	0.0019	142.7504
SIG1	27.8490	0.0018	334.3637
M6	4.1402	0.0018	57.0764
OQ2	13.1624	0.0017	72.9527
MK3	8.1771	0.0017	126.2047
MO3	8.3863	0.0015	48.6864
S1	24.0000	0.0013	16.6343
ALP1	29.0727	0.0012	44.2083
BET1	24.9747	0.0011	22.0070
2MN6	4.1663	0.0011	59.9652
SK4	5.9918	0.0011	197.7604
2MS6	4.0924	0.0010	106.2584
SO1	22.4202	0.0010	172.7361
MM	661.3031	0.0010	151.5535
THE1	23.2071	0.0009	126.1576
SO3	8.1924	0.0008	150.1184
CHI1	24.7091	0.0007	13.4961
SSA	4382.9280	0.0007	312.4729
3MK7	3.5296	0.0006	242.8124
UPS1	21.5784	0.0006	178.0601
2MK5	4.9308	0.0006	126.0483
MSK6	4.0420	0.0006	11.5796
PHI1	23.8045	0.0004	91.4925
2SM6	4.0457	0.0004	25.5992
2MK6	4.0886	0.0003	69.5759
M8	3.1052	0.0003	112.9653
2SK5	4.7974	0.0003	213.9848
Número total de componentes: 67			

8.3. Resultados algoritmo de aperturas y anchos

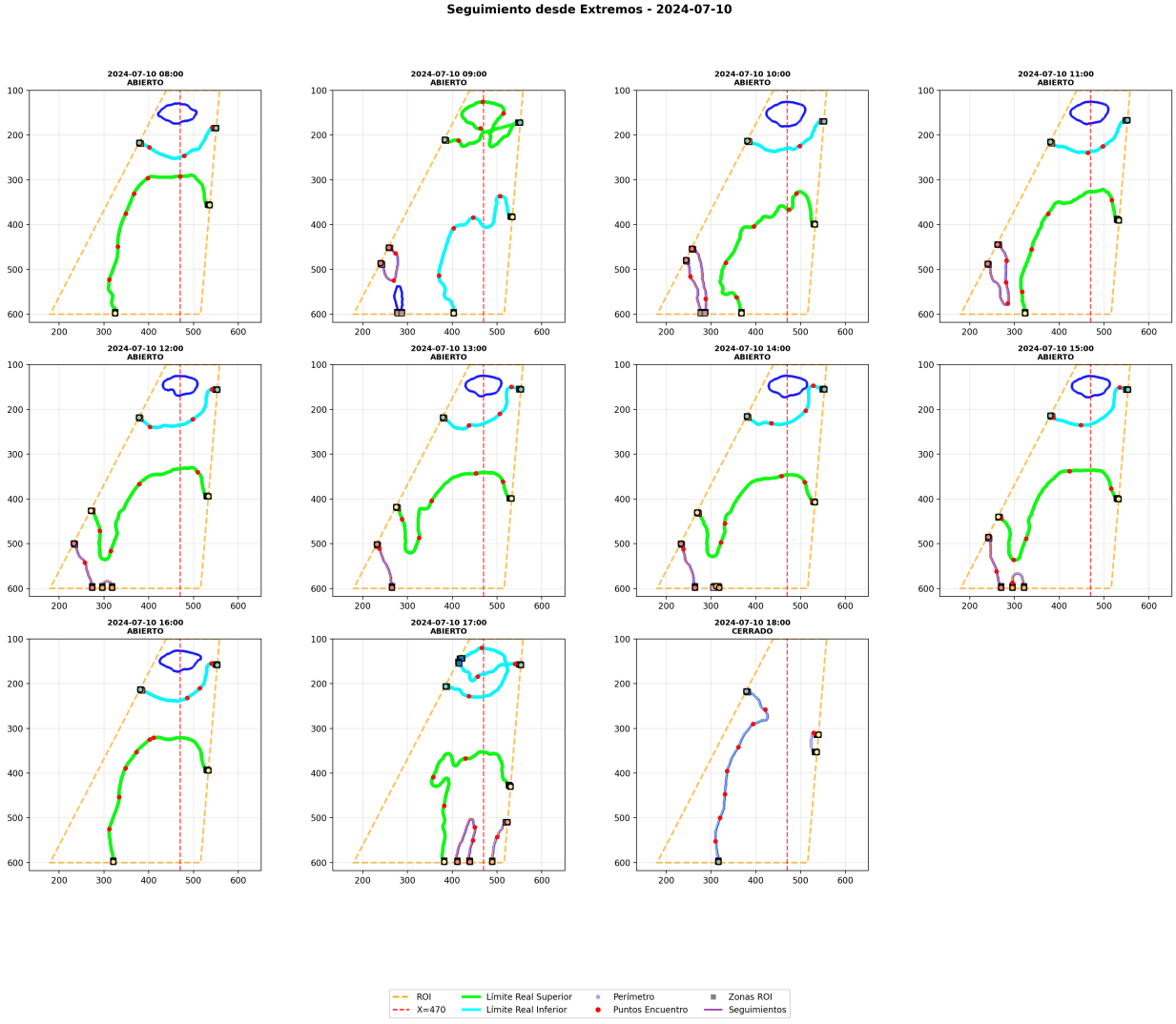


Figura 31: Aperturas identificadas día 2024-07-10.

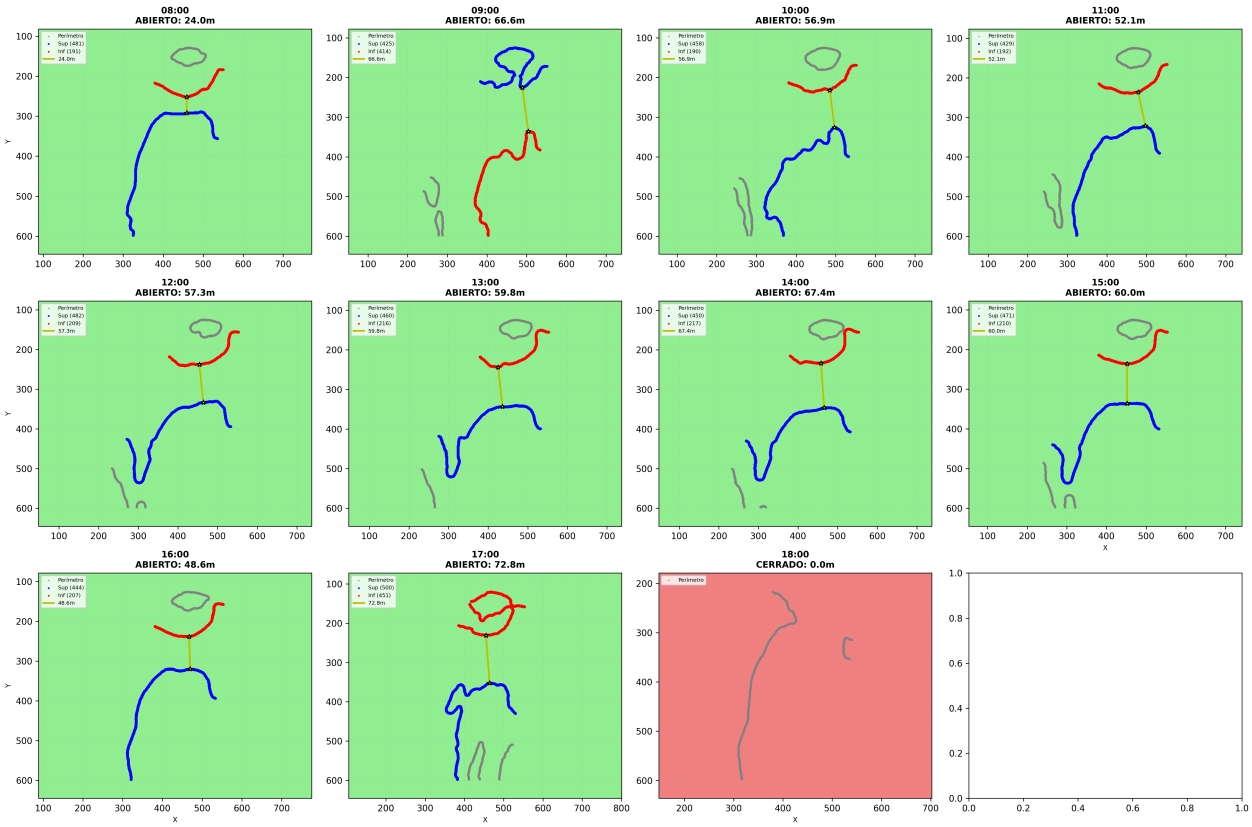


Figura 32: Anchos calculados día 2024-07-10.

8.4. Resultados anchos por mensuales

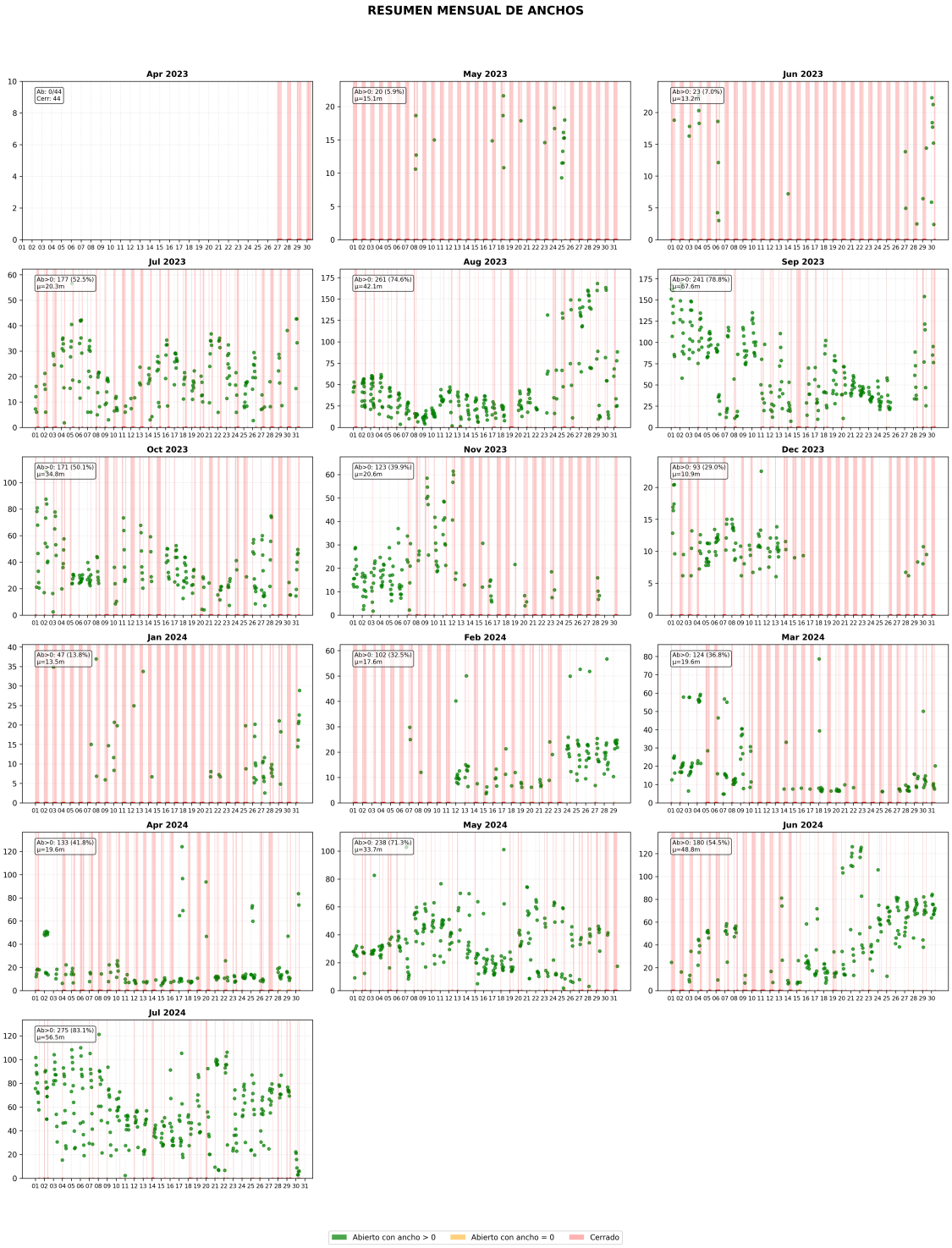


Figura 33: Resultados anchos por mensuales.

8.5. Rango intercuartílico de anchos diarios en cada mes

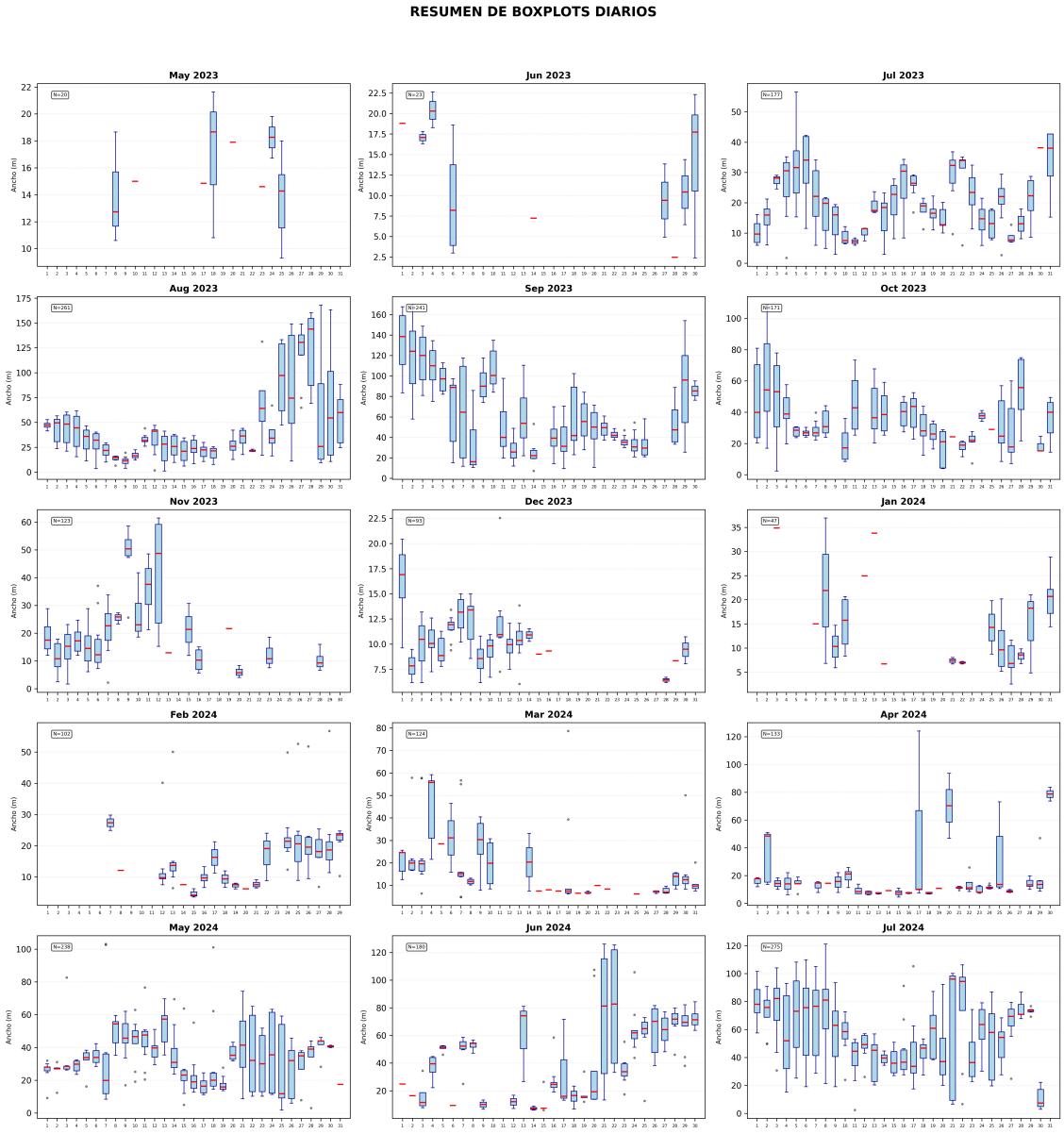


Figura 34: Rango intercuartílico de anchos diarios por mes.

Referencias

Adeline, K. R., Chen, M., Briottet, X., Pang, S. K., & Paparoditis, N. (2013). Shadow detection in very high spatial resolution urban remote sensing images: A comparative study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *80*, 21-38. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.003

Amigo, J., & Ramírez, C. (1998). A bioclimatic classification of Chile: woodland communities in the temperate zone. *Plant Ecology*, *136*(1), 9-26. https://doi.org/10.1023/A:1009714201917

Chen, T.-W., Chen, Y.-L., & Chien, S.-Y. (2008). Fast Image Segmentation Based on K-Means Clustering with Histograms in HSV Color Space. *2008 IEEE 10th Workshop on Multimedia Signal Processing*, 322-325. https://doi.org/10.1109/MMSP.2008.4665097

Chow, V. T. (1973). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill International Editions.

Codiga, D. L. (2011). *Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions* (inf. téc. N.º 2011-01). Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island. ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf

Dhanachandra, N., Manglem, K., & Chanu, Y. J. (2015). Image Segmentation using K-means Clustering Algorithm and Subtractive Clustering Algorithm. *Procedia Computer Science*, *54*, 764-771. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.090

Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, 226-231. https://cdn.aaai.org/KDD/1996/KDD96-037.pdf

Flanders Marine Institute (VLIZ) & Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). (2023). Sea level station monitoring facility [Accedido el 8 de febrero de 2026].

Hayes, M. O. (1975). Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. En L. E. Cronin (Ed.), *Estuarine Research: Volume II Geology and Engineering* (pp. 3-22). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-197502-9.50006-X

Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, *31*(8), 651-666. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011

Kjerfve, B. (1986). Comparative oceanography of coastal lagoons. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *23*(1), 63-81. https://doi.org/10.1016/0272-7714(86)90088-1

León, K., Mery, D., Pedreschi, F., & León, J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, *39*(10), 1084-1091. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006

Malhadas, M. S., Silva, A., Leitão, P. C., & Neves, R. (2009). Effect of coastal waves on sea level in Óbidos Lagoon, Portugal. *Continental Shelf Research*, *29*(10), 1240-1252. https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.02.007

McSweeney, S. L., Kennedy, D. M., Rutherfurd, I. D., & Stout, J. C. (2017). Intermittently Closed/Open Lakes and Lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*, *292*, 142-152. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.036

Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Ruiz, L. A., & Palomar-Vázquez, J. (2012). Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, *123*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024

Perlibakas, V. (2004). Distance measures for PCA-based face recognition. *Pattern Recognition Letters*, *25*(6), 711-724. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.01.011

Pritchard, D. W. (1967). What is an estuary: physical viewpoint. En G. H. Lauff (Ed.), *Estuaries* (pp. 3-5). American Association for the Advancement of Science.

Roy, P. S., Williams, R. J., Jones, A. R., Yassini, I., Gibbs, P. J., Coates, B., West, R. J., Scanes, P. R., Hudson, J. P., & Nichol, S. (2001). Structure and function of south-east Australian estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *53*(3), 351-384. https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0796

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, 517-524. https://doi.org/10.1145/800186.810616

SHOA. (2023). *Instrucciones Oceanográficas Nº1: Especificaciones Técnicas y Administrativas para Mediciones y Análisis Oceanográficos* (5.ª ed.). Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Sinnott, R. W. (1984). Virtues of the Haversine. *Sky and Telescope*, *68*(2), 158-159.

Soto, R. (2024). Desarrollo de un modelo hidrodinámico para la Laguna Cáhuil considerando mareas oceánicas y aportes fluviales.

Vincent, L. (1993). Morphological grayscale reconstruction in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE transactions on image processing*, *2*(2), 176-201.

Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, *122*, 104528. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528