UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAISO - CHILE

MODELACIÓN NUMÉRICA DE DESCARGA DE RIO EN ZONA DE ROMPIENTE DEL OLEAJE

JOSE MIGUEL FREDES ORDENES

INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA: RAUL FLORES AUDIBERT

MAYO 2022

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAISO - CHILE

MODELACIÓN NUMÉRICA DE DESCARGA DE RIO EN ZONA DE ROMPIENTE DEL OLEAJE

Memoria de título presentada por

JOSE MIGUEL FREDES ORDENES

Como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Civil

PROFESOR GUÍA: RAUL FLORES AUDIBERT

MAYO 2022

Resumen

Las descargas de agua dulce de pequeña escala son características comunes en costas alrededor del mundo y representan una fuente importante de agua dulce, sedimentos y nutrientes para el océano costero. Existe un interés ecológico, productivo y turístico por conocer el destino de los materiales que ingresan al océano desde los ríos debido al impacto que tienen en la calidad del agua, la morfología costera y los ciclos bioquímicos a lo largo de la costa adyacente. La dinámica de los flujos de salida de ríos pequeños puede verse fuertemente influenciada por el forzante de oleaje en la costa, ya que frecuentemente la descarga debe interactuar con las regiones más energéticas de la zona de surf (o zona de rompiente). Distintos autores han intentado predecir el destino de las aguas transportadas desde tierra al océano, mediante modelos conceptuales que recurren a escalas de longitud basadas en parámetros del flujo relevantes y representativos de la interacción rio-oleaje, como por ejemplo momentum de salida de la descarga costera, velocidad de la corriente a lo largo de la costa inducida por la rotura del oleaje, diferencia de densidad entre el agua fresca de la descarga y el agua salada del océano (flotabilidad de la descarga) y ancho de la zona de rompiente. Continuando con esta línea de estudio, este trabajo pretende implementar un modelo conceptual de clasificación basado en tres escalas de longitud: la escala de longitud de la pluma en el campo cercano (L_{NF}), la cual predice la región en que el flujo de salida de la descarga está controlado por el impulso de chorro o jet por sobre su flotabilidad (Hetland, 2010, Kastner et al., 2019), la escala de longitud de flujo cruzado (L_a), que representa la longitud característica para que la descarga se curve debido a corrientes longitudinales por oleaje dentro de la zona de surf (Jones et al., 2007; Wong et al., 2013), y finalmente el ancho de la zona de rompiente del oleaje (L_{sz}). La magnitud relativa de L_a y L_{NF} con respecto al ancho de la zona de surf (L_{sz}) proporciona un marco para predecir el destino de las aguas del rio en el sistema costero. En este trabajo se emplean simulaciones numéricas detalladas para probar la capacidad y aplicabilidad de estas escalas de longitud para predecir el destino de las aguas del río. Se utiliza el modelo numérico no hidrostático SWASH (Zijlema et al., 2011) para simular la interacción entre el flujo de salida de una descarga boyante y un campo de oleaje incidente sobre una batimetría idealizada de pendiente constante. Con el objetivo de reproducir la variabilidad existente del impulso de salida de la descarga y la magnitud de la corriente costera, las ejecuciones del modelo varían el caudal de rio, altura y dirección del oleaje costa afuera.

Los resultados muestran la capacidad presentada por el modelo numérico para reproducir la interacción rio-oleaje, bajo distintos escenarios de parámetros que definen la descarga y el campo de oleaje. Para cada simulación se calcula la magnitud relativa entre las escalas de longitud L_{NF} y L_a con respecto al ancho de la zona de surf L_{sz}, los que son utilizados para predecir si la descarga escapa o queda atrapada en la zona de surf. Las predicciones se comparan respecto a lo observado en las simulaciones numéricas respecto a escapes o atrapamiento. Se concluye que el esquema de clasificación predice adecuadamente el comportamiento de la hidrodinámica y lo esperable en términos del destino final del agua de la descarga.

Abstract

Small-scale freshwater outflows are common features of coastlines worldwide and represent an important source of freshwater, sediment and nutrients to the coastal ocean. There is an ecological, productive and tourist interest in knowing the destination of the transported materials due to the impact they have on water quality, coastal morphology and biochemical cycles along the adjacent coast. Normally the dynamics of small river outflows can be strongly influenced by the nearshore wave forcing as they must often interact with the most energetic surf zone region. It is possible to know the destination of a coastal discharge through various methods such as simulations, records, image analysis and the particular case of this study conceptual models based on the use of length scales using dynamic flow parameters that are relevant to the wave-river interaction such as river outflow momentum, wave-driven alongshore current, and river buoyancy (e.g., Jones et al., 2007; Wong et al., 2013; Kastner et al., 2019). The length scales used are the length of the near field plume length (L_{NF}), which predicts the region in which the momentum of a jet, rather than its buoyancy, controls the flow (Kastner et al., 2019) and the cross-flow length scale (L_a) which can be interpreted as the characteristic length scale for the jet to become bent by the alongshore current (Jones et al., 2007; Wong et al., 2013). The relative magnitude of these length scales are compared to the surfzone width (L_{sz}) provides a framework to predict the fate of river waters in the coastal system. In this work, we use detailed numerical simulations to further test the capacity and applicability of these length scales in predicting the fate of river water. We use the non-hydrostatic SWASH model (Zijlema et al., 2011) to simulate the interaction between a buoyant river discharge and an incident wave field over an idealized gently sloping beach bathymetry. Model runs vary the river discharge, offshore wave height and direction, to reproduce variability in river outflow velocity, incident wave momentum flux and alongshore current magnitude.

Glosario

Along-shore	Paralelo a la línea de costa.
Cross-shore	Perpendicular a la línea de costa.
C_r	Número de Courant.
d	Profundidad batimétrica sin oleaje.
F_r	Número de Froud.
g	Aceleración de gravedad.
g'	Aceleración de gravedad reducida.
H	Altura de ola costa afuera.
h_p	Altura de la pluma.
H_s	Altura significativa de ola.
J_0	Boyancia de la descarga.
L_a	Escala de longitud del flujo cruzado (Cross Flow Length Scale).
L_{NF}	Escala de longitud del campo cercano (Near-field Plume Length Scale).
L_{sz}	Ancho de la zona de surf, distancia entre el borde costero y la línea de rotura de olas.
M_0	Momentum de salida de la descarga.
Q	Caudal de entrada en modelo.
Q_0	Caudal de salida de la descarga.
Ri_{b0}	Número de Richardson.
s	Pendiente de la playa.
SWASH	Nombre del modelo numérico, proviene del acrónimo en inglés Simulating WAves till SHore.
T	Periodo de ola.
U	Velocidad instantánea en dirección along shore.
U_L	Velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección along-shore (Lagrangian wave-averaged velocity).
U_{sz}	Velocidad de onda lagrangiana promedio peak zona de surf en dirección along-shore.
v_0	Velocidad media temporal y espacial en la salida de la descarga.
V	Velocidad instantánea en dirección cross-shore.
V_L	Velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección cross-shore (Lagrangian wave-averaged velocity).
w	Ancho del canal de descarga.

x	Coordenada en dirección along-shore.
y	Coordenada en dirección cross-shore.
α	Parámetro de ajuste modelo numérico para inicio de rotura de ola.
β	Parámetro de ajuste modelo numérico para término de rotura de ola.
γ	Razón de rotura de ola (H_s/d).
δ	Taza de arrastre normalizada.
θ_0	Ángulo de oleaje costa afuera.
ρ_0	Densidad de la descarga.
ρ_a	Densidad del océano ambiental.

Índice

1 Introducción 11
2 Objetivos 13
2.1 Objetivos Generales 13
2.2 Objetivos específicos 13
3 Marco conceptual 14
3.1 Procesos de la zona de surf 14
3.2 Corrientes inducidas por rotura del oleaje 14
3.3 Procesos de la descarga 14
3.4 Escalas de longitud asociadas a la interacción río-oleaje 15
3.5 Esquema conceptual de clasificación 16
4 Métodos 18
4.1 Modelo SWASH 18
4.2 Configuración de modelo 18
4.3 Parámetros Físicos 20
4.4 Cantidades de salida 22
4.5 Cantidades derivadas del modelo 22
4.5.1 Ancho zona de surf 22
4.5.2 Velocidad representativa en la zona de surf 23
4.5.3 Escala de longitud de la pluma en el campo cercano, LNF 24
4.5.4 Escala de longitud del flujo cruzado 25
5 Resultados 25
5.1 Modelación numérica y teoría lineal del oleaje 25
5.2 Relación altura de ola y corriente zona de surf 26
5.3 Resultados modelación: Casos base 29
5.3.1 Caso sin oleaje 29
5.3.2 Caso oleaje perpendicular 31
5.4 Casos oleaje oblicuo 32
5.5 Perfiles velocidad y Perfil teórico 36
5.6 Resultados escalas de longitud $\boldsymbol{LNF}$ y $\boldsymbol{La}$ 38
5.7 Esquema grafico de clasificación 40
6 Discusión 43
6.1 Configuración modelo numérico 43
6.2 Esquema conceptual de clasificación 44

6.3 Esquemas conceptuales de clasificación alternativos 45
6.3.1 Esquema de clasificación a partir de $\boldsymbol{LNF, Fr = 1}$ 45
6.3.2 Esquema de clasificación a partir de $\boldsymbol{LNF, Fr = 1\ y\ Lsz, red}$ 46
6.4 Calculo simplificado de escalas de longitud 47
6.5 Casos distinto periodo de ola 51
7 Conclusiones 53
8 Referencias 56
9 Anexos 58
9.1 Archivo tipo modelo numérico SWASH 58
9.2 Resultados simulaciones 60

Índice de Figuras

Figura 1: 12
Figura 2: Representación gráfica plumas, en distintos estados hidrodinámicos. 16
Figura 3: Esquema grafico del modelo conceptual de clasificación 17
Figura 4: Configuración modelo numérico 19
Figura 5: Distribución capas verticales modelos numéricos 19
Figura 6: Discretización vertical de ecuaciones: (a) modelo estándar y (b) modelo de caja 22
Figura 7: (a) Altura significativa 23
Figura 8: Resultados modelo y Teoría Lineal del Oleaje 26
Figura 9: Relación altura de ola y corrientes costeras 27
Figura 10: Velocidad de onda lagrangiana promedio y función aproximada 29
Figura 11: Resultados modelo sin oleaje y descarga Q=50 [m^3/s] 30
Figura 12: Resultados perfil cross-shore modelo sin oleaje y descarga Q=50 [m^3/s] 31
Figura 13: Resultados modelo oleaje perpendicular y descarga Q=50 [m^3/s] 32
Figura 14: Resultados modelos para diferentes condiciones de oleaje 33
Figura 15: Resultados perfiles cross-shore modelos para diferentes condiciones de oleaje 34
Figura 16: Resultados modelos para diferentes condiciones de caudal 35
Figura 17: Resultados modelo H_0=1 [m], Θ_0=25° y Q=50 [m^3/s] 36
Figura 18: Perfil teórico de velocidad y resultados de simulaciones 37
Figura 19: Esquema grafico de clasificación mediante $LszLa$ y $LNFLsz$ 41
Figura 20: Resultados simulaciones mal clasificadas 42
Figura 21: Esquema de clasificación mediante $LszLa$ y $LNF, Fr = 1Lsz$ 46
Figura 22: Esquema de clasificación mediante $LszLa$ y $LNF, Fr = 1Lsz, red$ 47
Figura 23: Variación porcentual de estimación simplificada escalas de longitud 49
Figura 24: Esquema grafico de clasificación, escalas de longitud $LszLa$ y $LNFLsz$ simplificadas... 50
Figura 25: Resultados modelos para diferentes periodos de ola 51
Figura 26: Resultados modelos para diferentes periodos de ola (2) 52
Figura 27: Esquema grafico de clasificación para escalas de longitud $LszLa$ y $LNFLsz$ 54

Índice de tablas

Tabla 1: Condiciones y comportamiento del esquema conceptual de clasificación. 17
Tabla 2: Parámetros de entrada simulaciones numéricas. 20
Tabla 3: Velocidad máxima corriente costera 27
Tabla 4: Calculo función de ajuste velocidad máxima corriente costera 28
Tabla 5: Parámetros de cálculo perfil de velocidad teórico..... 37
Tabla 6: Resumen resultados simulaciones numéricas 38
Tabla 7: Clasificación de simulaciones mediante salinidad superficial..... 39
Tabla 8: Simulaciones con clasificación inconsistente..... 41
Tabla 9: Simplificaciones para cálculo estimado de escalas de longitud..... 48
Tabla 10: Estimación de escalas de longitud mediante expresiones simplificadas. 49
Tabla 11: Esquema conceptual de clasificación propuesto. 54

1 Introducción

Chile posee una de las costas más extensas del mundo, a lo largo de la cual descargan múltiples ríos que nacen en la Cordillera de los Andes y transportan una gran variedad de sustancias y materiales hacia la costa, alterando fuertemente su composición química y biológica (Li et al., 2015; Masotti et al., 2018; Saldías et al., 2016). Las descargas costeras típicamente son más frescas que el océano ambiental en el cual descargan, pero están cargados de componentes que derivan de las actividades urbanas y agrícolas (Ruiz et al., 2012).

Las condiciones geográficas y climáticas de las cuencas chilenas causan que la mayoría de los ríos de la zona central formen descargas costeras de pequeña escala, con caudales bajos y altamente estacionales, razón por la cual el forzante del oleaje se transforma en un agente dinámico muy importante para determinar el destino final de las aguas y materiales a lo largo del sistema costero. Conocer el destino final de los materiales transportados es relevante debido al interés en las zonas costeras desde el punto de vista ecológico, ecosistémico, productivo y turístico. Por ejemplo, cada año gran cantidad de personas llegan a la costa y utilizan las playas sin tener conocimiento previo de los peligros sanitarios que el agua pueda contener. A raíz de la importancia del monitoreo de la calidad de agua, es necesario contar con un modelo genérico simple, que permita estimar el arrastre de contaminantes de las descargas costeras en la zona de surf, para condiciones hidrodinámicas típicas de las costas chilenas.

Desde una mirada simplificada, el proceso de interacción río-oleaje se puede entender hidrodinámicamente como dos procesos que ocurren de forma simultánea; en primer lugar, el caudal transportado por el rio entra en una zona en la cual existe un flujo cruzado, producto de las corrientes generadas por el oleaje, que puede curvar y confinar la descarga dentro de esta región (Rodriguez et al., 2018; Wong et al., 2013). Simultáneamente, producto del gradiente de densidad entre agua fresca de la descarga y el agua salada del océano, se genera un efecto de flotabilidad de forma que la descarga gradualmente pierde su momentum inicial y se transforma en una pluma que se propaga por la superficie del océano (Kastner et al., 2019). Históricamente, han existido esfuerzos de distintos autores para predecir el destino final de las aguas que fluyen por ríos hacia la costa, típicamente a través de modelos conceptuales (Jones et al., 2007; Wong. Et al., 2013; Kastner et al., 2019) basados en escalas de longitud representativas de la descarga y del campo de oleaje. Si bien algunos estudios han incorporado mediciones en terreno, la dificultad intrínseca de realizar mediciones en la zona de rompiente del oleaje, y más aún en presencia de fuertes corrientes debido a la descarga fluvial, abre espacio a la modelación numérica que surge como poderosa herramienta alternativa para probar estos modelos conceptuales y proponer mejoras.

Este trabajo busca contribuir al entendimiento de la dinámica en zonas de descarga de ríos pequeños que descargan directamente en la zona de rompiente del oleaje, utilizando un enfoque de modelación numérica a través del modelo SWASH (Simulating WAves Till Shore; Zijlema et al., 2011). En particular, se buscará implementar un modelo idealizado representativo de la desembocadura de un río de pequeña escala con diversos escenarios de oleaje (altura, dirección y período) y caudal de descarga, con énfasis en la determinación de escalas de longitud representativas usadas en la literatura para predecir si el agua fresca de una descarga lograría superar la zona de surf o queda atrapada en ella. En particular, el análisis se basa en la escala de

longitud de la pluma en el campo cercano (L_{NF}), la cual predice la región en que el flujo de salida de la descarga está controlado por el impulso de chorro o jet por sobre su flotabilidad (Hetland, 2010, Kastner et al., 2019). También se utiliza la escala de longitud del flujo cruzado (L_a) como la longitud característica para que el chorro se doble por la corriente a lo largo de la costa dentro de la zona de surf (Jones et al., 2007; Wong et al., 2013). Estas escalas son combinadas con el ancho de la zona de surf (L_{sz}) para generar un marco de predicción para el destino de las aguas del rio en el sistema costero.

Figura 1: *Imagen desembocadura Rio Maipo. Línea Segmentada señala el límite de la zona de surf.* ***Fuente:*** *Campaña de terreno proyecto de investigación FONDECYT 11190378.*

Objetivos

1.1 Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo es elaborar un modelo numérico no hidrostático, usando el software SWASH, que permita analizar la interacción del oleaje con descargas costeras para distintas condiciones de oleaje y caudales representativos de regímenes hidrológicos y oceánicos de la zona central de Chile, a fin de evaluar la viabilidad de caracterizar la dinámica de la pluma de una descarga mediante la magnitud relativa de ciertas escalas de longitud.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar la variación hidrodinámica representada mediante las escalas de longitud del flujo cruzado y escala de longitud del campo cercano de la zona de desembocadura bajo distintas condiciones de oleaje, caudal de descarga y batimetría.
- Evaluar de forma cuantitativa parámetros y escalas relevantes en el problema pequeñas descargas costeras propuestos en estudios anteriores (Wong et al., 2013; Rodríguez et al., 2018; Kastner et al., 2019), con finalidad de evaluar teorías recientes de interacción río-oleaje y pronosticar el destino de las aguas del río.
- Evaluar la capacidad de un modelo numérico idealizado en SWASH de reproducir la dinámica de la interacción río-oleaje en condiciones simplificadas.

2 Marco conceptual

2.1 Procesos de la zona de surf

El oleaje incidente avanza hacia la costa y producto de la limitación en la profundidad que impone la batimetría el oleaje rompe, dando lugar y controlando los procesos físicos de la zona de surf. La rotura de olas ocurre en un valor critico de $\gamma = H_s/d$, donde H_s corresponde a la altura significativa y d es a la profundidad (Miche, 1944). Las observaciones sugieren que este parámetro crítico tomará un valor dentro el rango $0.3 < \gamma < 0.6$ (Janssen & Battjes, 2007, Raubenheimer et al., 1996).

La circulación más fuerte dentro de la zona de surf se produce a lo largo de la costa como resultado de la rotura de las olas que inciden oblicuamente (Longuet-Higgins, 1970). En la dirección "perpendicular" a la costa generalmente no existe un intercambio relevante, a excepción de singularidades como las corrientes de resaca o descargas costeras, que pueden ser lo suficientemente energéticas para generar un intercambio significativo (Hally-Rosendahl & Feddersen, 2016; Shepard & Inman, 1950).

2.2 Corrientes inducidas por rotura del oleaje

Las corrientes costeras son un mecanismo de transporte de sedimentos y agua fresca en dirección paralela a la costa muy importante. Este agente hidrodinámico es reconocible mediante una simple observación visual, se puede ver claramente que la corriente esta confinada en la zona de surf y decrece rápidamente en magnitud fuera de ella.

El mecanismo de generación de corrientes en la zona de surf se explica a través del tensor de radiación del flujo de momentum (Longuet-Higgins, 1970). Tomando como referencia el sistema coordenado mostrado en la Figura 4, las componentes normales del tensor de radiación corresponden a S_{yy} asociada al flujo de momentum en dirección perpendicular a la costa y S_{xx} la cual representa el resultado del oleaje en las presiones hidrodinámicas en dirección paralela a la costa. Si el oleaje incide oblicuamente hacia la costa, el tensor de radiación tendrá otra componente correspondiente a S_{yx} la cual denota el flujo de momentum del oleaje asociado a la componente en dirección paralela a la costa, en el caso que el oleaje se propague perpendicularmente esta componente del tensor vale cero.

A medida que las olas se acercan a la costa la profundidad del lecho marino se reduce induciendo la rotura del oleaje, la cantidad de movimiento asociado al gradiente del tensor de radiación S_{yx} se comienza a disipar aportando momentum al balance de cantidad de movimiento en dirección paralela a la costa aportando así energía al flujo medio en dirección a la costa lo que se conoce como corriente litoral (Bowen, 1969; Longuet-Higgins, 1970; Thornton, 1970).

2.3 Procesos de la descarga

Las descargas costeras son relevantes ya que constituyen la fuente más importante de transporte de agua fresca desde el continente al océano. El comportamiento dinámico de las plumas depende del momentum de salida y de la diferencia de densidad respecto al océano (flotabilidad). En base a estas características se definen regiones donde uno de los efectos domina por sobre otros (Jones et

al., 2007; Hetland, 2010), habitualmente utilizando el número de Froude, $Fr = v/\sqrt{g'h_p}$, donde v corresponde a la velocidad de la capa superior, h_p es la altura de la pluma y $g' = g\Delta\rho/\rho_0$ es la gravedad reducida del sistema, $\Delta\rho$ es la diferencia de densidad entre la pluma y el océano mientras que ρ_0 corresponde a la densidad del océano. Se conoce como el campo cercano de una pluma a la región donde los efectos del impulso son más importantes que los efectos de flotabilidad, en esta región encontraremos que $Fr > 1$ (Hetland, 2010), a medida que avanzamos por la descarga veremos que el número de Froude comienza a disminuir y la descarga a perder impulso producto de la mezcla y dispersión existentes hasta que $Fr = 1$, delimitando así el final de la región del campo cercano. A partir de este punto producto del gradiente de densidad entre el agua fresca de la descarga y el agua salada de la costa los efectos de flotabilidad pasan a controlar la dinámica del flujo de la descarga, el agua de la descarga al ser menos densa formara una pluma en la superficie por la cual se propagara costa afuera.

2.4 Escalas de longitud asociadas a la interacción río-oleaje

Las descargas costeras (ríos, canales, esteros, etc) que ingresan directamente al mar generan una pluma, cuyo comportamiento se deriva directamente a las características físicas de la descarga como caudal, temperatura, salinidad, sedimentos, etc. y a las propiedades hidrodinámicas del campo de oleaje incidente (Fischer et al., 1979; Jirka et al., 1981; Jones et al., 2007). Este trabajo pretende analizar esta compleja interacción a partir de escalas de longitud representativas de la dinámica de la descarga y la zona de rompiente del oleaje, tales como el ancho de la zona de surf, L_{sz}; Longitud de la pluma de campo cercano, L_{NF} (Hetland, 2010) y la escala del flujo cruzado, L_a (Jones et al., 2007; Wong et al., 2013).

La zona de surf corresponde a la región del océano donde el oleaje se encuentra en rotura, y su extensión depende principalmente del estado de la marea, la batimetría del lecho marino y propiedades del oleaje como altura y periodo de ola. El ancho de la zona de surf, L_{sz}, geométricamente corresponde a la distancia que va desde la línea de costa hasta la ubicación donde el oleaje comienza a romper costa afuera. Para efectos de los análisis aquí realizados, se considera el ancho de la zona de surf como un valor fijo, pero es importante destacar que en condiciones realistas de batimetría y oleaje el ancho de zona de surf no es uniforme a lo largo de la costa.

La longitud de la pluma de campo cercano, L_{NF}, se determina según (Hetland, 2010; Kastner et al., 2019)

$$L_{NF} = \frac{M_0^{3/4}}{J_0^{1/2}\delta^{3/4}} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Donde $M_0 = v_0 Q_0$ corresponde al momentum de la descarga, $J_0 = g'Q_0$ a la flotabilidad y $\delta = w_e/v_0$ (tasa de arrastre normalizada). En estas expresiones, v_0 es la velocidad de la pluma, Q es el caudal y w_e corresponde a la velocidad de arrastre (Yuan & Horner-Devine, 2013). Esta expresión está definida para el punto que $Fr = 1$. Una suposición crítica para el uso de L_{NF} es que la pluma debe encontrarse en un estado estable, es decir, la hidrodinámica costera no debe presentar grandes variaciones temporales. La escala de longitud del campo cercano predice la región donde

los efectos del impulso de una descarga controlan su dinámica por sobre los efectos de flotabilidad (Jones et al., 2007).

La escala de longitud del flujo cruzado (Wong et al., 2013), se define mediante el cociente entre el momentum de salida de la descarga y la velocidad de la zona de surf en dirección alongshore:

$$L_a = \frac{{M_0}^{1/2}}{U_{sz}} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

Donde M_0 corresponde al momentum de la descarga y U_{sz} corresponde a la velocidad máxima de la zona de surf, en dirección paralela a la costa y generada por el oleaje.

La Figura 2 es una representación gráfica de las plumas bajo distintos estados de control hidrodinámico.

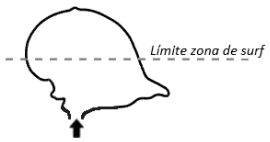
Control del Rio	*Control del oleaje*	*Control de las corrientes*	*Control de las corrientes o del oleaje*
			*Combinación de casos de control de oleaje o control corrientes.*

Figura 2: *Representación gráfica plumas, en distintos estados hidrodinámicos.*

En la Figura 2, se observan tres estados hidrodinámicos de la pluma de una descarga costera. En primer lugar se muestra a la pluma de la descarga cruzar zona de surf producto de un momentum de salida relativamente alto en comparación con los otros agentes hidrodinámicos. En segundo lugar, se observa una pluma atrapada en la zona de surf pero con intrusiones aguas arriba de la corriente costera lo cual indica que el oleaje controla la dinámica atrapando la pluma en la zona de surf y condicionándola a transportarse lateralmente dentro de ella. Y finalmente se muestra una pluma atrapada en la zona de surf y curvada por las corrientes, en este la dinámica del sistema está controlada por las corrientes que se generan a partir de la rotura del oleaje. También podrán existir casos donde el control de las corrientes o del oleaje sea indistinguible uno de otro.

2.5 Esquema conceptual de clasificación

Dado el fuerte clima de oleaje presente en la costa y el rango de caudales que se transportan por los ríos chilenos, se espera que la hidrodinámica costera sea resultado de la interacción de las corrientes longitudinales de la zona de surf, el momentum de salida del río y el nivel de turbulencia y mezcla presente en la zona de surf, conceptualmente se espera que estos sean los principales factores.

El esquema conceptual de clasificación estudiado consta de dos ejes (Figura 3), combinando lo propuesto por Wong et al., (2013) y lo propuesto por Kastner et al., (2019). Como primer eje de clasificación se emplea la magnitud relativa entre longitud de la pluma de campo cercano y al ancho de la zona de surf. Cuando la descarga tenga un impulso lo suficientemente grande que le permita escapar de la zona de surf se espera encontrar que L_{NF} sea mayor que L_{sz} (Kastner et al., 2019). Por

otro lado, se pretende evaluar la dinámica mediante la escala de flujo cruzado, que representa la magnitud relativa entre la velocidad alongshore de la zona de surf versus el impulso que tiene la descarga. Esta escala indicaría la dificultad o facilidad que tiene la descarga de atravesar una zona con esa corriente. De acuerdo a lo propuesto por Wong et al. (2013), se espera que la descarga se encuentre confinada en la zona de surf producto de las corrientes cuando $L_{sz}/L_a > 10$. Con los límites de clasificación propuestos, se clasifica el comportamiento del sistema costero (Tabla 1), lo que permite predecir el destino de las aguas de la descarga.

Tabla 1: *Condiciones y comportamiento del esquema conceptual de clasificación.*

Clasificación		**Comportamiento**	**Control**
L_{sz}/L_a	L_{NF}/L_{sz}		
> 10	> 1	Las corrientes a lo largo de la costa atrapan dentro de la zona de surf el flujo de la descarga, a pesar de que el impulso del rio sea lo suficiente para vencer el forzante de oleaje.	Control de las corrientes
> 10	< 1	El oleaje incidente y la corriente costera son capaces por si solos de atrapar el flujo de la descarga en la zona de surf.	Control de las corrientes o del oleaje
< 10	< 1	El oleaje incidente atrapa el agua del rio por la pérdida de momentum que genera en la descarga. La corriente en la zona de surf es insuficiente por si sola para confinar la descarga.	Control del oleaje
< 10	> 1	El impulso de la descarga es lo suficientemente fuerte para superar el forzante de oleaje y la corriente costera logrando escapar de la zona de rompiente.	Control del rio

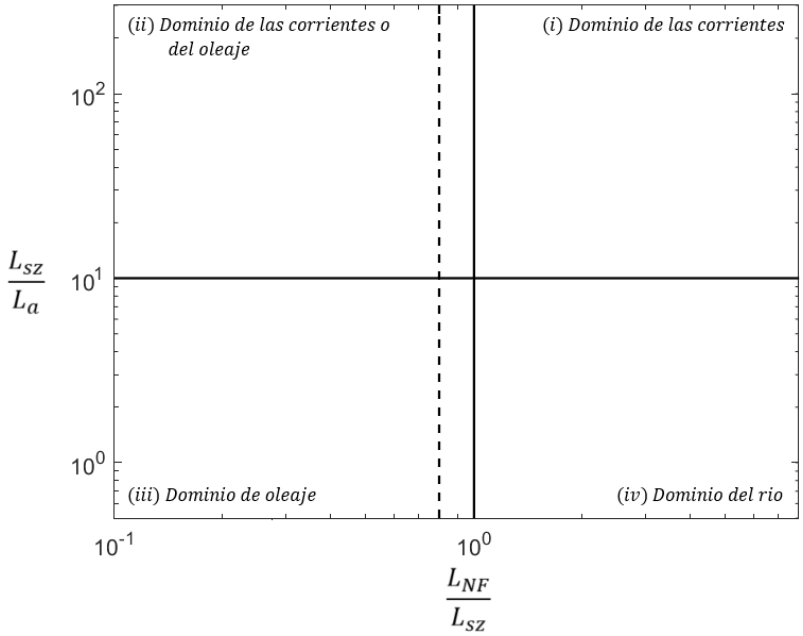


Figura 3: *Esquema grafico del modelo conceptual de clasificación. Las líneas continuas representan los límites de clasificación y la línea segmentada indica corresponde a una fracción del límite en el cual Kastner (2019) indica que existe una alta probabilidad de que la descarga escape de la zona de surf.*

3 Métodos

3.1 Modelo SWASH

Se realizaron una serie de experimentos numéricos en el modelo hidrodinámico SWASH (Simulating WAves till Shore), versión 7.01 (Zijlema et al., 2011), en el cual se simuló la dinámica, el transporte y difusión de salinidad para un río que descarga en una playa con una batimetría idealizada bajo variadas condiciones de oleaje y caudal.

El modelo SWASH corresponde a la implementación numérica de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes, incluyendo la presión no hidrostática para flujo incompresible. Esta herramienta se emplea para predecir la transformación de las olas superficiales dispersivas de la costa a la playa. Por lo tanto puede ser usada en el estudio de la zona de surf, zona de swash, estuarios, agitación de puertos, etc. En caso particular de este estudio se emplea para estudiar la zona de surf ya que permite simular la propagación y rotura del oleaje junto con fenómenos de transporte (temperatura, sedimentos y salinidad) hasta en tres dimensiones espaciales. La construcción de SWASH le permite ser aplicado a una amplia gama de escalas de tiempo y espacio. La dispersión turbulenta vertical de momentum y la difusión de la carga de sal, calor y sedimentos se modelan mediante el modelo de turbulencia estándar $k - \varepsilon$ (Mohammadi et al., 1993; Launder et al., 1974), incluido en SWASH.

Es importante destacar que SWASH no es un modelo de onda tipo Boussinesq. La estructura vertical del flujo es parte de la solución. Se puede ejecutar SWASH en modo profundidad promedio (solo una capa) o en modo multicapa en el que el dominio computacional se divide en un número fijo de capas verticales.

Los procesos físicos más importantes incluidos en los experimentos numéricos realizados en este estudio corresponden a la refracción de olas debido a la batimetría y corrientes, perdida de energía de ola debido a la fricción de fondo, rotura de olas, transporte y difusión de salinidad.

El modelo SWASH se encuentra altamente validado, se ha utilizado en muchos estudios y publicaciones científicas, se ha aplicado en estudios de simulación de oleaje, modelación de ondas de infragravedad, interacción de olas con espigones o rompeolas, etc.

3.2 Configuración de modelo

Este estudio está enfocado en analizar la dinámica costera derivada de la interacción de un campo de oleaje incidente y una descarga de agua relativamente más fresca, buscando aislar otros factores que puedan influir el desarrollo de la pluma. Por tanto, el modelo propuesto no considera mareas o condiciones batimétricas que generen impacto en las corrientes costeras, por ejemplo, en la generación de corrientes de resaca.

El dominio computacional del modelo se divide en 333 x 400 celdas en la dirección cross-shore y along-shore, respectivamente, con tamaño uniforme de 3 x 3 [m] generando un dominio total de 999 x 1200 [m] (Figura 4). La descarga utilizada tiene un ancho de 24 metros y se ubica en la zona sur del modelo ya que se espera que las corrientes generadas acorde a la dirección impuesta para

el oleaje incidente transporten la pluma hacia el norte (Figura 4). El modelo se ejecuta en modo multicapa utilizando 5 capas distribuidas equidistantemente (Figura 5).

Todos los modelos utilizan la misma batimetría con pendiente de playa constante e igual a 0.015. La batimetría se extiende desde una profundidad máxima de 10 [m] costa afuera hasta una altura de 0.80 [m] en la costa (Figura 5).

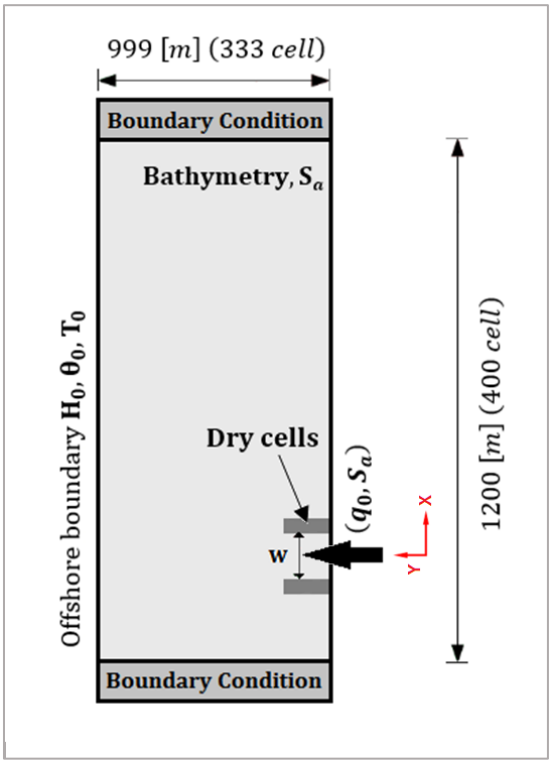


Figura 4: *Configuración modelo numérico, condiciones costa afuera, de borde, descarga y discretización horizontal del modelo numérico.*

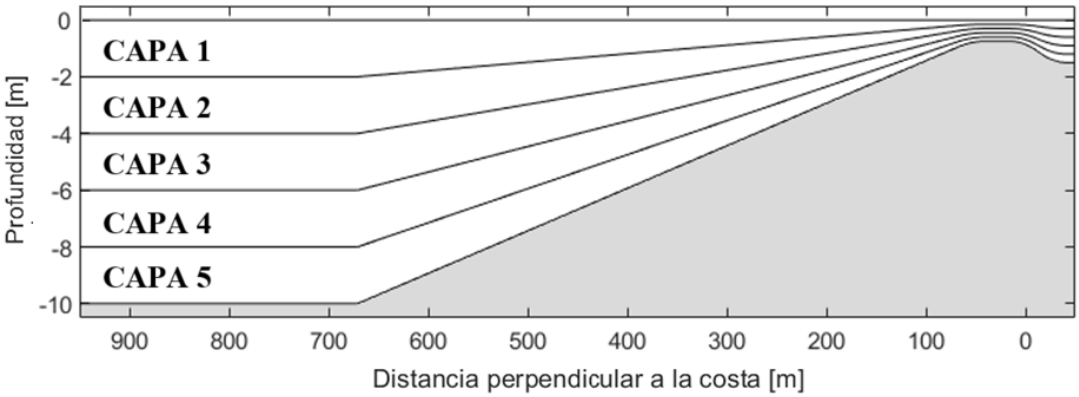


Figura 5: *Distribución capas verticales modelos numéricos.*

La batimetría es uniforme en la dirección alongshore (eje x) y se impone un campo de oleaje regular como condición de borde en el límite izquierdo del dominio. Además, se especifican condiciones de borde periódicas en los extremos norte y sur, para eliminar la posibilidad de que se genere reflexión, corrientes o errores numéricos en los bordes del modelo que puedan afectar el proceso de interacción río-oleaje. Conceptualmente, se espera que el oleaje se propague hacia la costa, comience a romper y generar corrientes con transporte de masa en dirección x positiva. Fuera de la zona de rompiente del oleaje, se esperaría que las partículas de agua tengan movimientos orbitales y solamente se propague energía en forma de oleaje.

Considerando que SWASH no cuenta con arranque en caliente, es decir, no se puede comenzar la simulación a partir de un estado en el cual la descarga y el oleaje ya se encuentren interactuando, se optó por establecer condiciones iniciales con salinidad uniforme de 35 [psu] en todo el dominio a excepción del borde aguas arriba de la descarga en la cual se estableció una salinidad de 0 [psu]. Una vez iniciada la simulación, comienza a ingresar la descarga (con 0 [psu]) a través del canal y a generarse la pluma. La descarga y el oleaje tienen un tiempo de suavizado de 12 y 10 minutos, por lo que en este tiempo el modelo comienza a aumentar gradualmente el caudal de descarga y la altura de oleaje para que la interacción se comience a desarrollar paulatinamente.

Se realizó un total de 40 experimentos numéricos variando 3 parámetros (Tabla 2), altura de ola costa afuera H_0 [m], ángulo de ola costa afuera θ_0 [°] y caudal de descarga Q [m^3s^{-1}]. Los parámetros se variaron en un rango característico de la zona central de Chile.

Tabla 2: *Parámetros de entrada simulaciones numéricas.*

Profundidad de descarga	**h**	[m]	0.75						
Ancho descarga	**w**	[m]	24						
Pendiente	**s**	[-]	0.015						
Periodo de oleaje	**T**	[s]	10	7	14				
Caudal de descarga	**Q**	[m^3s^{-1}]	5	15	25	35	50	70	100
Altura de oleaje	**H_0**	[m]	0	0.5	1	1.5	2*		
Angulo de oleaje	**θ_0**	[°]	10	25					

El forzante de oleaje corresponde a olas monocromáticas de igual altura, periodo y dirección, mientras que la descarga se caracteriza por mantenerse constante durante toda la simulación.

En su mayoría los modelos numéricos se ejecutaron durante de 2700 [s], momento en el cual encontraríamos una hidrodinámica relativamente estable y es posible observar si la descarga del río escapa la zona de rompiente o no. Se utiliza un paso de tiempo $\Delta t = 0.015\ [s]$, este paso de tiempo puede ser controlado por SWASH durante la simulación dependiendo de ciertas condiciones, pero siempre respetando el Número de Courant el cual debe mantenerse entre $0.2 \leq Cr \leq 0.3$ y así evitar inestabilidades numéricas.

3.3 Parámetros Físicos

Otro aspecto importante de la modelación corresponde a la definición de los parámetros físicos que dominan las interacciones entre los flujos. Al hablar de parámetros físicos nos referimos

principalmente a los valores de la viscosidad tanto vertical como horizontal (vertical and horizontal eddy viscosity), difusividad horizontal (horizontal eddy diffusivity), fricción de fondo y parámetros de control de rotura de oleaje.

En el caso de la viscosidad ya sea horizontal o vertical, se define un modelo o esquema para representar el proceso físico y luego se definen los coeficientes requeridos. Para la viscosidad horizontal se utilizó un esquema de viscosidad constante de $0.001\ [m^2/s]$ valor promedio de la viscosidad del agua. Por otra parte, el esquema utilizado en la viscosidad vertical corresponde al modelo *k* - *ε* estándar (Mohammadi et al., 1993; Launder et al., 1974), utilizando los coeficientes recomendados correspondientes a $cfk = 0.07$ (constante relacionada con el arrastre vegetativo para la energía cinética) y $cfe = 0.16$ (constante relacionada con el arrastre vegetativo para la tasa de disipación) (Shimizu et al., 1994). Adicionalmente, por razones de estabilidad numérica, se recomienda definir la viscosidad de fondo (background viscosity) en $0.0001\ [m^2/\ s]$.

El coeficiente de difusividad indica la facilidad con que un soluto se mueve por un disolvente, y en nuestro caso, este parámetro controla el transporte y dispersión de sal en el agua de la descarga y océano. Se define tanto la difusividad vertical como horizontal; la difusividad vertical (vertical eddy diffusivity) se incluye automáticamente para simulaciones en tres dimensiones y se relaciona con el modelo de viscosidad vertical (*k* - *ε* estándar). El valor de la difusividad horizontal (horizontal eddy diffusivity depende del flujo y del tamaño de la grilla de cada simulación en cuestión. Para simulaciones con tamaño de celdas de decenas de metros, el valor se encuentra en el rango 10 a 100 [m^2/s], mientras que para simulaciones de decenas de metros el valor rondaría entre 1 y 10 [m^2/s]. De acuerdo a esto, y considerando el tamaño de grilla (3 metros), se opta por establecer la difusividad horizontal en $0.001\ [m^2/s]$.

Para la fricción de fondo, se sigue la recomendación entregada en el manual de SWASH para la simulación de olas y circulación costera de utilizar un coeficiente de Manning de 0.019.

Es esencial activar el control de rotura de oleaje ya que la resolución vertical de capas es relativamente baja, lo que genera sobreestimación de la influencia del gradiente de presión no hidrostático conduciendo a retardar la transición a la forma característica de una ola en rotura y por lo tanto también al inicio de la disipación. Dado esto, SWASH permite definir dos coeficientes de control, el primero corresponde a parámetro de inclinación máxima α y al parámetro de persistencia β. Estos coeficientes se establecen en los valores por defecto típicos 0.6 y 0.3, respectivamente.

La discretización espacial de las ecuaciones gobernantes en SWASH es en forma de volumen finito. Para la presión no hidrostática, el modelo permite dos ubicaciones para asignar el valor de la incógnita, los cuales pueden ser en el centro de la celda o en la interfaz de la capa, cada uno con sus características. En estas simulaciones se utiliza la primera alternativa, denominada modelo estándar, el cual consiste en ubicar las componentes de las velocidades en el centro de las respectivas caras de las caras de la celda y asignar la presión no hidrostática en el centro de la celda (Figura 6 a).

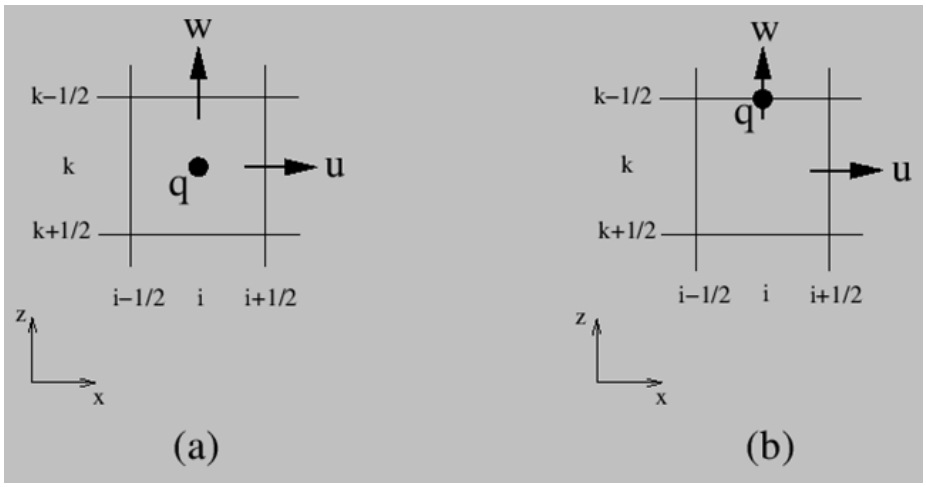


***Figura 6**: Discretización vertical de ecuaciones: (a) modelo estándar y (b) modelo de caja; u es la velocidad horizontal, w es la velocidad vertical y q es la presión no hidrostática. Fuente: Manual de usuario SWASH, Zijlema, M.; Stelling, G.; Smit (2011).*

3.4 Cantidades de salida

La obtención de resultados por parte de las simulaciones está limitada por la capacidad de post procesamiento que se tiene para trabajar sobre los archivos generados con los resultados debido al alto tamaño que presentan los archivos con información de todas las capas y todo el dominio.

En primer lugar, la salinidad instantánea de todas las capas, velocidad instantánea para ambas direcciones en todas las capas, interfaz de todas las capas se obtienen cada 30 segundos a lo largo de toda la simulación. Luego, se obtiene la altura significativa y velocidades media (temporal y en profundidad) para los últimos 40 y 15 minutos de simulación, respectivamente. Finalmente, se obtienen resultados continuos para los últimos tres minutos de simulación con una frecuencia de escritura de 1 [Hz]. Estos archivos son de gran tamaño, e incluyen a la elevación instantánea de la superficie libre y las velocidades instantáneas para todas las capas.

3.5 Cantidades derivadas del modelo

3.5.1 Ancho zona de surf

El ancho de la zona de surf corresponde a la distancia entre la línea de costa y la ubicación costa afuera en la cual el oleaje comienza a romper. En primer lugar, la línea de costa está marcada por el término de las corrientes costeras, y se determina a partir del registro de velocidades de las simulaciones. En segundo lugar, el límite costa afuera que representa el inicio de la zona de rompiente se determina a partir de la altura significativa en este cálculo se determina la coordenada “y” para el máximo de la altura significativa de todos los perfiles cross-shore del modelo. Luego, se calcula el promedio de la coordenada “y” considerando todos los perfiles y se estima un ancho promedio de la zona de surf para todo el dominio. En la Figura 7 vemos que el límite de la zona de surf tiene valores muy cercanos al límite medio debido a la uniformidad de oleaje y batimetría.

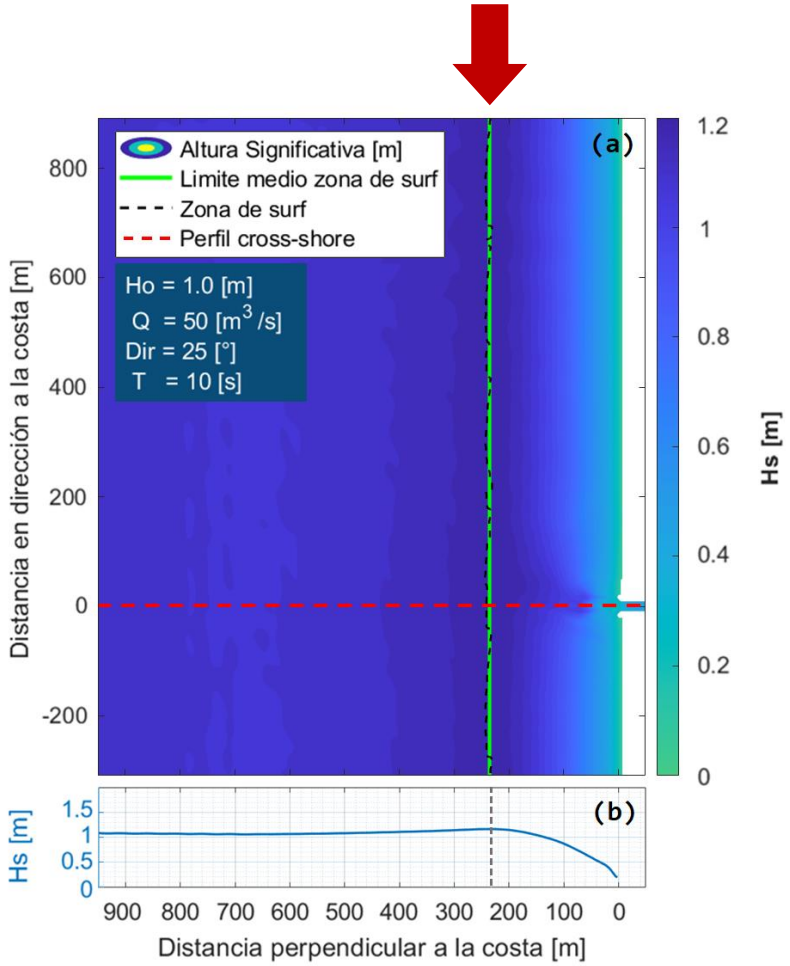


Figura 7: *(a) Altura significativa (mapa de color), máximo altura significativa (línea segmentada negra) y límite medio zona de surf (línea verde); (b) Perfil transversal altura significativa (línea azul), limite zona de surf (línea segmentada gris). Flecha roja indica inicio de zona de rompiente.*

3.5.2 Velocidad representativa en la zona de surf

Describir los flujos costeros en base a velocidades instantáneas dificulta la tarea de capturar el panorama global de corrientes y velocidades, debido principalmente a la condición cíclica del oleaje. Al analizar la velocidad instantánea de una ola que se propaga oblicuamente hacia la costa notaremos que la velocidad en la cresta de una ola apunta en la dirección de propagación del oleaje, mientras que en un valle apunta en dirección contraria (desfase de 180°) lo que se traduce en velocidades orbitales de las partículas de agua. Dentro de la zona de surf se mantiene una situación similar pero se desordena, ya que la rotura del oleaje induce corrientes que van en dirección paralela a la costa.

El promedio lagrangiano de la velocidad de onda (U_L y V_L, en inglés lagrangian wave-averaged velocity) corresponde a una media temporal de la velocidad durante un lapso tiempo igual al periodo de ola, al utilizar esta forma de calcular la velocidad se elimina el movimiento orbital de las

partículas del agua. La velocidad expresada como media lagrangiana permite visualizar los campos de flujo sin que se generen oscilaciones en la velocidad. La naturaleza del oleaje es oscilatoria y una de sus principales características es que una partícula en la superficie del agua se moverá siguiendo una trayectoria eliptica a medida que pasa una ola, según la Teoría lineal del oleaje esto implica que existe un desfase de 180° en la velocidad al tomar una partícula que se encuentre en un punto máximo respecto de una partícula en un punto mínimo, esta característica conlleva que el cálculo del promedio lagrangiano de la velocidad de onda de 0 de resultado ya que la velocidad se anula en todo momento producto del desfase de 180º existente. Mientras que dentro de la zona de surf producto de rotura del oleaje si veremos un flujo neto denominado corriente costera, su dirección guarda relación con la altura y ángulo de propagación del oleaje.

La velocidad de onda lagrangiana promedio se puede calcular a partir de la Ecuación 3.

$$U_L = \frac{\langle (h+\eta)U \rangle}{\langle h+\eta \rangle} \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Donde U corresponde a la velocidad instantánea media en profundidad, h es la profundidad del agua considerando la superficie tranquila y η corresponde a la elevación instantánea de la superficie libre. Para calcular U_L se debe tomar $U, h\ y\ \eta$ para un punto de la grilla y calcular $(h+\eta)U$ para cada paso temporal del ciclo de oleaje, luego sumar todos los terminar lo cual corresponde a $\langle (h+\eta)U \rangle$. Del mismo modo se debe calcular $\langle h+\eta \rangle$ y luego se calcula el cuociente de los términos para calcular U_L, esto se hace para todos los puntos de la grilla, así se obtiene un campo de velocidades para el dominio de la simulación (el cálculo de V_L es análogo).

3.5.3 Escala de longitud de la pluma en el campo cercano, LNF

Calculamos L_{NF} basados la Ecuación 1, en dos ubicaciones y con metodologías diferentes, sin embargo, por definición L_{NF} se calcula considerando $M_0 = v_0 Q_0, J_0 = g' Q_0, \delta = w_e / v_0$.

La escala de longitud del campo cercano L_{NF}, relaciona las propiedades inerciales y boyantes de la descarga frente al océano. En este estudio este parámetro se estima en la boca de la descarga y en la ubicación donde el número de Froud (F_r) es igual a 1, que es la ubicación donde debe ser calculado por definición (Hetland, 2010). Para calcular esta escala de longitud en la boca de la descarga, se toma la velocidad de onda lagrangiana promedio U_L, con la cual se calcula la media espacial en todo el ancho de la descarga, esta velocidad se denota como u_0. Se obtiene Q_0 al integrar la velocidad promedio en profundidad a lo largo de todo el ancho de la descarga. La gravedad reducida del sistema se calcula como $g' = (g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a)$, donde g corresponde a la gravedad, ρ_a la densidad del océano ambiental y ρ_0 representa la densidad de la descarga calculada a partir de la salinidad media en profundidad en el centro de la descarga. La tasa de arrastre δ se calcula a partir del número de Richardson (Yuan & Horner-Devine, 2013) mediante la relación $\delta = 0.02 {Ri_{b0}}^{-1/2}$. El número de Richardson se calcula como $Ri_{b0} = (g' h_0)/v_0^2$, siendo h_0 la profundidad en el centro de la boca de la descarga.

La segunda ubicación en la cual se calcula L_{NF} se ubica sobre el centro de la descarga, justo al final del campo cercano es decir donde el flujo de la descarga está en estado crítico. En esta ubicación encontraremos que el número de Froud (F_r) es igual a 1. Para calcular L_{NF} debemos identificar la

capa superior correspondiente al espesor en el cual la pluma se desarrolla (h_o), para la cual se debe calcular la salinidad media (que permite obtener la gravedad reducida g') y la velocidad media (v_0) de la pluma sobre un perfil que pase por el centro de la descarga. Esto último, a su vez, permite obtener Q_0 mediante integración sobre el ancho de la descarga. Estos valores permiten calcular la velocidad de arrastre normalizada, el momentum y flotabilidad de la descarga para luego evaluar la Ecuación 1 y así obtener $L_{NF,Fr=1}$ (se denota con el subíndice $F_r = 1$ para hacer referencia a esta ubicación).

3.5.4 Escala de longitud del flujo cruzado

El cálculo de L_a se realiza de acuerdo con la Ecuación 2. Para esto consideramos $M_0 = v_0 Q_0$ donde el cálculo de v_0 y Q_0 es análogo al cálculo de L_{NF} en la primera ubicación. Para calcular U_{sz} tomamos los perfiles cross-shore de la componente along-shore de la velocidad lagrangiana promedio de onda (definida en la Ecuación 3) en secciones que encuentren aguas arriba de la descarga, se determina el máximo de cada perfil y luego se obtiene U_{sz} como el promedio de dichos valores. En consecuencia, Usz representa la velocidad peak en la dirección along-shore a la cual se ve enfrentada la descarga dentro de la zona de surf.

4 Resultados

4.1 Modelación numérica y teoría lineal del oleaje

Los resultados obtenidos de los modelos hidrodinámicos son consistentes con la teoría lineal del oleaje. La Figura 8 contiene los resultados para el modelo numérico con entradas $H_0 = 1.0\ [m]$, $\theta_0 = 25\ [°]$ y $Q = 50\ [m^3/s]$ se presenta la elevación de superficie y profundidad, altura significativa, ángulo de oleaje y la componente along-shore de la velocidad (U_L) en un perfil perpendicular a la costa ubicado aguas arriba de la descarga, en una coordenada $y = -150\ [m]$. En la Figura 8 b y c, se presentan y comparan los resultados para la altura significativa y ángulo de oleaje tanto para la simulación (curva azul) como para los resultados de la teoría lineal del oleaje (curva roja), es posible afirmar que ambas curvas se ajustan con gran precisión fuera de la zona de surf. Dentro de la zona de surf los resultados para ángulo de oleaje son más caóticos producto de la rotura del oleaje y no es posible calcular la dirección del oleaje. Es importante destacar que debido a las condiciones simplificadas de las simulaciones la velocidad along-shore, presentada en la Figura 8 d muestra que la velocidad fuera de la zona de surf es casi nula, mientras que dentro de la zona de surf se genera una gran corriente debido a la rotura del oleaje y los gradientes en los tensores de radiación en la cual ingresará la descarga.

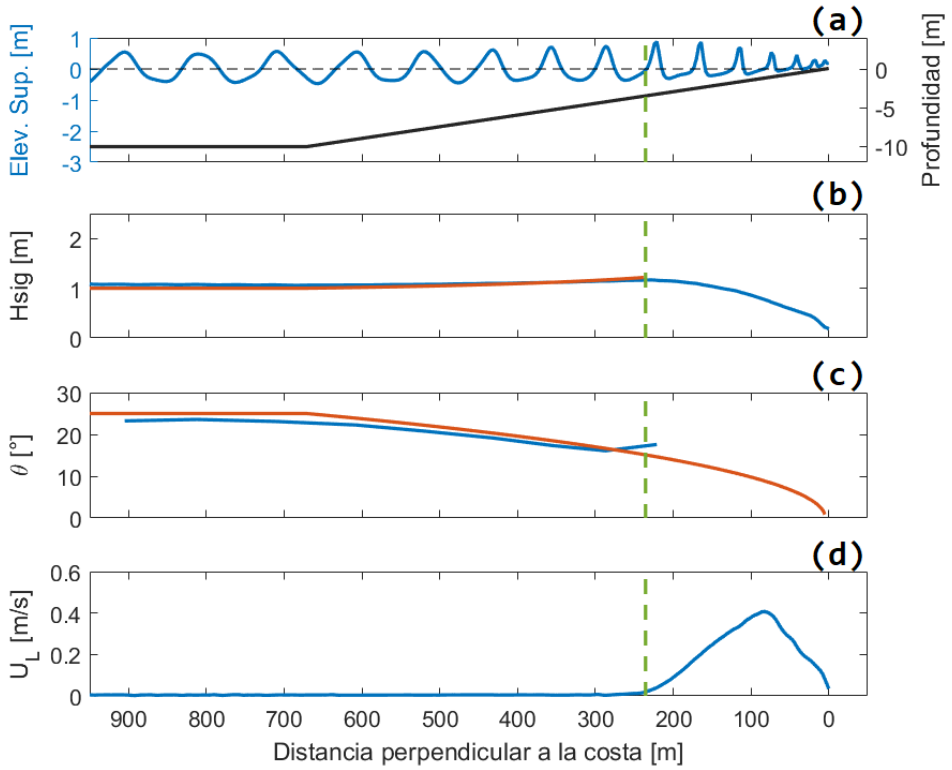


Figura 8: *Resultados modelo y Teoría Lineal del Oleaje, perfil transversal en x=-150[m]. (a) Elevación instantánea de la superficie en t=2700 [s] (línea azul) y profundidad de aguas quietas (línea amarilla), (b) altura significativa, (c) ángulo de ola y (d) velocidad de onda lagrangiana a lo largo de la costa sobre un perfil transversal, resultados modelo (línea azul) y valores teóricos basados en la teoría lineal del oleaje (línea roja). Limite costa afuera zona de surf (línea gris segmentada). Modelo numérico con entradas H_O=1.0 [m], θ_0=25[°] y Q=50 [m³/s].*

4.2 Relación altura de ola y corriente zona de surf

En simulaciones numéricas simplificadas se pueden encontrar relaciones sencillas entre los parámetros de entrada de las simulaciones y ciertos resultados o cantidades de salida, en particular en este estudio se realizó un análisis para estimar la velocidad máxima de la corriente costera a partir de las condiciones costa afuera del oleaje, específicamente la altura de ola y dirección excluyendo el periodo ya que todos los modelos analizados tienen el mismo periodo.

La velocidad en dirección a la costa máxima utilizada para las simulaciones de altura de ola $0.5, 1.0\ y\ 1.5\ [m]$ corresponde a la media de 5 modelos que presentan la misma dirección de ola costa afuera mientras que para el oleaje de altura $2.0\ [m]$ se simulan casos especiales adicionales. Todo el análisis es para modelos con periodo de ola de $T = 10\ [s]$.

Las velocidades máximas por altura de ola y dirección determinas en este análisis se encuentran en la Tabla 3 y se grafican en la Figura 9.

Tabla 3: *Velocidad máxima corriente costera*

Ho [m]	θ_0 [°]	$U_{L,\,Max}$ [m/s]
0.5	10	0.09
1	10	0.17
1.5	10	0.29
2*	10	0.48
0.5	25	0.19
1	25	0.42
1.5	25	0.7
2*	25	1.16

El objetivo es aplicar una regresión lineal para la velocidad máxima en dirección paralela a la costa en función de la altura de oleaje costa afuera para las dos direcciones del oleaje ($10°\ y\ 25°$). Una condición fundamental es que el ajuste debe pasar por el origen, puesto que el oleaje cuando rompe genera la corriente en la zona de surf, dicho de otra manera, sin oleaje no se produce corriente. El mejor ajuste corresponde a una función cuadrática con $R^2 = 0.99$ para ambas direcciones.

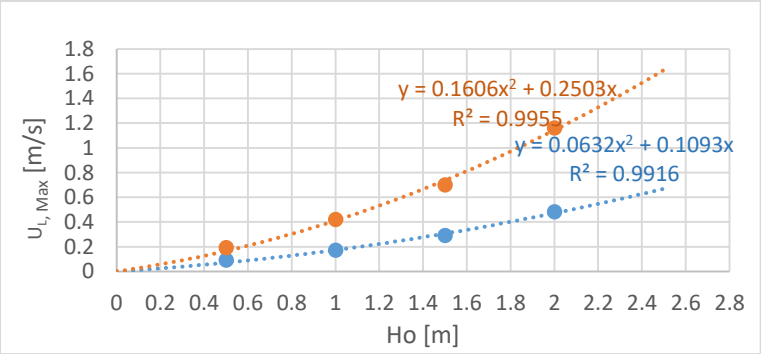


Figura 9: *Relación altura de ola y corrientes costeras. Resultados modelos de velocidad de onda lagrangiana promedio a lo largo de la costa para modelos con dirección de ola 25° (Marcadores rojos) y modelos con dirección de ola 10° (marcadores azules). Regresión cuadrática con 0,0 forzado para 25° (línea segmentada roja) y 10° (línea segmentada azul).*

Los ajustes generados por dirección corresponden a los siguientes:

$$U_{L,Max}(H_0, \theta_0 = 10°) = 0.0632 * {H_0}^2 + 0.1093 * H_0 \qquad \text{(Ec. 4)}$$

$$U_{L,Max}(H_0, \theta_0 = 25°) = 0.1606 * {H_0}^2 + 0.2503 * H_0 \qquad \text{(Ec. 5)}$$

Se pretende obtener una expresión cuadrática única para ambas direcciones del tipo $U_{L,Max}\,(H_0, \theta_0) = A * \theta_0 * {H_0}^2 + \theta_0 * H_0/B$, esta expresión se ajustará a ambos conjuntos de datos mediante los parámetros $A\ y\ B$. El criterio de ajuste corresponde a la minimización del error -cuadrático medio entre los datos de la simulación y los datos de estimación. El resultado de este análisis indica que $A = 0.00641$ y $B = 98.65$.

Tabla 4: *Calculo función de ajuste velocidad máxima corriente costera*

	H_0 $[m]$	Simulación $U_{L,Max}$ $[m/s]$	Estimación $U_{L,Max,Est}$ $[m/s]$	Error $(U_{L,Max-}U_{L,Max,Est})^2$
$\theta_0 = 10$ [°]	**0**	0	0.00	0.00E+00
	0.5	0.09	0.07	5.42E-04
	1	0.17	0.17	2.04E-05
	1.5	0.29	0.30	3.99E-05
	2	0.48	0.46	4.32E-04
$\theta_0 = 25$ [°]	**0**	0	0.00	0.00E+00
	0.5	0.19	0.17	5.39E-04
	1	0.42	0.41	3.95E-05
	1.5	0.7	0.74	1.66E-03
	2	1.16	1.15	1.44E-04
			Total	**3.42E-3**
			Error Cuadrático medio	**1.85E-2**

Finalmente, la expresión determinada para aproximar el máximo de la corriente costera mediante la altura y dirección de ola corresponde a la Ecuación 6.

$$U_{L,Max,Est}(H_0, \theta_0) = 0.00641 * \theta_0 * {H_0}^2 + \frac{\theta_0 * H_0}{98.65} \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Donde H_0 es la altura de ola costa afuera expresada en [m] y θ_0 es la dirección en [°].

La Figura 10, presenta los datos obtenidos de las simulaciones numéricas y la función aproximada por cada dirección.

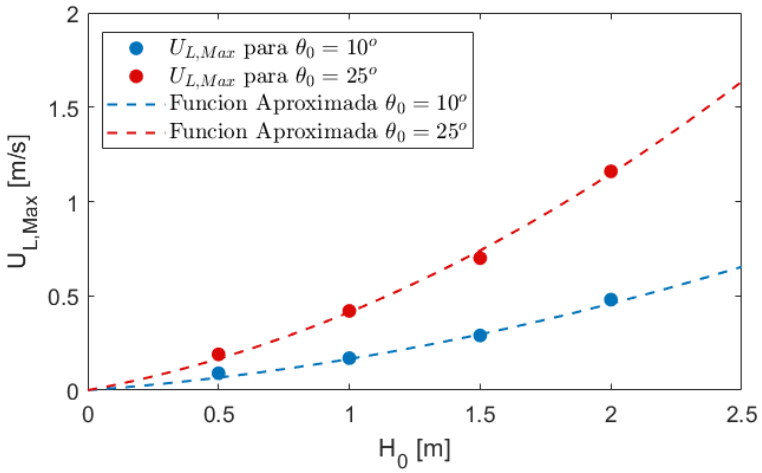


Figura 10: *Velocidad de onda lagrangiana promedio y función aproximada. Resultados modelos de velocidad de onda lagrangiana promedio a lo largo de la costa para modelos con dirección de ola 25° (Marcadores rojos) y modelos con dirección de ola 10° (marcadores azules). Función aproximada 25° (líneas segmenta roja) y 10° (línea segmentada azul).*

La función determinada para estimar de forma sencilla la velocidad máxima de la corriente costera coincide con gran precisión los datos obtenidos de las simulaciones numéricas. Si bien la componente del tensor de radiación que da origen a las corrientes longitudinales en la zona de surf tiene dependencia cuadrática con respecto a la altura de ola (Longuet-Higgins, 1970), no existe una causalidad para que la corriente en dirección a la costa peak también lo sea, ya que el problema es mucho más complejo, en este pequeño análisis se deja fuera parámetros importantes como son la pendiente de la playa y periodo de ola.

4.3 Resultados modelación: Casos base

Con el objetivo de realizar un análisis cualitativo de los primeros modelos simulados, se decidió simular dos casos simples: en primer lugar, un modelo sólo con la presencia de la descarga (sin oleaje) y luego un modelo que mantenga la misma descarga que el modelo anterior, pero en esta ocasión se incluye oleaje de forma perpendicular. Esto permite verificar cualitativamente los resultados debido a que en estas situaciones sabemos que esperar, en el caso de la simulación sin oleaje se espera que la descarga se propague mar adentro desde el punto de salida de forma radial mientras que la simulación con oleaje perpendicular se espera que las olas dispersen el flujo lateralmente dentro de la zona de surf (Rodríguez et al., 2018).

4.3.1 Caso sin oleaje

El primer caso simulado es simple y consiste una descarga de caudal $Q = 50\ [m^3/s]$ que ingresa al océano sin oleaje. En las Figura 11 a muestra resultados de salinidad superficial y en la Figura 11 c se presenta un corte transversal que pasa por el centro de la descarga, ambos paneles están graficados para $t = 38\ [min]$. La salinidad superficial y la velocidad exhiben como el caudal de descarga avanza por el canal en un estado que se puede definir como un jet o choro manteniendo esta dinámica hasta que producto de la mezcla o forzamiento con el agua del océano la descarga

pierde el suficiente momentum y cerca de la coordenada $x = 170\ [m]$ encontramos el punto de despegue (en inglés: "lift-off"), previo a este punto la dinámica de la descarga se considera un jet de agua que atraviesa el agua presente en la región en la cual descarga, luego de este punto la diferencia de densidad entre el agua fresca de la descarga y el agua salada de la costa generan que los efectos de flotabilidad controlen el sistema, la diferencia de densidad genera que el caudal de la descarga se propague por la capa superficial del océano. A modo de comparacion se incluye un caso similar en el cual el caudal se reduce a $Q = 25\ [m^3/s]$, Figura 11 b y d. Los resultados presentados muestran que el punto de lift-off se produce 70 metros antes, esta situación se explica a partir del menor momentum asociado a la descarga con respecto al caso anterior, esta situacion deriva en que los efectos inerciales requieren de una menor distancia para reducirse al punto en el cual no controlan la hidrodinamica.

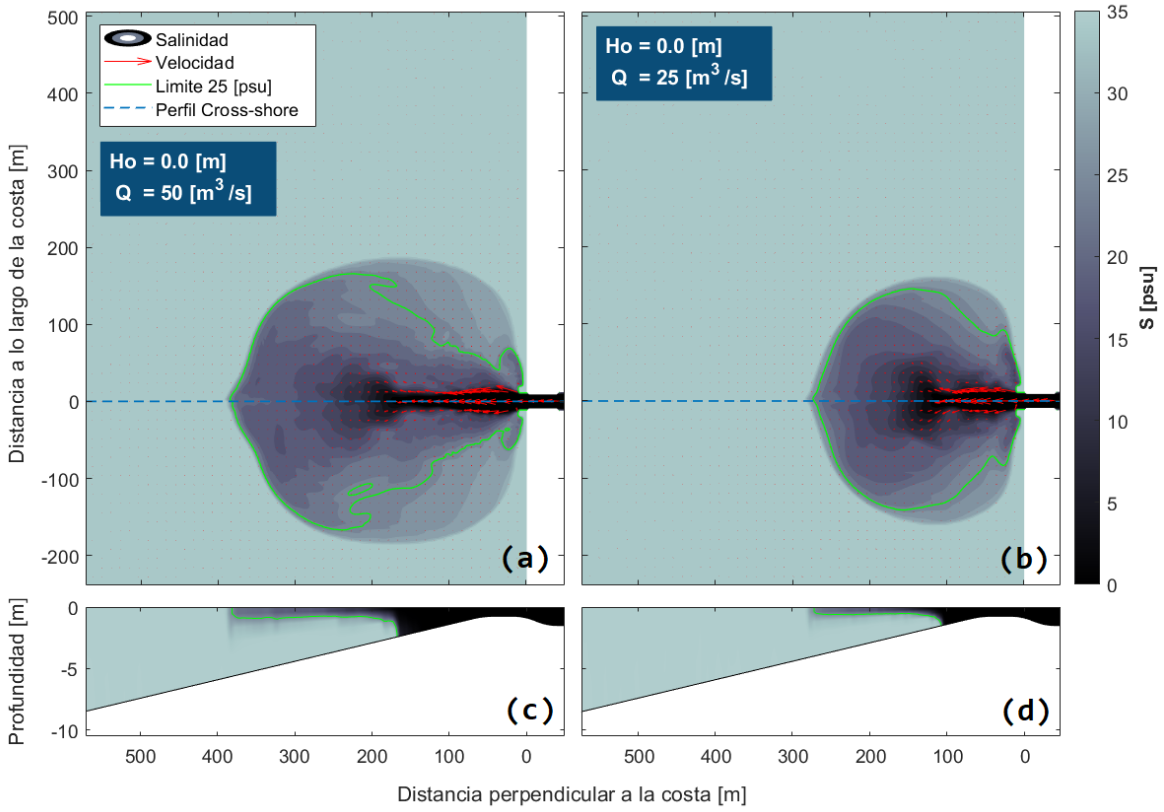


Figura 11: *Resultados modelo sin oleaje y descarga Q=50 [m³/s]. (a y b) Mapas salinidad superficial instantánea en t=2280 [s], las flechas rojas representan la velocidad y dirección del flujo (U_L y V_L), ubicación perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul). (c y d) Perfiles cross-shore de salinidad instantánea que pasa por el centro de la descarga. Contorno límite de salinidad 25 [psu] (línea verde).*

La Figura 12 muestra la velocidad media de los últimos 15 minutos de simulación en ambas direcciones (Figura 12 a y b) y la salinidad instantánea al final de la modelación en un perfil transversal que pasa justo por el centro de la descarga (Figura 12 c). En esta simulación debido a la ausencia de oleaje y por lo tanto a la ausencia de corriente costera en la Figura 12 a vemos que la

mayor circulación de agua fresca se produce de manera perpendicular a la costa, de igual modo en la misma figura es posible notar que antes de la coordenada $y = 170\ [m]$ la descarga tiene un comportamiento de jet, ya que se puede ver la presencia del flujo de la descarga en toda la columna de agua de manera relativamente uniforme en la profundidad, mientras que después de dicha coordenada el agua se transporta hacia la superficie y se aprecia como la velocidad cross-shore es de magnitud considerable solo superficialmente mientras que a mayor profundidad se va haciendo despreciable, esto es lo que se conoce como comportamiento de pluma.

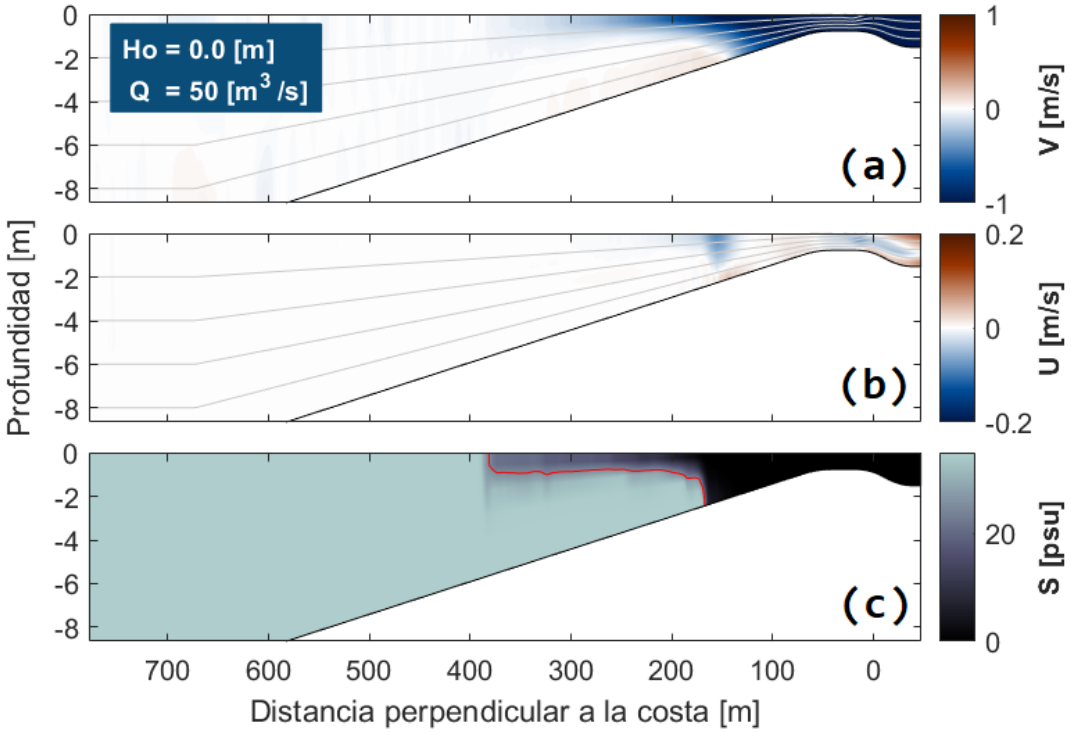


Figura 12: *Resultados perfil cross-shore modelo sin oleaje y descarga Q=50 [m³/s]. (a) y (b) Velocidad media cross-shore y along-shore, respectivamente para los últimos 15 minutos de simulación (en dirección cross-shore el signo negativo indica que el agua ingresa al océano mientras que para la dirección along-shore el signo positivo indica que el agua se traslada al norte). (c) Salinidad instantánea t=2280 [s], contorno límite de salinidad 25 [psu] (línea verde).*

4.3.2 Caso oleaje perpendicular

El siguiente caso base en ser simulado incorpora oleaje de altura $H_0 = 1.0\ [m]$ viajando en dirección perpendicular a la costa, mientras que la descarga conserva el caudal del modelo descrito en la sección 5.3.1. Este nuevo caso (Figura 13) incluye la interacción oleaje-río causando que el comportamiento dinámico del sistema cambie sustancialmente respecto del caso sin oleaje. Producto del forzante generado por la rotura del oleaje la dispersión lateral aumenta (Rodríguez et al., 2019) con lo cual el flujo de salida pierde libertad para transportarse y queda condicionado a viajar paralelamente a la línea de costa dentro de la zona de surf. El hecho que la dirección de propagación del oleaje sea perpendicular a la costa causa que la forma pluma sea simétrica respecto

al eje "y", manteniendo esta característica en relación al caso sin oleaje, en contraposición a esta similitud se observa una retracción en la curva de la salinidad de 25 [psu] es posible observar que en el caso con oleaje la curva se ubica más cerca de la costa. La mezcla y turbulencia adicional inducida por el oleaje no permiten a la descarga avanzar fácilmente mar adentro, dicho de otro modo, el flujo de salida presenta una mayor tasa de perdida de momentum generando que el cambio en la hidrodinámica de la descarga se produzca espacialmente antes, la transición de jet a pluma (punto de despegue) ocurre cerca de la coordenada $y = 90\ [m]$, esto es aproximadamente $80\ [m]$ antes que el caso sin oleaje.

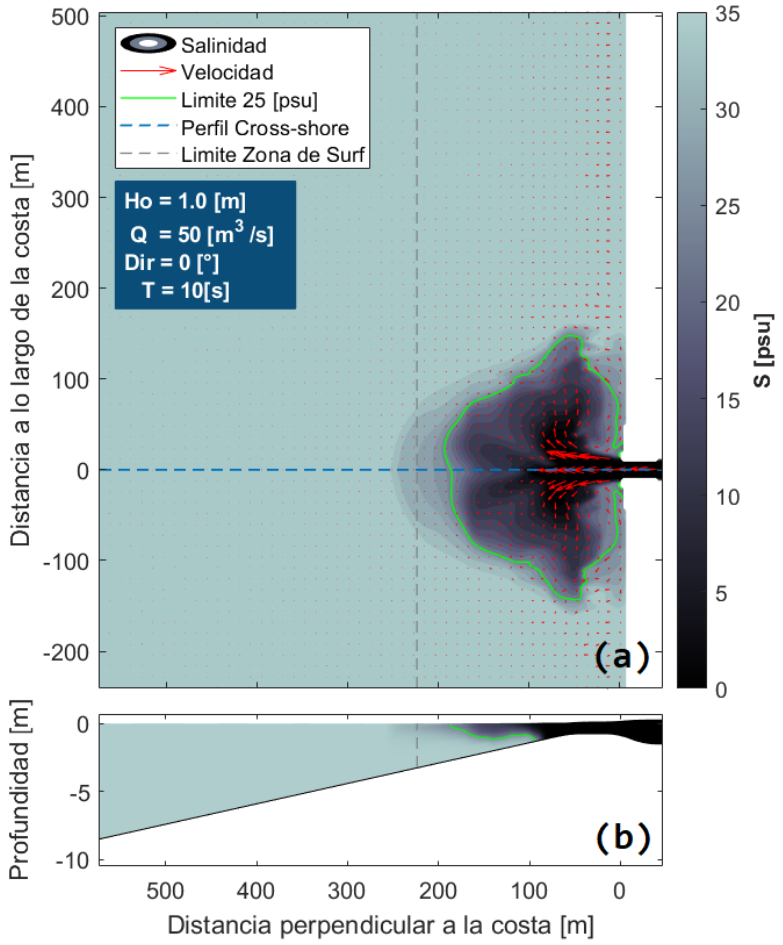


Figura 13: *Resultados modelo oleaje perpendicular y descarga Q=50 [m^3/s]. (a) Mapa salinidad superficial instantánea en t=2400 [s], las flechas rojas representan la velocidad y dirección del flujo (U_L y V_L), ubicación perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul). (b) Perfil cross-shore de salinidad instantánea que pasa por el centro de la descarga. Contorno límite de salinidad 25 [psu] (línea verde).*

4.4 Casos oleaje oblicuo

Se simularon 37 modelos que incorporan oleaje oblicuo los cuales presentan distintas alturas de ola, ángulo de propagación y caudal de descarga (Ver Tabla 2: Parámetros de entrada simulaciones numéricas). Con anterioridad al describir la interacción oleaje-rio se ha dicho que la rotura de olas

que se propagan hacia la costa con inclinación genera una corriente en dirección a la costa y su magnitud depende de parámetros tales como altura de ola, ángulo de incidencia, periodo de ola, batimetría, etc. Tomando esta idea, se espera encontrar en mayor o menor medida un desplazamiento o curvatura en la pluma en dirección norte (positiva del eje "x"), rompiendo así con la simetría observada en los casos descritos anteriormente (sin oleaje y oleaje perpendicular).

Los modelos simulados en este estudio se agrupan y presentan por altura y ángulo de oleaje, caudal de descarga (Figuras 14 a 16) y casos especiales por periodo de ola (Figuras 24 y 25).

En la Figura 14 se presentan los resultados de tres simulaciones que constan del mismo caudal de descarga y ángulo de incidencia de oleaje, variando únicamente la altura de ola. De acuerdo con estos resultados, es posible verificar que un aumento en la altura de ola resulta en un aumento del ancho de la zona de surf y en corrientes más fuertes a lo largo de la costa.

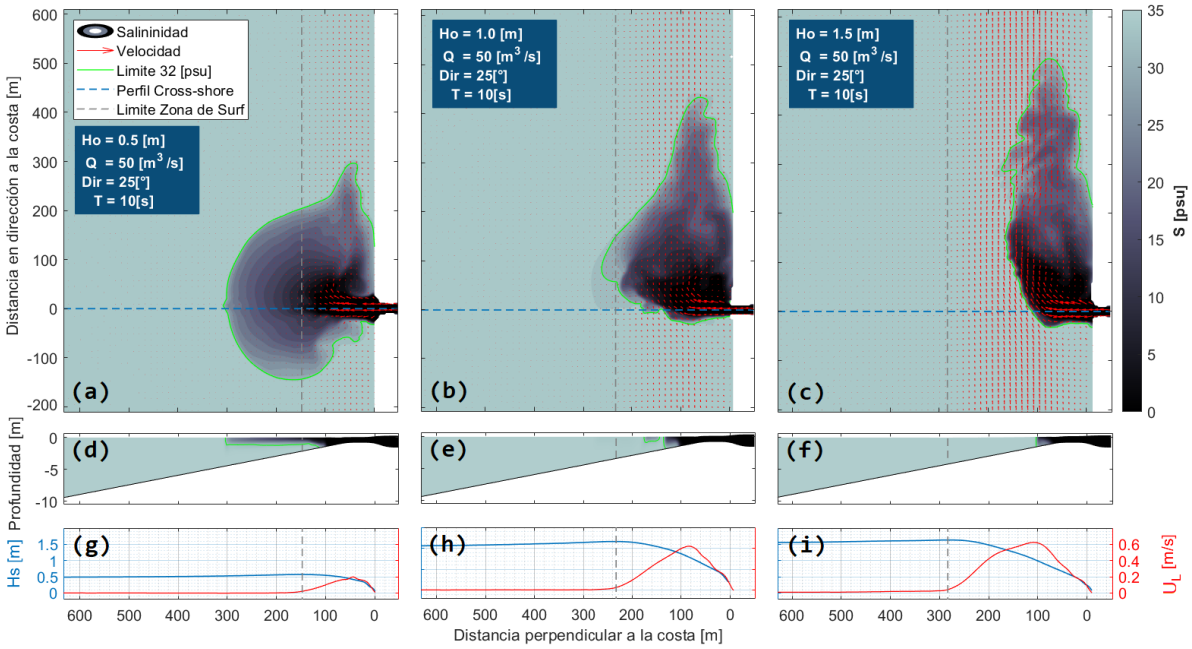


Figura 14: *Resultados modelos para diferentes condiciones de oleaje. Condiciones de oleaje y descarga presentadas en cada panel (cuadro azul). (a)-(b)-(c) Mapas de salinidad superficial t=2700 [s], flechas rojas indican dirección del flujo (U_L y V_L), perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul), limite costa afuera zona de surf (línea segmentada gris) y contorno limite 32 [psu] (línea verde). (d)-(e)-(f) Salinidad y batimetría en perfil cross-shore. (g)-(h)-(i) Altura significativa (línea azul) y velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección a la costa (línea roja).*

El ancho promedio de la zona de surf (L_{sz}) para el modelo con altura de ola $H_0 = 0.5\ [m]$ es de $150\ [m]$ (Figura 14 a) y para el modelo de $H_0 = 1.5\ [m]$ es $295\ [m]$ (Figura 14 c), lo cual corresponde a un aumento de $145\ [m]$. Si analizamos las corrientes dentro de la zona de surf en términos de la velocidad de onda lagrangiana promedio (U_L) vemos que aumentar la altura de ola de $H_0 = 0.5\ [m]$ a $H_0 = 1.5\ [m]$ genera que la velocidad máxima en dirección a la costa aumente de $0.2\ [ms^{-1}]$ a $0.6\ [ms^{-1}]$.

Las tres simulaciones exhiben una curva en la trayectoria de la pluma producto de la interacción con la corriente presente en la zona de surf, lo cual es consistente con la entrada de un jet a un flujo cruzado producto de las corrientes del oleaje (Jones et al., 2007). En primer lugar, la simulación presentada en la Figura 14 a, d y g incorpora la altura de oleaje más baja y por lo tanto la menor corriente y menor ancho de la zona de surf, bajo estas condiciones la descarga es capaz de transportar gran parte de su caudal fuera de la zona de surf experimentado una pequeña desviación en su trayecto. En segundo lugar, el modelo presentado en la Figura 14 b, e y h se encuentra en una situación intermedia en la cual el impulso inicial de la descarga es lo suficientemente alto para superar la región de la zona de surf que presenta las velocidades más altas consiguiendo alcanzar al límite costa afuera de la zona de rompiente, pero no logrando sobrepasarlo. Finalmente, el modelo presentado en la Figura 14 c, f e i es la simulación con las condiciones hidrodinámicas más adversas para un eventual escape de las aguas de la descarga, ya que la zona de surf es la más ancha y la corriente es la más enérgica, resultando en un momentum inicial insuficiente para sobrepasar estas condiciones de la zona de surf y por lo tanto queda completamente atrapada y curvada antes de la coordenada $y = 160\ [m]$.

La zona de surf se caracteriza por tener un comportamiento caótico donde la turbulencia y mezcla impactan significativamente en los flujos que descargan directamente en esta región. La altura del oleaje determina en parte el grado de turbulencia que se genera por lo cual es esperable que a mayor altura la pluma pierda velocidad y por consiguiente momentum a una mayor tasa. En la Figura 15 a, b y c se muestra la velocidad en dirección cross-shore justo sobre la descarga, en primer panel mencionado la altura de ola es de $H_o = 0.5\ [m]$ y se puede ver como la pluma tiene una velocidad considerable hasta la coordenada $y = 200\ [m]$ aproximadamente, el siguiente panel corresponde a la Figura 15 b este nuevo caso la altura de ola es $H_o = 1.0\ [m]$ y la distancia donde la velocidad de la pluma es considerable se acorta $50\ [m]$ llegado en esta ocasión a la coordenada $y = 150\ [m]$ y finalmente el caso más desfavorable para la descarga se muestra en la Figura 15 c donde la altura de ola es $H_o = 1.5\ [m]$ y la velocidad de la pluma es apreciable hasta la coordenada $y = 100\ [m]$. Con lo cual se confirma que a mayor altura de ola manteniendo los otros parámetros constantes el aumento de la turbulencia y la mezcla.

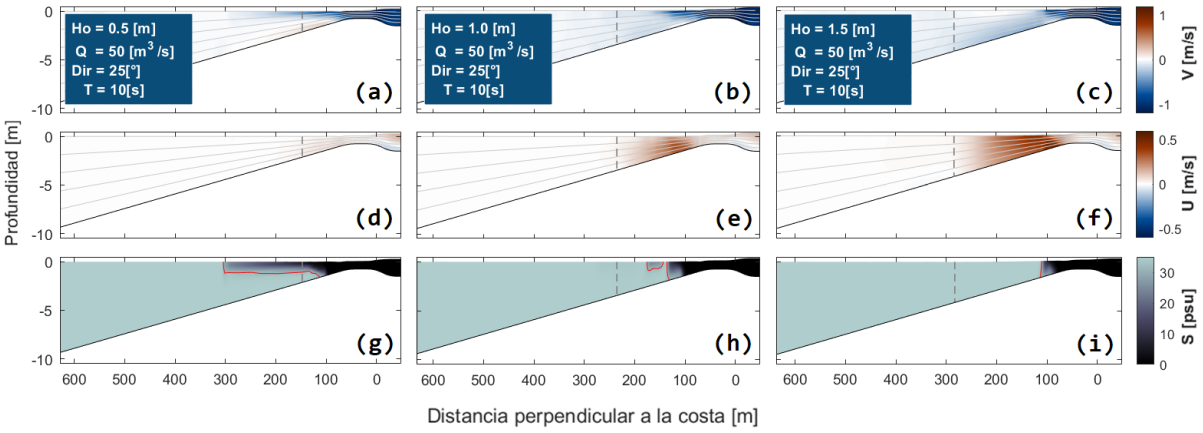


Figura 15: *Resultados perfiles cross-shore modelos para diferentes condiciones de oleaje. Condiciones de oleaje y descarga presentadas en cada panel (cuadro azul). (a)-(b)-(c) Velocidad media dirección cross-shore para los*

últimos 15 minutos de simulación. (d)-(e)-(f) Velocidad media dirección along-shore para los últimos 15 minutos de simulación. (g)-(h)-(i) Salinidad instantánea t=2700 [s], contorno límite de salinidad 32 [psu] (línea roja).

En la Figura 16 se muestran los resultados de tres simulaciones, las cuales han sido configuradas con las mismas condiciones de oleaje (altura de ola, ángulo de propagación y periodo de ola) pero se diferencian en el caudal asociado a la descarga, junto con esto es importante destacar que todas las simulaciones presentadas en este estudio están basadas en la misma batimetría, tanto para el lecho marino como la para la geometría del canal de la descarga. En la Figura 16 g, h e i, se evidencia que las condiciones del oleaje son iguales para las tres simulaciones ya que las curvas asociadas a los perfiles transversales de altura significativa (H_s) y velocidad en dirección paralela a la costa (U_L) presentan una gran similitud en los tres paneles, además el ancho de la zona de surf es prácticamente el mismo para todos los casos, tomando un valor cercano a $L_{sz} \approx 240\ [m]$.

El resultado anterior permite observar las diferencias hidrodinámicas causadas por el caudal asociado a cada una de las simulaciones, aumentar el caudal de la descarga genera que la pluma alcance una mayor distancia dentro de la zona de surf. La Figura 16 a, b y c, muestra la salinidad superficial en el último instante de simulación, esto permite estimar cuanto se adentra la pluma en la zona de surf, la simulación con el caudal más bajo (25 [m3/s]) sólo logra alcanzar una distancia perpendicular a la costa de 170 [m] mientras que la simulación con el caudal mediano (35 [m3/s]) alcanza los 200 [m] y finalmente la simulación con el mayor caudal (50 [m3/s]) logra llegar hasta el límite de la zona de surf ubicado a 240 [m] de la línea de costa, a pesar de esto las tres simulaciones se encuentran atrapadas dentro de la zona de surf. Eventualmente si el caudal de la descarga se aumenta lo suficiente, la pluma será capaz de sobrepasar el límite de la zona de surf logrando propagarse libremente mar adentro fuera de las condiciones caóticas presentes en la zona de rompiente.

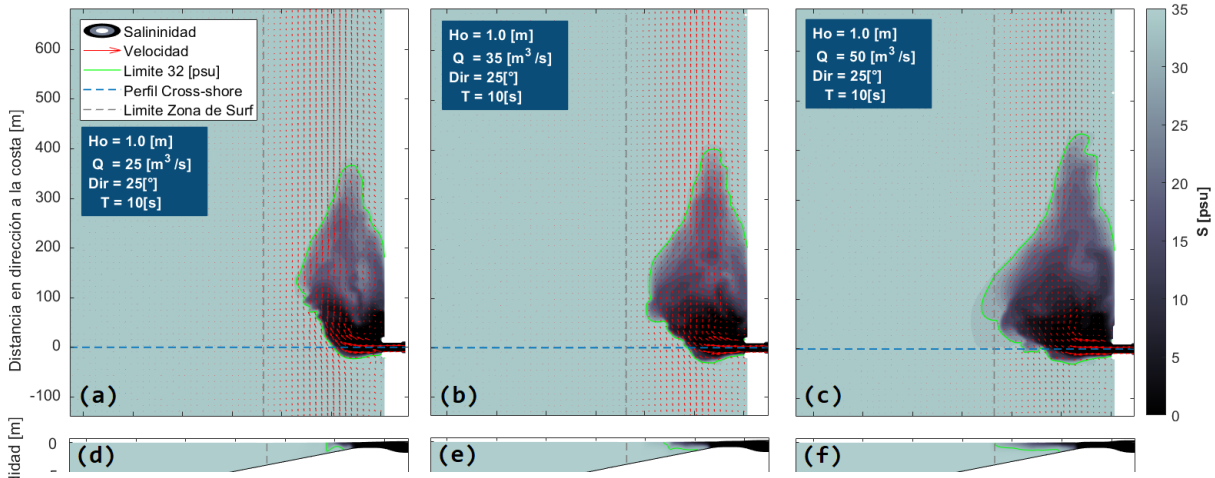


Figura 16: *Resultados modelos para diferentes condiciones de caudal. Condiciones de oleaje y descarga presentadas en cada panel (cuadro azul). (a)-(b)-(c) Mapas de salinidad superficial t=2700 [s], flechas rojas indican dirección del flujo (U_L y V_L), perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul), limite costa adentro zona de surf (línea segmentada gris) y contorno limite 32 [psu] (línea verde). (d)-(e)-(f) Salinidad y batimetría en perfil cross-shore. (g)-(h)-(i) Altura significativa (línea azul) y velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección a la costa (línea roja).*

La Figura 17 presenta los resultados de la simulación con datos de entrada $H_0 = 1.0\ [m]$, $\theta_0 = 25°$ y $Q = 50\ [m3/s]$, se muestra el desarrollo de la pluma mediante perfiles de salinidad cross-shore espaciados a 99 [m]. La Figura 17 (e) muestra un perfil de salinidad ubicado a 99 metros de la descarga se observa como el transporte del agua fresca es por la capa superficial del agua de la playa mientras en los paneles (d), (c) y (b) la distribución de salinidad es más homogénea en la altura, el tiempo de exposición más prolongado del flujo de la descarga a las condiciones caóticas de la zona de surf genera mayor mezcla entre el agua salada y el agua fresca.

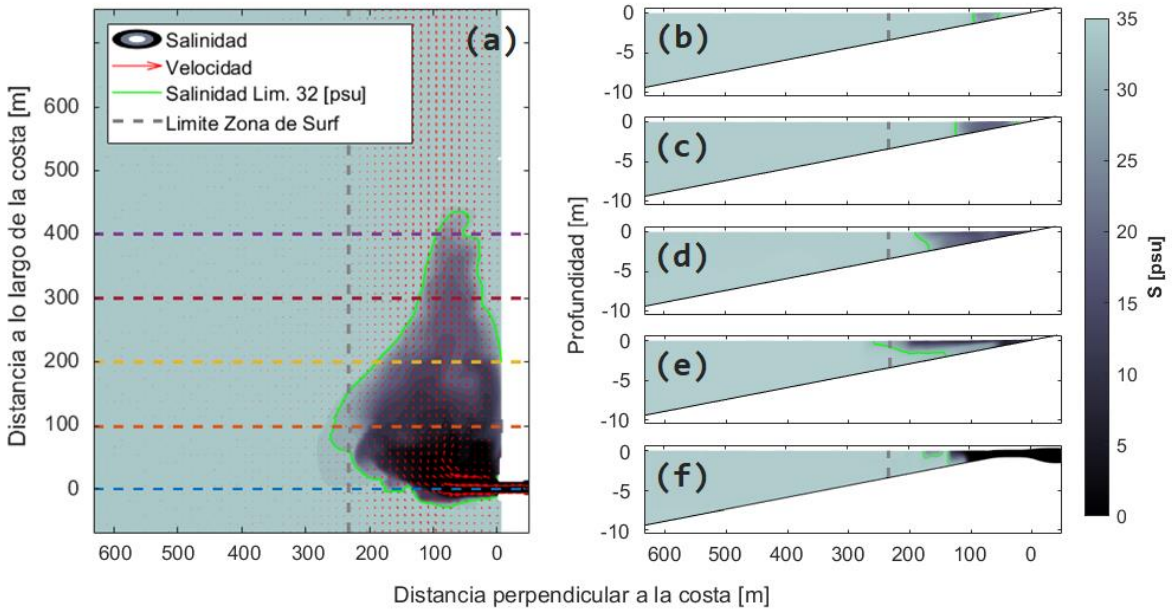


Figura 17: *Resultados modelo H_0=1 [m], Θ_0=25° y Q=50 [m^3/s]. (a) Mapa de salinidad superficial t=2700 [s], flechas rojas indican dirección del flujo (U_L y V_L), (b)-(c)-(d)-(e)-(f) Perfiles cross-shore ubicados en y=396, 297, 198, 99, 0 [m], respectivamente. Limite costa afuera zona de surf (línea segmentada gris) y contorno limite 32 [psu] (línea verde).*

4.5 Perfiles velocidad y Perfil teórico

La velocidad en todo el dominio de simulación es un resultado directo de la interacción del oleaje, la descarga, la batimetría, la fricción, etc. En este estudio todas las simulaciones realizadas utilizan la misma batimetría y coeficiente de fricción de fondo, por lo tanto, al comparar las velocidades entre simulaciones las variables más relevantes corresponden al caudal de descarga, altura y ángulo de oleaje, sin embargo, el impacto generado por la descarga sobre las velocidades y flujos decae a medida que nos alejamos del punto de salida.

Con datos de la velocidad aguas arriba de la descarga se analiza el campo de corrientes que genera el oleaje en su aproximación y rotura en la costa. Se obtienen los pares de datos velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección along-shore (U_L) y la respectiva ubicación del dato (coordenada "y") esto permite generar un perfil de velocidad transversal a la costa representativo del oleaje. El perfil de velocidad obtenido se normaliza por la velocidad de onda lagrangiana promedio peak en dirección along-shore (U_{sz}) respectivo de cada simulación, adicionalmente se normaliza la

coordenada "y" por el ancho de la zona de surf (L_{sz}), con lo cual las velocidades quedan expresadas como una fracción de la velocidad peak y las coordenadas quedaran expresadas en función del ancho de zona de surf (Figura 18). Se calcula un perfil teórico de velocidades en dirección along-shore (Longuet-Higgins et al., 1970) el cual se deduce a partir de los mismos parámetros y condiciones que se utilizaron para la simulación. El perfil teórico depende del parámetro adimensional $P = (\pi/2)(sN/\alpha C)$ (ver descripción de los términos en Tabla 5), el cual representa la importancia relativa de la mezcla horizontal comparada con el coeficiente de arrastre "C" (Longuet-Higgins et al., 1970). El parámetro P típicamente se encuentra en el rango 0.01 y 0.4 (Longuet-Higgins et al., 1970). Calculando P con nuestros datos se obtiene 0.094, por lo tanto, se acepta este valor para elaborar el perfil teórico.

El parámetro adimensional P se explica a partir de los parámetros descritos en la Tabla 5.

Tabla 5: *Parámetros de cálculo perfil de velocidad teórico*

Parámetro	Valor	Descripción
s	0.015	Pendiente
N	0.016	Constante numérica
α	0.4	Constante característica de rotura de ola
C	0.010	Coeficiente de arrastre de fondo
P	**0.094**	Parámetro característico de perfil teórico

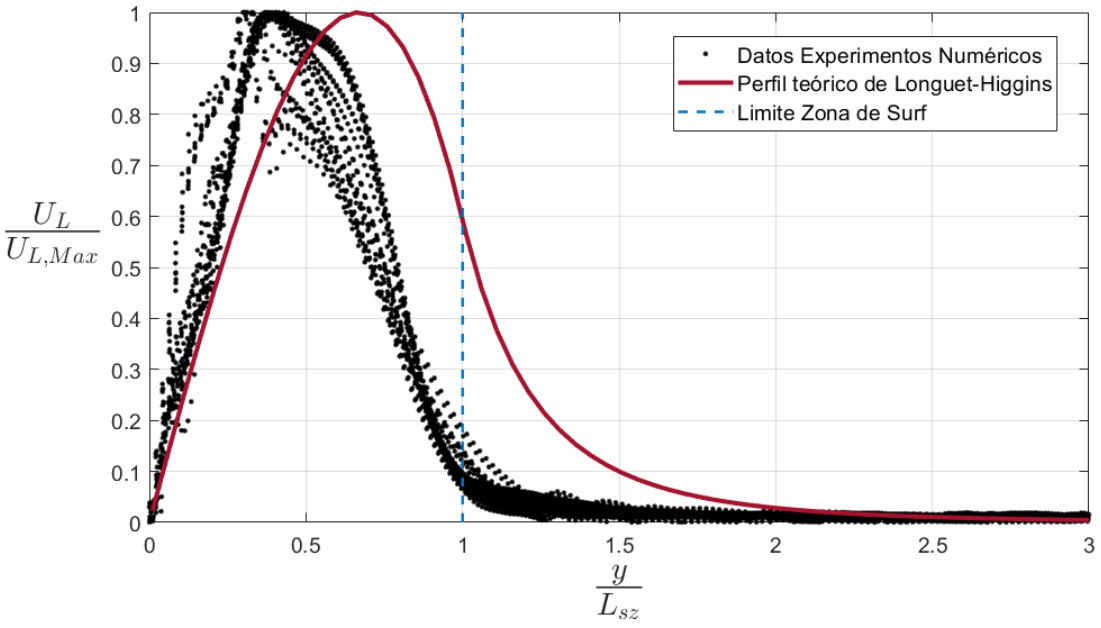


Figura 18: *Perfil teórico de velocidad y resultados de simulaciones. Perfil teórico de velocidad Longuet-Higgins (línea roja). Resultados de velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección a la costa normalizada (puntos negros). Limite costa afuera zona de surf normalizado (línea segmentada azul).*

El análisis realizado muestra que tanto el perfil teórico como los resultados de las simulaciones numéricas predicen que los altos valores de la velocidad en dirección paralela a la costa están presentes dentro de la zona de surf. Los datos teóricos y los numéricos presentan el máximo cercano a la mitad de la zona de rompiente para luego disminuir rápidamente a una distancia máxima de $1.5\ L_{sz}$ donde las velocidades se vuelven casi despreciables.

4.6 Resultados escalas de longitud L_{NF} y L_a

Cada simulación corresponde a una combinación única entre el caudal de descarga (Q), el periodo de ola (T), dirección de oleaje (θ_0) y la altura de ola costa afuera (H_o). Para cada modelo se debe obtener la altura de ola en rotura (H_s), velocidad de salida media de descarga (V_j), momentum salida de descarga (M_j), velocidad máxima en dirección a la costa (U_{sz}), ancho zona de surf (L_{sz}), datos necesarios para calcular las escalas de longitud $L_{NF,\ Fr=1}$, L_{NF} y L_a, que permitirán clasificar los resultados de cada modelo.

La Tabla 6 corresponde a un resumen de datos de cada uno de los modelos con oleaje oblicuo simulados (caso 1 al 33). Asimismo, se incluyen los resultados de los casos especiales entre los que se encuentra el caso sin oleaje, oleaje perpendicular y casos con un periodo de ola $T = 7\ o\ 14\ [s]$ (casos 34 al 39).

Tabla 6: *Resumen resultados simulaciones numéricas*

	Q [m³/s]	T [s]	θ_0 [°]	Hs [m]	Vj [m/s]	Mj [m⁴/s²]	Usz [m/s]	Lsz [m]	$Y_{Fr=1}$ [m]	$LNF_{Fr=1}$ [m]	LNF [m]	La [m]
1	5	10	10	0.60	0.20	1.0	0.09	151.0	111.3	33.1	33.3	11.4
2	15	10	10	0.60	0.52	7.2	0.09	150.4	53.8	38.6	43.0	28.5
3	25	10	10	0.61	0.82	18.8	0.10	147.1	35.6	45.5	49.3	45.4
4	35	10	10	0.61	1.12	35.7	0.08	145.1	25.0	49.7	54.0	73.3
5	50	10	10	0.55	1.40	58.1	0.07	139.9	11.0	56.1	58.4	108.3
6	5	10	25	0.58	0.18	0.8	0.20	149.3	109.6	33.4	32.2	4.4
7	15	10	25	0.58	0.52	7.2	0.20	148.3	48.7	34.6	43.0	13.2
8	25	10	25	0.58	0.82	18.7	0.20	145.8	34.5	42.5	49.2	21.4
9	35	10	25	0.59	1.12	35.7	0.20	143.8	44.8	51.7	53.9	29.8
10	50	10	25	0.58	1.53	70.1	0.20	148.3	16.5	56.4	60.4	42.9
11	5	10	10	1.19	0.16	0.6	0.18	235.8	196.7	29.0	33.1	4.2
12	15	10	10	1.20	0.52	6.6	0.18	235.8	133.5	39.9	45.0	14.6
13	25	10	10	1.19	0.84	18.5	0.17	235.1	130.3	46.5	52.1	24.6
14	35	10	10	1.20	1.17	35.8	0.17	234.2	132.4	55.7	57.0	35.3
15	50	10	10	1.04	1.54	64.7	0.16	232.5	118.9	56.0	62.5	51.8
16	5	10	25	1.08	0.17	0.7	0.45	237.0	209.8	25.4	33.9	1.9
17	15	10	25	1.16	0.51	6.5	0.42	243.2	186.1	42.4	44.9	6.1

18	25	10	25	1.16	0.85	18.5	0.41	243.7	153.9	48.7	52.0	10.4
19	35	10	25	1.16	1.17	36.0	0.40	243.8	136.1	56.7	57.0	14.9
20	50	10	25	1.16	1.61	71.0	0.40	242.0	113.5	67.6	63.4	21.3
21	5	10	10	1.65	0.18	0.8	0.29	292.3	229.1	27.4	35.6	3.1
22	15	10	10	1.66	0.44	5.2	0.29	291.7	222.4	43.7	45.0	7.9
23	25	10	10	1.66	0.76	15.7	0.28	290.9	185.7	53.3	52.3	14.0
24	35	10	10	1.66	1.06	30.8	0.28	294.0	182.9	58.6	57.3	20.1
25	50	10	10	1.66	1.45	58.9	0.27	290.3	173.5	69.8	62.5	28.3
26	100	10	10	1.48	2.29	155.9	0.21	280.4	172.8	80.8	72.9	60.8
27	5	10	25	1.63	0.18	0.9	0.64	293.0	261.7	32.2	35.8	1.5
28	15	10	25	1.63	0.48	6.2	0.63	294.4	253.3	45.3	45.8	3.9
29	25	10	25	1.55	0.78	16.3	0.58	284.4	218.2	48.9	52.1	6.9
30	35	10	25	1.63	1.06	30.9	0.62	296.2	212.4	59.4	57.0	9.0
31	50	10	25	1.64	1.48	60.7	0.61	295.9	194.3	70.5	62.5	12.8
32	70	10	25	1.64	1.99	112.9	0.60	295.8	188.3	76.9	68.6	17.7
33	100	10	25	1.64	2.57	202.0	0.59	295.8	173.2	88.6	76.3	24.1
34	35	7	25	0.48	0.70	13.3	0.19	125.9	14.8	46.6	46.3	19.0
35	35	14	25	0.60	1.11	35.2	0.23	158.9	24.1	50.6	54.1	25.9
36	50	7	25	0.97	1.52	61.3	0.30	236.4	83.3	59.2	61.2	26.2
37	50	14	25	1.19	1.62	71.5	0.49	285.2	168.8	65.1	63.5	17.2
38*	50	-	-	-	1.99	116.72	-	-	-	-	-	-
39*	30	-	-	-	pen	pen	-	-	-	-	-	-
40*	50	10	-	0.92	1.4	51.7	-	230.1	98.5	59	56.9	-

**Casos base, no se consideran en la confección de esquemas gráficos de clasificación.*

Los resultados de los esquemas de clasificación son contrastados con la clasificación visual de todas las simulaciones. Mediante la salinidad superficial instantánea en el final de la simulación se clasifica los modelos utilizando los criterios de clasificación: “Escapa” o “No Escapa”, los cuales indican si para cada simulación existen escapes de agua fresca proveniente de la descarga. La Tabla 7 contiene la clasificación mediante inspección visual de la salinidad superficial instantánea al final del periodo de simulación para todos los modelos.

Tabla 7: *Clasificación de simulaciones mediante salinidad superficial*

Modelo	Clasificación	Modelo	Clasificación
1	No Escapa	20	No Escapa
2	Escapa	21	No Escapa
3	Escapa	22	No Escapa
4	Escapa	23	No Escapa

5	Escapa	24	No Escapa
6	No Escapa	25	No Escapa
7	Escapa	26	No Escapa
8	Escapa	27	No Escapa
9	Escapa	28	No Escapa
10	Escapa	29	No Escapa
11	No Escapa	30	No Escapa
12	No Escapa	31	No Escapa
13	No Escapa	32	No Escapa
14	No Escapa	33	No Escapa
15	No Escapa	34	Escapa
16	No Escapa	35	Escapa
17	No Escapa	36	Escapa
18	No Escapa	37	No Escapa
19	No Escapa		

Una vez obtenida la clasificación visual y las escalas de longitud asociadas a cada simulación es posible expresar los resultados en el esquema grafico de clasificación.

4.7 Esquema grafico de clasificación

La Figura 19 muestra el esquema de clasificación en el cual se grafican las magnitudes relativas de L_a y L_{NF} calculado en la boca de la descarga con respecto a L_{sz}. Es posible distinguir que las simulaciones numéricas que escapan (marcador azul) y las que no escapan (marcador rojo) tienden a ordenarse sobre una sola recta o banda dentro de un plano logarítmico. Con respecto a la pertinencia de los límites de clasificación, es posible afirmar en primer lugar que el límite propuesto para la magnitud relativa L_{sz}/L_a se adecua de buena forma con el conjunto de datos presentados y los resultados respecto a si la descarga es capaz de escapar de la zona de rompiente o no, mientras que el límite propuesto para la magnitud relativa L_{NF}/L_{sz} no se relaciona de buena forma a los resultados de las simulaciones. Es posible sostener que todas las simulaciones se encuentran clasificadas en los cuadrantes ii y iii donde el oleaje se considera dominante, por ende, toda el agua fresca de la descarga debería quedar atrapada en la zona de surf, pero al analizar los resultados de la salinidad superficial de las simulaciones existen claros escapes de agua fresca, tal como los resultados que se pueden ver en la Figura 14 a, 25 y 26. Esta situación genera motiva a buscar un nuevo límite de clasificación que encasille correctamente los datos de análisis de estudio. El nuevo límite de clasificación se encuentra señalado mediante una línea continua color verde ubicada en $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$ (Figura 19).

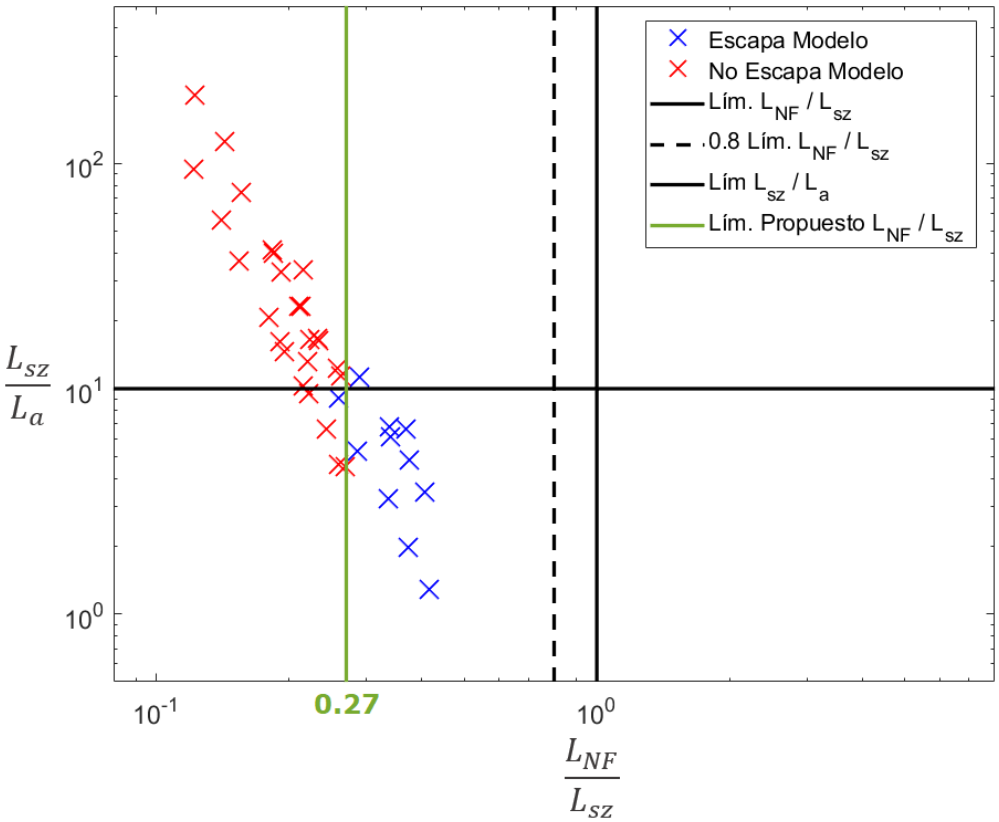


Figura 19: *Esquema grafico de clasificación mediante L_{sz}/L_a y L_{NF}/L_{sz}. Modelos definidos como "No Escapa" (marcador rojo). Modelos definidos como "Escapa" (marcador azul). Límite de clasificación para L_{sz}/L_a (línea horizontal). Límite de clasificación para L_{NF}/L_{sz} (línea continua vertical) y límite de posible escape para L_{NF}/L_{sz} (línea vertical segmentada). Límite de clasificación propuesto (línea verde).*

Considerar $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$ como límite de clasificación genera un nuevo marco de referencia bajo el cual se encuentran dos simulaciones clasificadas inconsistentemente, las que se identifican y detallan en la Tabla 8.

Tabla 8: *Simulaciones con clasificación inconsistente*

Modelo	L_{sz}/L_a	L_{NF}/L_{sz}	**Clasificación visual salinidad superficial**	**Mediante escalas de longitud**	
				Clasificación	**Control hidrodinámico***
7	11.4	0.290	Escapa	No Escapa	Corriente costera
36	9.0	0.259	Escapa	No Escapa	Oleaje

*Control hidrodinámico basado en límite de clasificación $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$.

Las simulaciones 7 y 36 clasifican de forma incorrecta mediante el esquema de clasificación propuesto, sin embargo, ambos valores (L_{sz}/L_a y L_{NF}/L_{sz}) se encuentran muy cerca de los límites de clasificación de forma que ningún agente hidrodinámico (oleaje, descarga o corriente costera)

domine de forma indiscutible. La Figura 20 contiene los resultados de salinidad, altura significativa y corriente costera para ambas simulaciones, los dos casos reflejan zonas de baja salinidad fuera de la zona de rompiente en el mapa de salinidad superficial lo cual se traduce a una clasificación visual de “Escapes”.

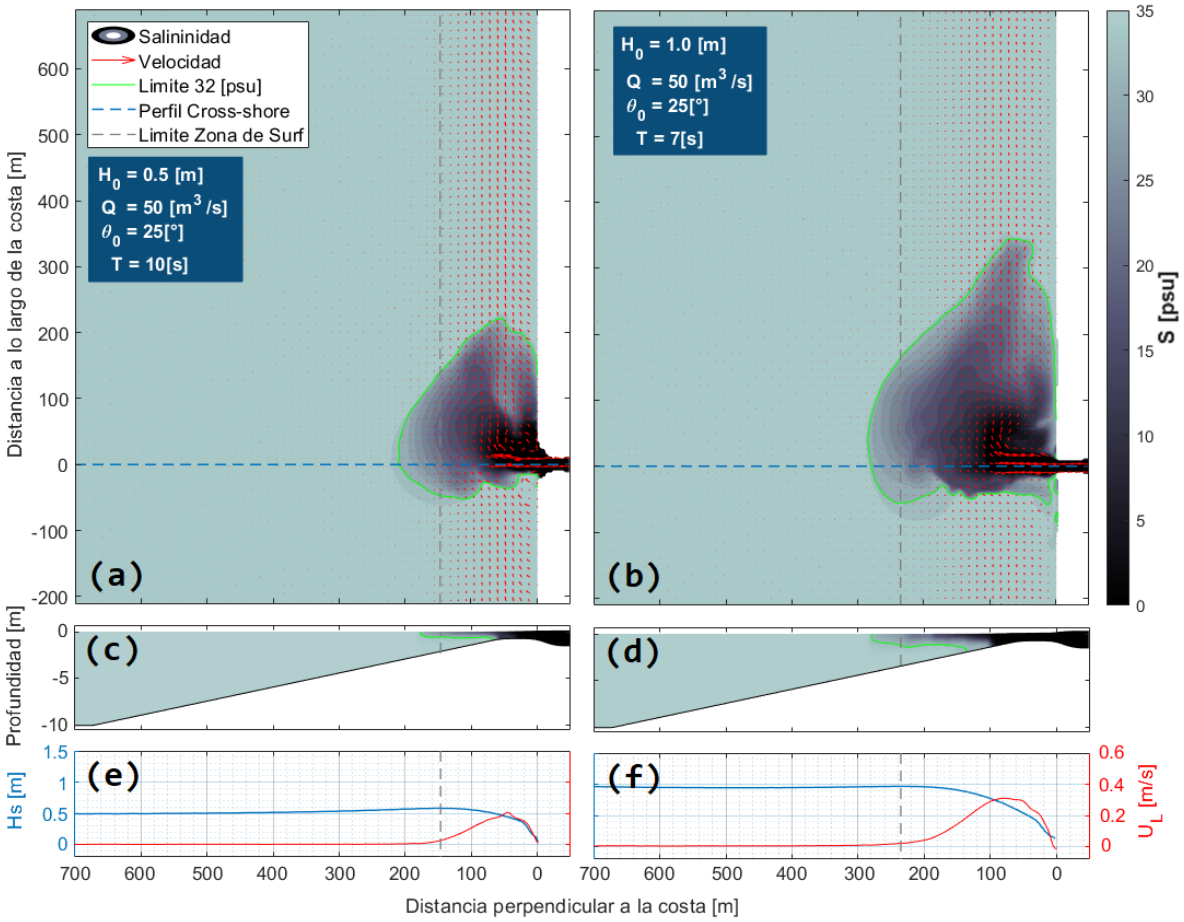


Figura 20: *Resultados simulaciones mal clasificadas. Condiciones de oleaje y descarga de cada modelo presentada en su respectivo panel (cuadro azul). (a)-(b) Mapas de salinidad superficial t=2700 [s], flechas rojas indican dirección del flujo (U_L y V_L), perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul), limite costa afuera zona de surf (línea segmentada gris) y contorno limite 32 [psu] (línea verde). (c)-(d) Salinidad y batimetría en perfil cross-shore. (e)-(f) Altura significativa (línea azul) y velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección a la costa (línea roja).*

5 Discusión

5.1 Configuración modelo numérico

Este estudio considera varias simplificaciones en su planteamiento. Las simulaciones numéricas emplean un dominio idealizado con pendiente constante y uniforme a lo largo de la costa, el forzamiento de las olas es simplificado y se reduce a ondas de igual altura, periodo y dirección (ondas monocromáticas). Estas simplificaciones generan que el campo de corrientes costeras sea relativamente uniforme a lo largo de la costa, mientras que bajo condiciones complejas de oleaje y batimetría se podrían producir efectos locales que afecten a las corrientes, llegando a alterar el transporte de material y sedimentos de los modelos. Los efectos locales pueden surgir como consecuencia de un oleaje definido espectralmente con dispersión direccional, utilizar batimetría compleja no uniforme a lo largo de la costa, incluir barras, irregularidades como canales u obstáculos como roqueríos o rompeolas, o incluir el efecto del viento y mareas. Estas condiciones que pueden generar remolinos de baja frecuencia, corrientes de resaca (Dalrymple et al., 2011; Bowen, 1969) o simplemente diferencias en los flujos costeros. Sin embargo, el objetivo de este estudio es comparar y clasificar los resultados de distintos sistemas costeros en donde los principales factores que afectan la hidrodinámica sean la descarga costera y el oleaje, al emplear estas simplificaciones es posible aislar estas variables para analizar el sistema.

Los parámetros físicos tales como viscosidad (eddy viscosity), viscosidad de fondo (background viscosity), difusividad (eddy diffusivity), coeficiente de roce, parámetros de control de rotura de oleaje, permanecen inalterados en todas las simulaciones. En su mayoría, se utilizan los parámetros propuestos en el manual del modelo numérico SWASH (Zilema et al., 2010), ya que no se cuenta con información o datos adicionales que permitan especificar parámetros realistas. Otro aspecto físico importante en la configuración del modelo corresponde al uso de salinidad como único diferenciador entre el agua fresca de la descarga y el agua salada del océano ya que habitualmente se utiliza para identificar y analizar las plumas de los ríos (Rodriguez et al., 2018), dejando fuera de análisis la diferencias de temperatura, la carga de sedimentos, etc. sin embargo no descarta que en el futuro se incorporen nuevas variables y las simplificaciones empleadas puedan ser reducidas.

La discretización empleada en el dominio de modelación es un factor relevante para obtener resultados precisos y confiables. Al utilizar una discretización con un mayor grado de detalle se gana precisión en los resultados, pero el costo computacional aumenta rápidamente puesto que el modelo debe resolver un mayor número de celdas con un menor paso de tiempo, para que el número de Courant (C_r) se mantenga en los límites definidos para la simulación. La discretización horizontal y vertical fueron definidas a partir de un equilibrio entre precisión en los resultados y costo computacional aceptable.

La selección de los parámetros de caudal y oleaje debe cubrir un rango continuo para así reproducir todos los posibles estados del sistema costero. Los límites del rango de caudales empleados se establecen a partir de la experiencia en datos históricos de pequeños sistemas costeros chilenos (Peña-Guerrero et al., 2020), mientras que el rango de oleajes fue seleccionado a partir de la relación que tienen con el rango de caudales esto significa que el caudal de descarga y el oleaje tengan un orden de magnitud similar (Ulazia et al., 2018) y en los resultados de las simulaciones se puedan

encontrar escenarios en los cuales la descarga logra cruzar la zona de surf y simulaciones donde queda atrapada.

El tiempo de simulación constituye un factor que puede llegar a condicionar los resultados que se obtienen de las simulaciones, por un lado, se tiene el costo computacional asociado a las simulaciones el cual se relaciona directamente con el tamaño de la grilla, extensión del dominio computacional, discretización vertical y paso de tiempo. Todas estas variables se deben balancear para asegurar confiabilidad en los resultados generados manteniendo las simulaciones en una escala de tiempo prudente. En el caso de este estudio se simularon casos en los cuales la hidrodinámica es evidente a los pocos minutos de simulación, mientras que en otras simulaciones el tiempo final de simulación parece no haber sido suficiente para determinar con total certeza si la descarga está atrapada o escapa. Estos últimos casos representan una minoría. Con esto en consideración se define el tiempo de simulación en 45 minutos, pero no se descarta ampliar el tiempo de simulación en estudios futuros. En tiempos de cómputo, los 45 minutos de modelo toman alrededor de 1 día, en un laptop con capacidades promedio.

5.2 Esquema conceptual de clasificación

Al analizar los resultados obtenidos para el esquema de clasificación es posible afirmar que ambas escalas de longitud utilizadas L_a y L_{NF} son parámetros que permiten ordenar sistemas costeros con diferentes condiciones de descarga, oleaje y corrientes en función de la capacidad de la descarga para adentrarse y eventualmente escapar de la zona de surf. El esquema grafico presentado en la Figura 19 es evidencia del orden generado al clasificar las simulaciones en función de la magnitud relativa de las escalas de longitud y el ancho de la zona de surf del sistema.

Para estudiar la efectividad que tiene el esquema de clasificación para predecir el control hidrodinámico existente en cada una de las simulaciones es conveniente analizar cada eje y límite de clasificación de forma aislada debido a que en el esquema estudiado se obtienen resultados diferentes para cada una de las escalas de longitud. En primer lugar, la escala de longitud del flujo cruzado (L_a, eje vertical esquema de clasificación) clasifica correctamente 36 simulaciones utilizando el límite $L_{sz}/L_a = 10$ (Wong et al., 2013) mientras que solo una simulación es clasificada incorrectamente, los resultados de esta simulación muestran regiones de baja salinidad fuera de la zona de surf indicando la existencia de escapes de agua fresca (Figura 20 a), en este caso el esquema predice que la dinámica está controlada por la corriente costera impidiendo que la descarga supere la zona de surf. En segundo lugar, la clasificación mediante la escala de longitud del campo cercano muestra que el límite estudiado $L_{NF}/L_{sz} = 1$ (Kastner et al., 2019) no se ajusta a los resultados ya que cada simulación se clasifica por debajo de este límite a pesar obtener claros escapes de agua fresca fuera de la zona de surf en 9 casos, debido a esto cualquier análisis de la pertinencia del límite se hace impracticable por lo cual se opta por seleccionar y analizar un nuevo límite de clasificación que se ajuste a los datos. El límite de clasificación propuesto corresponde a $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$, este límite separa con buena precisión las simulaciones, se obtiene solo un error de clasificación (Figura 20 b), al igual que en el caso mencionado anteriormente los resultados de esta simulación muestran regiones fuera de la zona de surf con agua fresca proveniente de la descarga, en esta ocasión el esquema de clasificación predice que la dinámica es controlada por el oleaje dejando confinada la descarga dentro de la zona de surf.

La escala de longitud del campo cercano es un parámetro sensible a la batimetría y en específico a la geometría del canal de la descarga. En primer lugar, la forma del canal influye en el momentum que una descarga costera tiene al momento de ingresar en la zona de surf, para un mismo caudal un canal pequeño implica mayores velocidades de salida y por lo tanto mayor momentum. También el largo del canal constituye una barrera para el caudal que fluye por la descarga, un canal largo conduce el caudal dentro de la zona de surf reduciendo la distancia de interacción directa entre la descarga y la rompiente de oleaje, esta situación puede producir un transporte de agua fresca distinto a un caso en el cual la descarga se enfrenta a todo el ancho de la zona de rompiente.

5.3 Esquemas conceptuales de clasificación alternativos

5.3.1 Esquema de clasificación a partir de $\boldsymbol{L_{NF,Fr=1}}$

Un factor importante en los resultados entregados por el esquema de clasificación corresponde a la ubicación donde las escalas de longitud son calculadas, debido a esto se estudian ubicaciones y formas alternativas de cuantificar dichos parámetros. En el caso de la escala de longitud de flujo cruzado se opta por utilizar los datos de velocidad en la boca de la descarga ya que en esta región las paredes del canal reducen la influencia de las corrientes costeras en la velocidad de salida de la descarga, lo que resulta en una estimación más representativa del momentum de la descarga. Por otra parte, en el caso de la escala de longitud del campo cercano, LNF, es posible de calcular en dos ubicaciones y de dos formas diferentes este parámetro, el primer lugar corresponde a la boca de la descarga, sus resultados fueron presentados en la Figura 19, el segundo lugar corresponde a la ubicación donde el flujo de la descarga pasa por estado crítico ($Fr = 1$).

La escala de longitud del campo cercano por definición debe ser calculada donde el flujo es exactamente crítico (Hetland, 2010), con un número de Froude igual a uno ($Fr = 1$). El valor de la escala de longitud del campo cercano calculada en la posición donde el flujo es crítico se designa como $L_{NF,Fr=1}$, esta ubicación es diferente para cada simulación y depende tanto del caudal de la descarga como de las condiciones del oleaje. Los resultados de clasificación usando esa definición de la escala de longitud del campo cercano se muestran en la Figura 21.

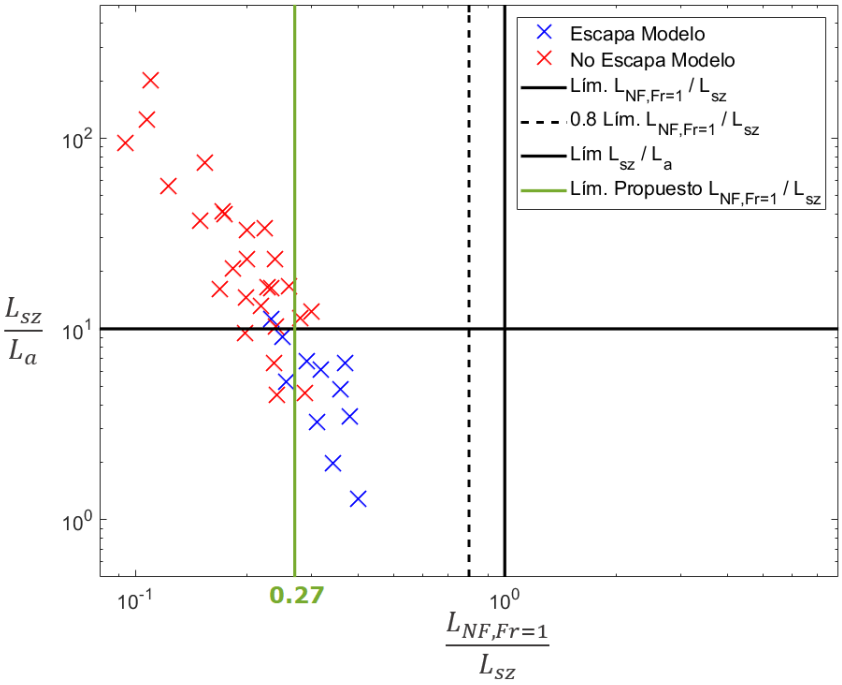


Figura 21: *Esquema de clasificación mediante L_{sz}/L_a y $L_{NF,Fr=1}/L_{sz}$. Modelos definidos como "No Escapa" (marcador rojo). Modelos definidos como "Escapa" (marcador azul). Límite de clasificación para L_{sz}/L_a (línea horizontal). Límite de clasificación para $L_{NF,Fr=1}/L_{sz}$ (línea continua vertical) y límite de posible escape para $L_{NF,Fr=1}/L_{sz}$ (línea vertical segmentada). Límite de clasificación propuesto (línea verde).*

La distribución de los datos obtenida a partir de $L_{NF,Fr=1}$ se muestra en la Figura 21, los resultados son muy similares a lo mostrado en la Figura 19, ya que todas las simulaciones se sitúan en el cuadrante 2 y 3 pese a que existen casos donde la descarga escapa de la zona de surf y otros donde no lo hace. Al introducir el cambio en el cálculo de la escala de longitud del campo cercano y mantener el nuevo límite de clasificación estudiado ($L_{NF,Fr=1}/L_{sz} = 0.27$), el número de simulaciones mal clasificadas aumenta a 4 y la división entre las simulaciones que escapan y las no lo hacen se vuelve más difusa producto de estimar parámetros de la descarga en ubicaciones altamente caóticas producto de la rotura del oleaje.

5.3.2 Esquema de clasificación a partir de $L_{NF,Fr=1}$ y $L_{sz,red}$

A partir del cálculo de $L_{NF,Fr=1}$, se abre una nueva ventana para clasificar los modelos mediante la magnitud relativa entre la escala de longitud del campo cercano calculado en $y_{Fr=1}$ y la distancia entre $y_{Fr=1}$ y el límite costa afuera de la zona de surf. Este nuevo parámetro será designa como $L_{sz,red}$, y corresponde a un ancho de zona de surf efectivo. La Figura 22 contiene el esquema de clasificación considerando esta variación, donde se puede ver que el límite de clasificación mediante

la escala de longitud del campo cercano se torna más cercano al valor LNF/LSZ=1 propuesto por Kastner et al. (2019).

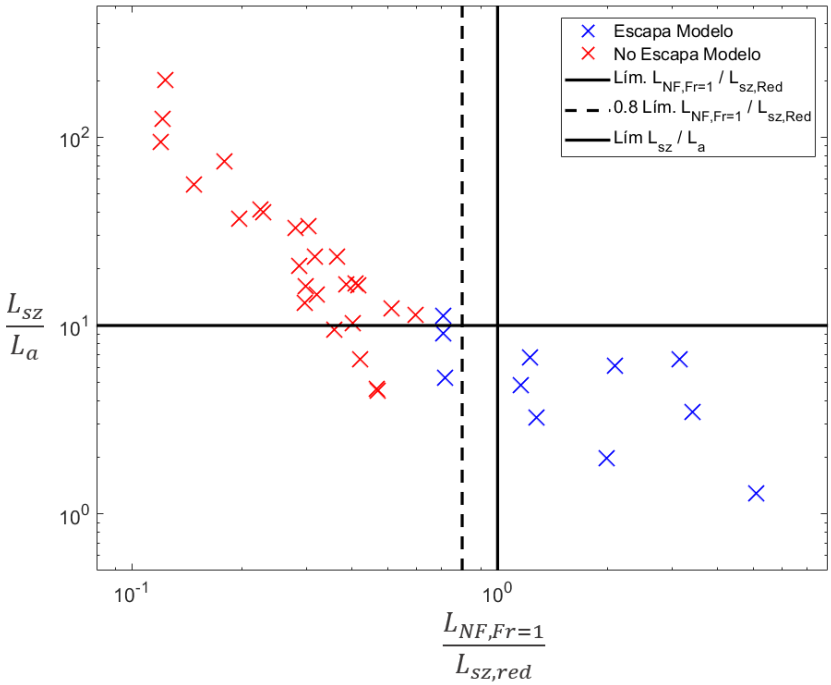


Figura 22: *Esquema de clasificación mediante L_{sz}/L_a y $L_{NF,Fr=1}/L_{sz,red}$. Modelos definidos como "No Escapa" (marcador rojo). Modelos definidos como "Escapa" (marcador azul). Límite de clasificación para L_{sz}/L_a (línea horizontal). Límite de clasificación para $L_{NF,Fr=1}/L_{sz,red}$ (línea continua vertical) y límite de posible escape para $L_{NF,Fr=1}/L_{sz,red}$ (línea vertical segmentada).*

Predicciones del destino del agua fresca en sistemas costeros mediante LNF calculada en $y_{Fr=1}$ es sencillo sólo en simulaciones numéricas, puesto que las condiciones simplificadas de los modelos mantienen esta ubicación inalterable una vez que se alcanza el equilibrio hidrodinámico. Adicionalmente, se cuenta con datos del flujo, salinidad (densidad) y profundidad de descarga en todo el dominio, y por tanto basta con identificar la ubicación donde el flujo de la descarga se vuelve crítico para proceder con el cálculo de LNF. En la práctica el flujo pasa por estado crítico en una ubicación variable y difícil de determinar ya que depende de la interacción de la descarga, oleaje, mareas, vientos, etc. Obtener esta ubicación en terreno es impracticable a no ser que se cuente con perfiles longitudinales de salinidad y velocidad, extremadamente difíciles de obtener en la zona de rompiente.

5.4 Calculo simplificado de escalas de longitud

Contar con una herramienta simple que permita predecir el destino final de las aguas con un grado de confiabilidad aceptable tiene gran valor, y por esta razón se realiza un análisis simplificado de las escalas de longitud calculadas a partir de los parámetros de entrada de los modelos

- *Q:* Caudal de descarga

- H_0: Altura de ola costa afuera
- θ_0: Dirección de ola costa afuera
- w: ancho canal de descarga
- h_j: Profundidad de canal de descarga

El objetivo de este análisis es contrastar los resultados de los modelos con estimaciones simples basadas en parámetros fáciles de obtener desde datos en terreno en un sistema costero altamente controlado por la interacción oleaje-rio.

Las simplificaciones realizadas se detallan en la Tabla 9:

Tabla 9: *Simplificaciones para cálculo estimado de escalas de longitud*

1	$h_j \approx 1.198$	La altura de escurrimiento de la descarga corresponde a la altura media de todas las simulaciones.
2	$v_0 = \frac{Q}{w * h_j}$	Velocidad de salida de la descarga corresponde al caudal dividido en el área de la descarga.
3	$h_p = h_j$	La altura de la pluma corresponde a la altura de la descarga.
4	$\Delta\rho = 27 \left[\frac{kg}{m^3}\right] \rightarrow g' = 0.2575 \left[\frac{m}{s^2}\right]$	La densidad de la pluma corresponde a la densidad del agua fresca (no se considera la mezcla)
5	U_{sz}	Se calcula a partir de alguna expresión analítica, en este caso se utiliza la expresión definida en la Ec. 6.

Utilizando estas consideraciones se formulan las siguientes expresiones para el cálculo de las escalas de longitud:

$$L_{NF} = \frac{Q^{\frac{1}{4}} * hj^{\frac{3}{8}}}{0.02^{\frac{3}{4}} * g'^{\frac{1}{8}}} = 22.27 * Q^{\frac{1}{4}} * hp^{\frac{3}{8}} \qquad \text{(Ec. 7)}$$

$$L_a = \frac{Q}{(w * hp)^{\frac{1}{2}} * U_{sz}} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

La Tabla 10 contiene los resultados de las escalas de longitud utilizando las expresiones simplificadas descritas en las Ec. 7 y 8.

Tabla 10: *Estimación de escalas de longitud mediante expresiones simplificadas.*

Modelo	LNF	La	Modelo	LNF	La
1	35.7	14.0	**18**	53.3	11.3
2	46.9	41.9	**19**	58.0	15.8
3	53.3	69.9	**20**	63.4	22.5
4	58.0	97.8	**21**	35.7	3.1
5	63.4	139.8	**22**	46.9	9.4
6	35.7	5.6	**23**	53.3	15.7
7	46.9	16.8	**24**	58.0	22.0
8	53.3	28.0	**25**	63.4	31.5
9	58.0	39.1	**26**	75.4	62.9
10	63.4	55.9	**27**	35.7	1.3
11	35.7	5.6	**28**	46.9	3.8
12	46.9	16.9	**29**	53.3	6.3
13	53.3	28.2	**30**	58.0	8.8
14	58.0	39.4	**31**	63.4	12.6
15	63.4	56.3	**32**	69.0	17.6
16	35.7	2.3	**33**	75.4	25.2
17	46.9	6.8			

Al comparar los valores derivados del cálculo simplificado con los obtenidos directamente de las simulaciones, se observa que la diferencia entre ambos valores se encuentra en torno al 4.09% para L_{NF} y 15.1% en el caso de L_a, en términos del valor absoluto de la variación tomando los resultados de la simulación como referencia (Figura 23).

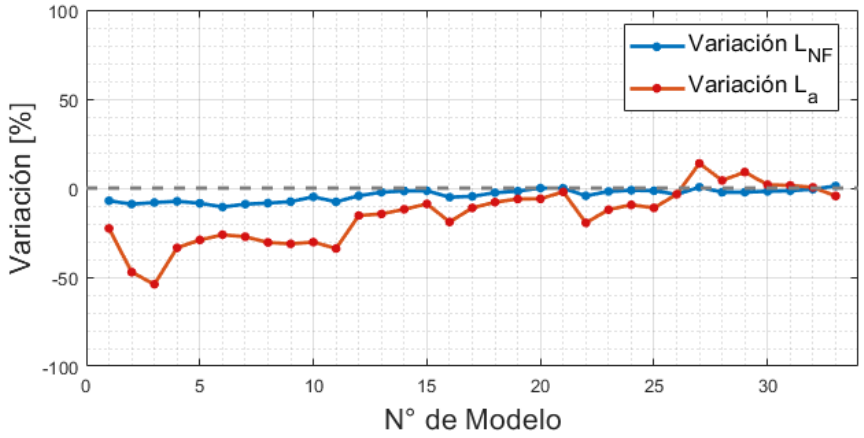


Figura 23: *Variación porcentual de estimación simplificada escalas de longitud.*

Se calcula la magnitud relativa de las escalas de longitud simplificadas con respecto al ancho de la zona de surf y los resultados se muestran en el esquema grafico de clasificación presentado en la

Figura 24. En la Figura 24 los puntos se ordenan sobre una banda oblicua exhibiendo límites de clasificación análogos a los discutidos y encontrados en la Figura 19. Los límites de clasificación $L_{sz}/L_a = 10$ y $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$ son consistentes con este nuevo análisis. La disposición de los puntos en la Figura 24 es interesante ya que las simulaciones se ordenan sobre lo que se podría considerar como dos líneas rectas paralelas con inclinación, este orden se debe al efecto del ángulo de incidencia del oleaje únicamente sobre la magnitud relativa del flujo cruzado, mientras que al basarnos en la expresión analítica con la cual se calcula la escala de longitud del campo cercano simplificada se afirma que no existe dependencia de este parámetro. En la realidad, el ángulo de incidencia del oleaje influye en los flujos y velocidades de todo el dominio, en especial los de la zona de surf, por lo cual sí se genera influencia en mayor o menor medida sobre L_{NF}, y esto se expresa en la Figura 19 donde no se aprecia la formación dos rectas en forma clara.

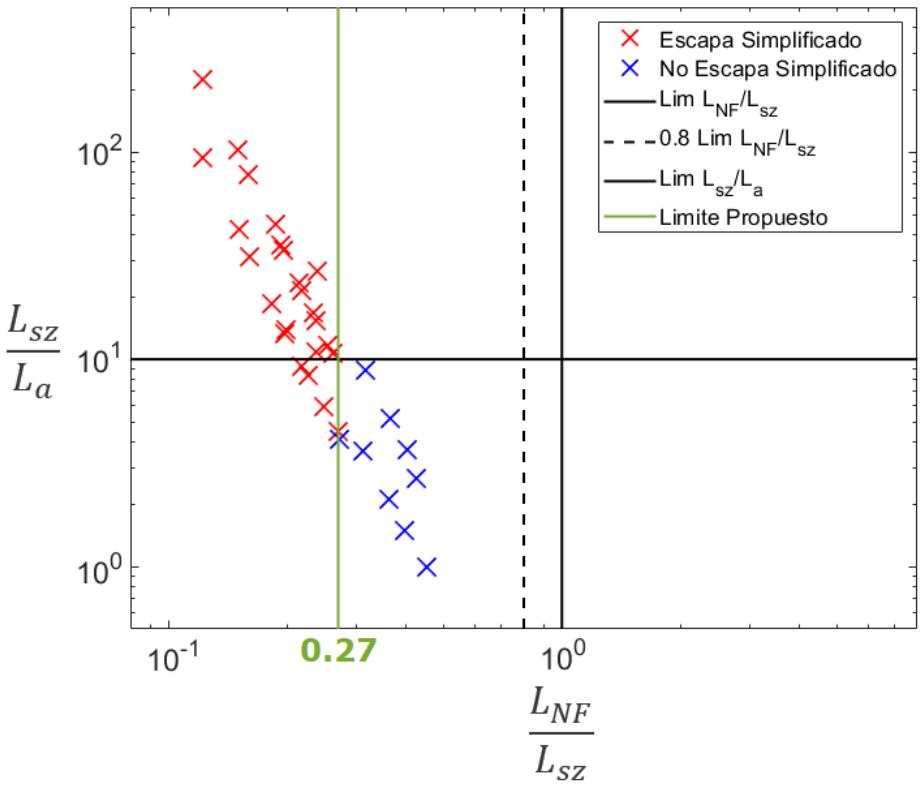


Figura 24: *Esquema grafico de clasificación para escalas de longitud L_{sz}/L_a y L_{NF}/L_{sz} simplificadas. Modelos definidos como "No Escapa" (marcador rojo). Modelos definidos como "Escapa" (marcador azul). Límite de clasificación para L_{sz}/L_a (línea horizontal). Límite de clasificación para L_{NF}/L_{sz} (línea continua vertical) y límite de posible escape para L_{NF}/L_{sz} (línea vertical segmentada). Límite de clasificación propuesto (línea verde).*

Los resultados obtenidos mediante el análisis simplificado presentan gran similitud con los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas, por tanto, el cálculo simplificado propuesto puede ser utilizado para estimar rápidamente las escalas de longitud para aplicar el esquema de clasificación y así predecir el destino de las aguas.

5.5 Casos distinto periodo de ola

El esquema de clasificación estudiado se debe ajustar a una amplia variedad de parámetros hidrodinámicos. Para ampliar los parámetros definidos inicialmente se simularon casos especiales con periodo de ola de $T = 7\ y\ 14\ [s]$ para hacer visibles las diferencias y apreciar el impacto que genera este parámetro en la hidrodinámica con respecto a las simulaciones con periodo de ola $T = 10\ [s]$.

Las diferencias más notables en los resultados de las simulaciones variando únicamente el periodo de ola se generan en la zona de surf, principalmente en su ancho y en la magnitud de la corriente costera generada. De acuerdo con estos resultados, un periodo de ola más alto genera una corriente con mayor velocidad en dirección a la costa sumado a un mayor ancho de la zona de rompiente, por lo tanto, sería posible inferir que condiciones de oleaje de mayor periodo tienen una mayor tendencia a atrapar la descarga costera dentro de la zona de rompiente, si el resto de los parámetros se mantiene constante.

La Figura 25 contiene los resultados hidrodinámicos de modelos con altura de ola, dirección de oleaje y caudal de descarga de $H_0 = 0.5\ [m]$, $\theta_0 = 25\ [°]$ y $Q = 35\ [m^3/s]$, respectivamente. Para el modelo con menor periodo ($T = 7\ [s]$) la corriente costera generada tiene una velocidad máxima en dirección paralela a la costa de $0.19\ [m/s]$ mientras que para el modelo con mayor periodo ($T = 14\ [s]$) la velocidad fue de $0.22\ [m/s]$. Con respecto al ancho de la zona de surf, se obtuvo $110\ [m]$ y $160\ [m]$ para el menor y mayor periodo, respectivamente.

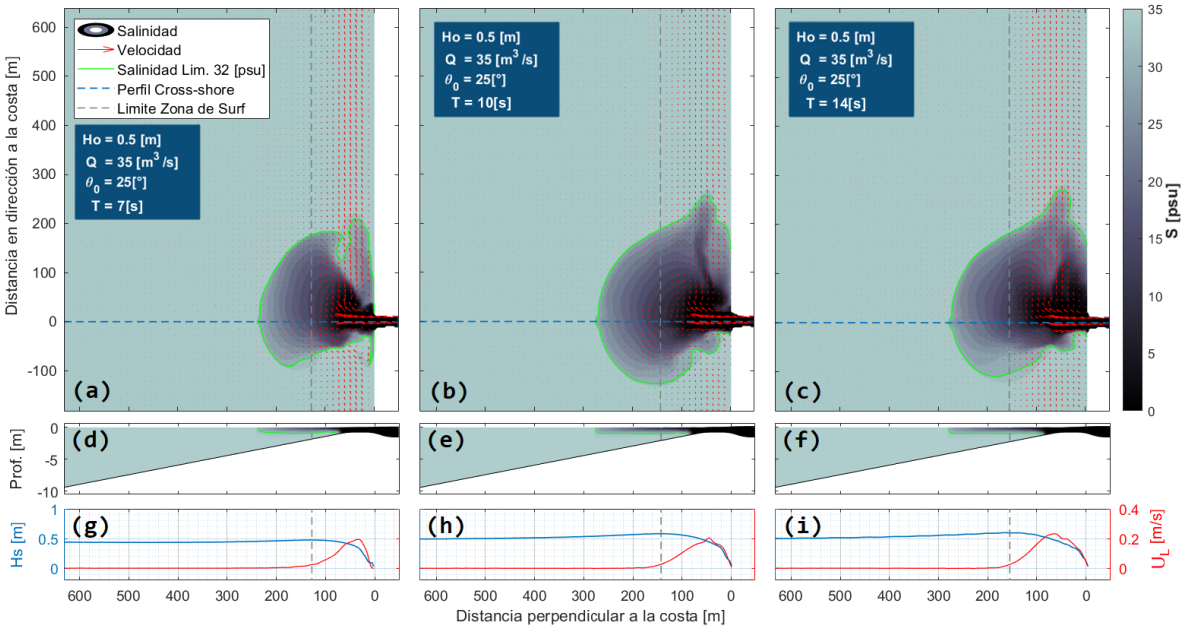


Figura 25: *Resultados modelos para diferentes periodos de ola. Condiciones de oleaje y descarga de cada modelo presentada en su respectivo panel (cuadro azul). (a)-(b)-(c) Mapas de salinidad superficial t=2700 [s], flechas rojas indican dirección del flujo, perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul), limite costa afuera zona de surf (línea segmentada gris) y contorno limite 32 [psu] (línea verde). (d)-(e)-(f) Salinidad y*

batimetría en perfil cross-shore. (g)-(h)-(i) Altura significativa (línea azul) y velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección a la costa (línea roja).

La Figura 26 muestra tres casos con altura de ola, dirección de oleaje y caudal de descarga de $H_0 = 1.0\ [m]$, $\theta_0 = 25\ [°]$ y $Q = 50\ [m^3/s]$, respectivamente. Se simularon tres casos con estas condiciones variando únicamente el periodo de ola, utilizando periodos de $T = 7, 10\ y\ 14\ [s]$. Los resultados obtenidos fueron análogos a los mostrados en la Figura 25; un mayor periodo de ola implica mayor ancho de la zona de surf y también mayor velocidad en dirección paralela a la costa en la zona de rompiente.

Las simulaciones presentadas en la Figura 26 se destacan debido a que el forzante del oleaje para el modelo con periodo de ola $T = 10\ [s]$ se encuentra cerca del equilibrio frente al momentum de la descarga costera. Esto quiere decir que la descarga se extiende muy cerca del límite de la zona de surf, por lo tanto, al disminuir el periodo a $T = 7\ [s]$ la descarga puede escapar levemente de la zona de rompiente mientras que al aumentar el periodo a $T = 14\ [s]$ la descarga queda ligeramente confinada en la zona de surf.

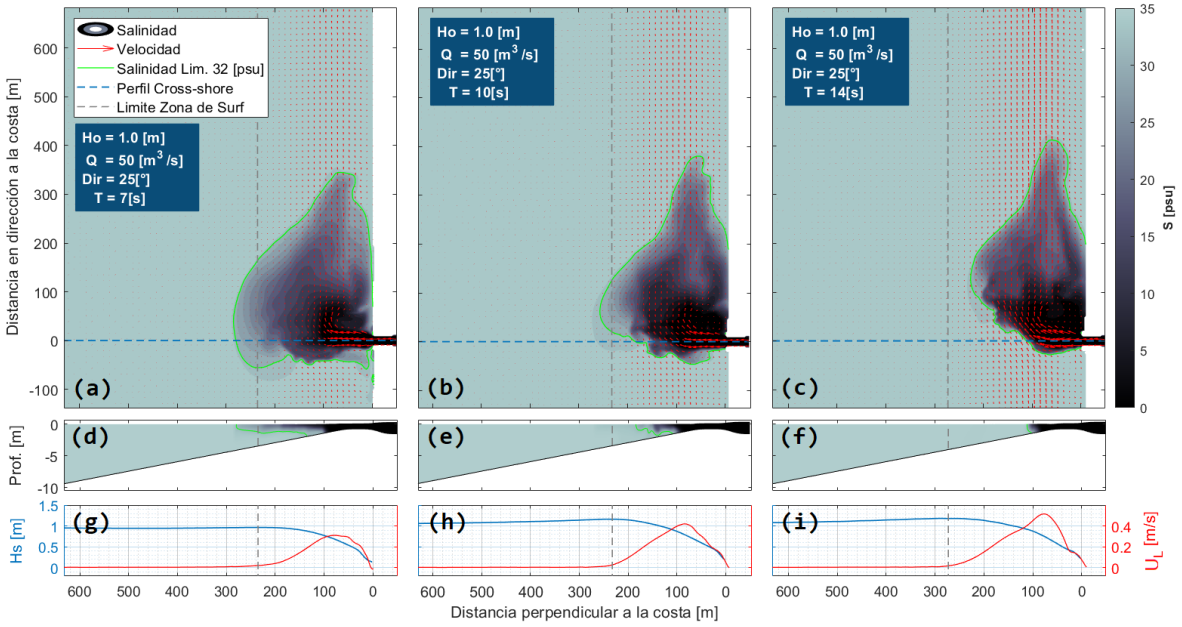


Figura 26: *Resultados modelos para diferentes periodos de ola. Condiciones de oleaje y descarga de cada modelo presentado en su respectivo panel (cuadro azul). (a)-(b)-(c) Mapas de salinidad superficial t=2700 [s], flechas rojas indican dirección del flujo (U_L y V_L), perfil cross-shore presentado (línea segmentada azul), limite costa afuera zona de surf (línea segmentada gris) y contorno limite 32 [psu] (línea verde). (d)-€-(f) Salinidad y batimetría en perfil cross-shore. (g)-(h)-(i) Altura significativa (línea azul) y velocidad de onda lagrangiana promedio en dirección a la costa (línea roja).*

6 Conclusiones

Este estudio analiza la hidrodinámica y la estructura de los flujos costeros flotantes de pequeña escala mediante parámetros o escalas de longitud representativas del proceso de interacción entre el rio y el oleaje. El análisis se realiza bajo un enfoque de simulación numérica en el cual se utiliza un sistema costero simplificado con distintas condiciones de oleaje y caudales de descarga, escala que permiten generar una base de datos para su posterior estudio y análisis. El marco de clasificación aplicado a los distintos escenarios costeros generados está basado, en primer lugar, en la escala de longitud del flujo cruzado (Wong et al., 2013), variable que relaciona el momentum de salida de la descarga con la velocidad máxima de la zona de surf en dirección a la costa, entregando una medida o dimensión de la capacidad del oleaje incidente para curvar la descarga y atraparla en la zona de surf. El segundo eje de clasificación utiliza la escala de longitud del campo cercano (Kastner et al, 2019), la cual es una medida del tamaño de la región en la cual el comportamiento de la descarga está controlado por los efectos inerciales o de momentum, entregando una medida de la capacidad que tiene la descarga para mantener el comportamiento que le permite adentrarse y/o cruzar la zona de surf. El marco de clasificación se completa al contrastar las escalas de longitud con el ancho de la zona de surf, que depende netamente del campo de oleaje incidente y la batimetría, incluyendo así una medida del tamaño de la región en la cual ingresa la descarga.

El modelo numérico SWASH (Zilema et al., 2010) permitió simular y obtener resultados bajo una amplia variedad de condiciones tanto de oleaje como de descarga. Estos resultados presentan gran valor debido a la posibilidad de aplicar la metodología o marco de clasificación propuesto en este estudio.

Al aplicar la metodología al conjunto de datos generados se afirma que la interacción rio-oleaje se puede caracterizar en base a las magnitudes relativas de las escalas de longitud descritas anteriormente, debido a que gráficamente se observa un orden entre simulaciones que escapan y las que no lo hacen. Inicialmente, se pretendía diferenciar cuatro comportamientos, cada uno de ellos marcado por el control de un factor o agente hidrodinámico, situación que se puede visualizar gráficamente como cuatro cuadrantes divididos por los valores límites $L_{sz}/L_a = 10$ (Wong et al., 2013) y $L_{NF}/L_{sz} = 1$ (Kastner et al., 2019). Sin embargo, estos valores no son del todo precisos para clasificar nuestros de datos, en consecuencia, fue necesario modificar el límite de clasificación de la escala de longitud del campo cercano a $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$.

Es probable que se requiera realizar más análisis respecto de L_{NF}. Se debe ampliar el rango parámetros como ángulo de incidencia del oleaje, se deben realizar simulaciones utilizando un gradiente de densidad diferente entre el agua de la descarga y el océano. También se deben realizar simulaciones considerando distintas pendientes de playa, ancho y largo de canal en la batimetría, para analizar el impacto de estas variables sobre la escala de longitud en el campo cercano.

El esquema conceptual de clasificación propuesto se muestra en la Tabla 11 y el esquema grafico de clasificación junto con los resultados de las escalas de longitud de las simulaciones se muestra en la Figura 25.

Tabla 11: *Esquema conceptual de clasificación propuesto.*

Clasificación		Comportamiento	Control
L_{sz}/L_a	L_{NF}/L_{sz}		
> 10	> 0.27	Las corrientes a lo largo de la costa atrapan dentro de la zona de surf el flujo de la descarga, a pesar de que el impulso del rio sea lo suficiente para vencer el forzante de oleaje.	***(i)*** Control de las corrientes
> 10	< 0.27	El oleaje incidente y la corriente costera son capaces por si solos de atrapar el flujo de la descarga en la zona de surf.	***(ii)*** Control de las corrientes o del oleaje
< 10	< 0.27	El oleaje incidente atrapa el agua del rio por la pérdida de momentum que genera en la descarga. La corriente en la zona de surf es insuficiente por si sola para confinar la descarga.	***(iii)*** Control del oleaje
< 10	> 0.27	El impulso de la descarga es lo suficientemente fuerte para superar el forzante de oleaje y la corriente costera logrando escapar de la zona de rompiente.	***(iv)*** Control del rio

En conclusión, basados en el esquema de clasificación y los límites propuestos, es posible afirmar que el agua fresca transportada por la descarga quedaría atrapada cuando exista un control del oleaje, corrientes costeras o ambas juntas, corresponde a los cuadrantes y clasificaciones ***(i), (ii)*** y ***(iii),*** mientras que el escape de las aguas del rio expresado en el control del rio queda correspondiente a la clasificación ***(iv).***

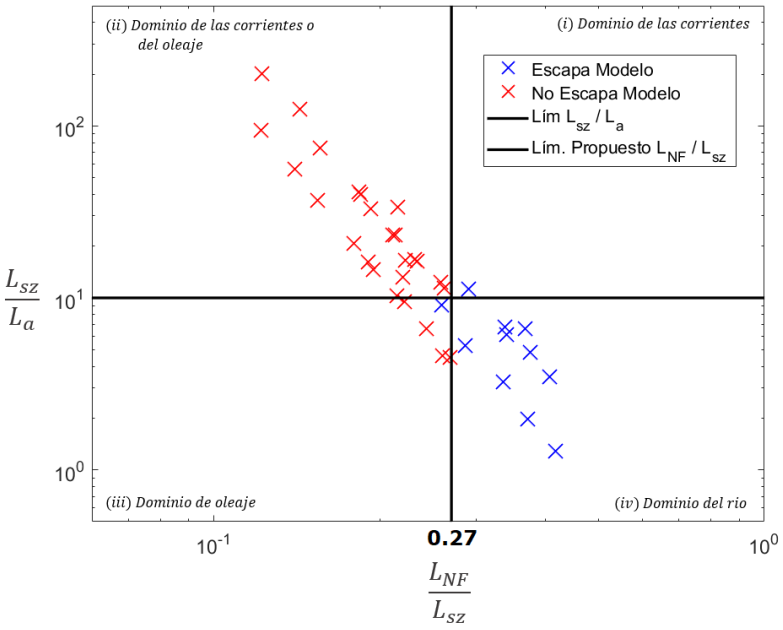


Figura 27: Esquema grafico de clasificación para escalas de longitud L_{sz}/L_a y L_{NF}/L_{sz}. Modelos definidos como "No Escapa" (marcador rojo). Modelos definidos como "Escapa" (marcador azul). Límite de clasificación para $L_{sz}/L_a = 10$ (línea horizontal). Límite de clasificación para $L_{NF}/L_{sz} = 0.27$ (línea vertical).

En la Figura 27, se puede ver que las simulaciones con periodo de ola de 7 y 14 [s], son clasificadas de correctamente bajo el esquema y límites de clasificación propuestos. Este análisis supone un primer paso para extender el análisis y ampliar los valores en los parámetros utilizados o incluir nuevas variables en el análisis, tales como, pendiente del fondo marino, ancho o profundidad de la descarga, etc. O quitar las simplificaciones utilizadas agregando un oleaje mediante un espectro, incluyendo los efectos de la marea o utilizar una batimetría realista.

7 Referencias

Bowen, A. J. (1969). Rip currents: 1. Theoretical investigations. Journal of Geophysical Research, 74(23), 5467-5478.

Dalrymple, R. A., MacMahan, J. H., Reniers, A. J., & Nelko, V. (2011). Rip currents. Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 551-581.

Fischer, H. B., List, J. E., Koh, C. R., Imberger, J., & Brooks, N. H. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic press.

Galvin Jr, C. J. (1967). Longshore current velocity: A review of theory and data. Reviews of Geophysics, 5(3), 287-304.

Hally-Rosendahl, K., Feddersen, F., & Guza, R. T. (2014). Cross-shore tracer exchange between the surfzone and inner-shelf. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(7), 4367-4388.

Hetland, R. D. (2010). The effects of mixing and spreading on density in near-field river plumes. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 49, 37–53. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.11.003

Janssen, T. T., & Battjes, J. A. (2007). A note on wave energy dissipation over steep beaches. Coastal Engineering, 54(9), 711–716. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.05.006

Jirka, G. H., Stolzenbach, K. D., & Adams, E. E. (1981). Buoyant surface jets. Journal of the Hydraulics Division, 107(11), 1467-1487.

Jones, G. R.; Nash, J. D.; Doneker, R. L.; Jirka, G. H. Buoyant surface discharges into water bodies. I: Flow classification and prediction methodology. J. Hydraul. Eng. 2007, 133, 1010.

Kastner, S. E., Horner-Devine, A. R., & Thomson, J. M. (2019). A conceptual model of a river plume in the surf zone. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124, 8060–8078. https://doi.org/10.1029/2019JC015510

Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion (pp. 96-116). Pergamon.

Li, M., Yang, W., Sun, T., & Jin, Y. (2016). Potential ecological risk of heavy metal contamination in sediments and macrobenthos in coastal wetlands induced by freshwater releases: A case study in the Yellow River Delta, China. Marine pollution bulletin, 103(1-2), 227-239. http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.014

Longuet-Higgins, M. S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. Journal of Geophysical Research, 75(33), 6778–6789.

Peña-Guerrero, M. D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L., & Meza, F. (2020). Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. Hydrological Sciences Journal, 65(6), 1005-1021.

Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M. A., Garreaud, R., Belmar, L., & Farías, L. (2018). The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the central chile coast (33–37° S): seasonal cycle and interannual variability. Frontiers in Marine Science, 423.

Mohammadi, B., & Pironneau, O. (1993). Analysis of the k-epsilon turbulence model.

Miche, A (1944). Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur croissante ou decroissante. Premiere partie. Mouvements ondulatoires periodiques et cylindriques en profondeur constante. Annales des Ponts et Chaussees, 114, 42–78.

Raubenheimer, B., Guza, R. T., & Elgar, S. (1996). Wave transformation across the inner surf zone. Journal of Geophysical Research, 101(C11), 25,589–25,597. https://doi.org/10.1029/96JC02433

Rodriguez, A. R., Giddings, S. N., & Kumar, N. (2018). Impacts of nearshore wave-current interaction on transport and mixing of small-scale buoyant plumes. Geophysical Research Letters, 45. https://doi.org/10.1029/2018GL078328

Ruiz-Fernandez, A. C., Sanchez-Cabeza, J. A., Alonso-Hernandez, C., Martínez-Herrera, V., Pérez-Bernal, L. H., Preda, M., ... & Quejido-Cabezas, A. J. (2012). Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico). Continental Shelf Research, 37, 57-65.

Saldías, G. S., Largier, J. L., Mendes, R., Pérez-Santos, I., Vargas, C. A., & Sobarzo, M. (2016). Satellite-measured interannual variability of turbid river plumes off central-southern Chile: spatial patterns and the influence of climate variability. Progress in Oceanography, 146, 212-222.

Shepard, F. P., & Inman, D. L. (1950). Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction. Eos, Transactions American Geophysical Union, 31(2), 196-212.

Shimizu, Y. (1994). Numerical analysis of turbulent open-channel flow over a vegetation layer using a κ-ε turbulence model. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE, 11(2), 57-67.

Thornton, E. B. (1970). Variation of longshore current across the surf zone. In Coastal Engineering 1970 (pp. 291-308).

Ulazia, A., Penalba, M., Rabanal, A., Ibarra-Berastegi, G., Ringwood, J., & Sáenz, J. (2018). Historical evolution of the wave resource and energy production off the Chilean Coast over the 20th Century. Energies, 11(9), 2289.

Wong, S. H., Monismith, S. G., & Boehm, A. B. (2013). Simple estimate of entrainment rate of pollutants from a coastal discharge into the surf zone. Environmental Science & Technology, 47(20), 11,554–11,561. https://doi.org/10.1021/es402492f

Yuan, Y., & Horner-Devine, A. R. (2013). Laboratory investigation of the impact of lateral spreading on buoyancy flux in a river plume. Journal of Physical Oceanography, 43(12), 2588–2610.

Zijlema, M.; Stelling, G.; Smit, P. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coastal Eng. 2011, 58, 992−1012.

8 Anexos

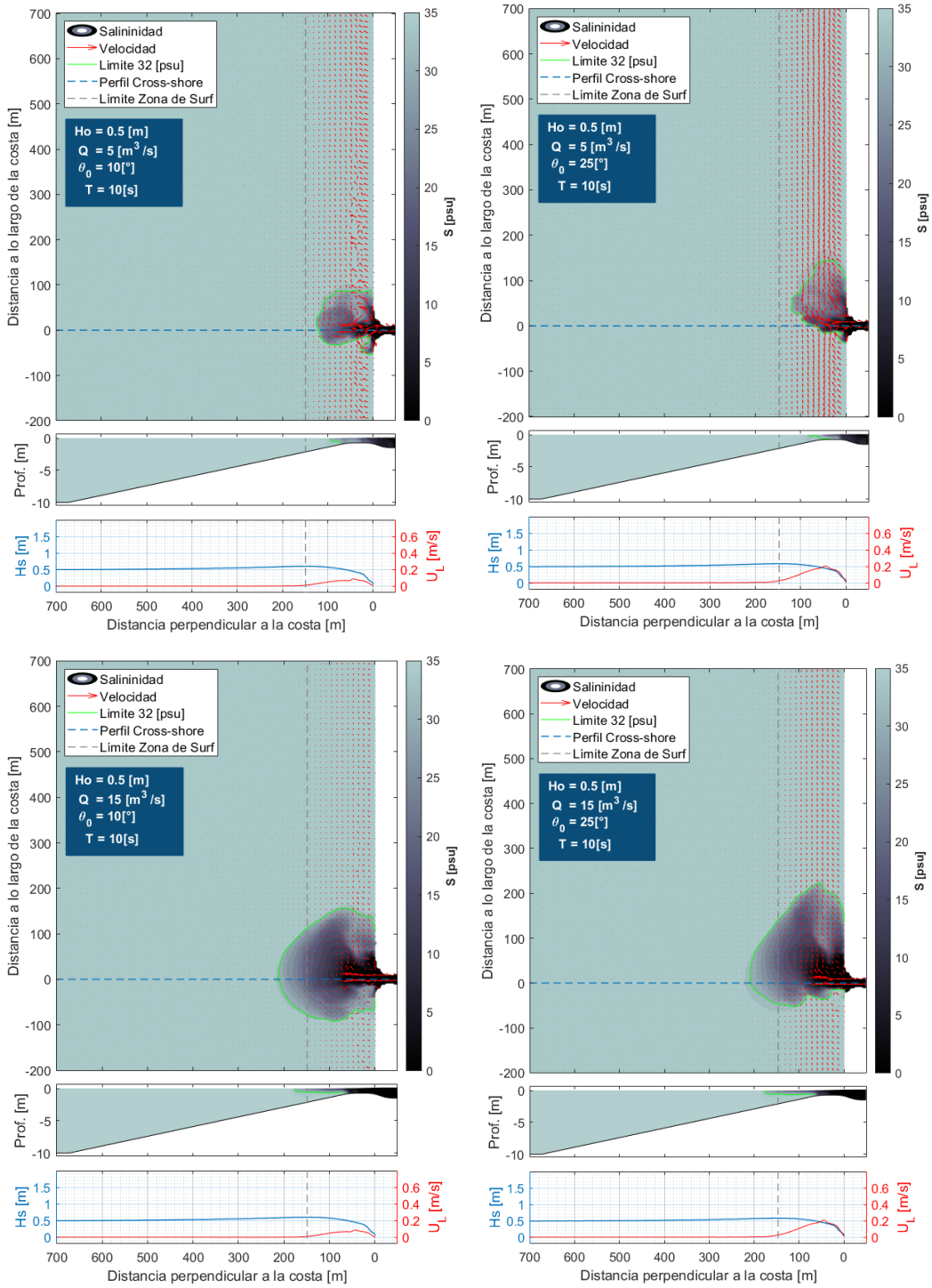
8.1 Archivo tipo modelo numérico SWASH.

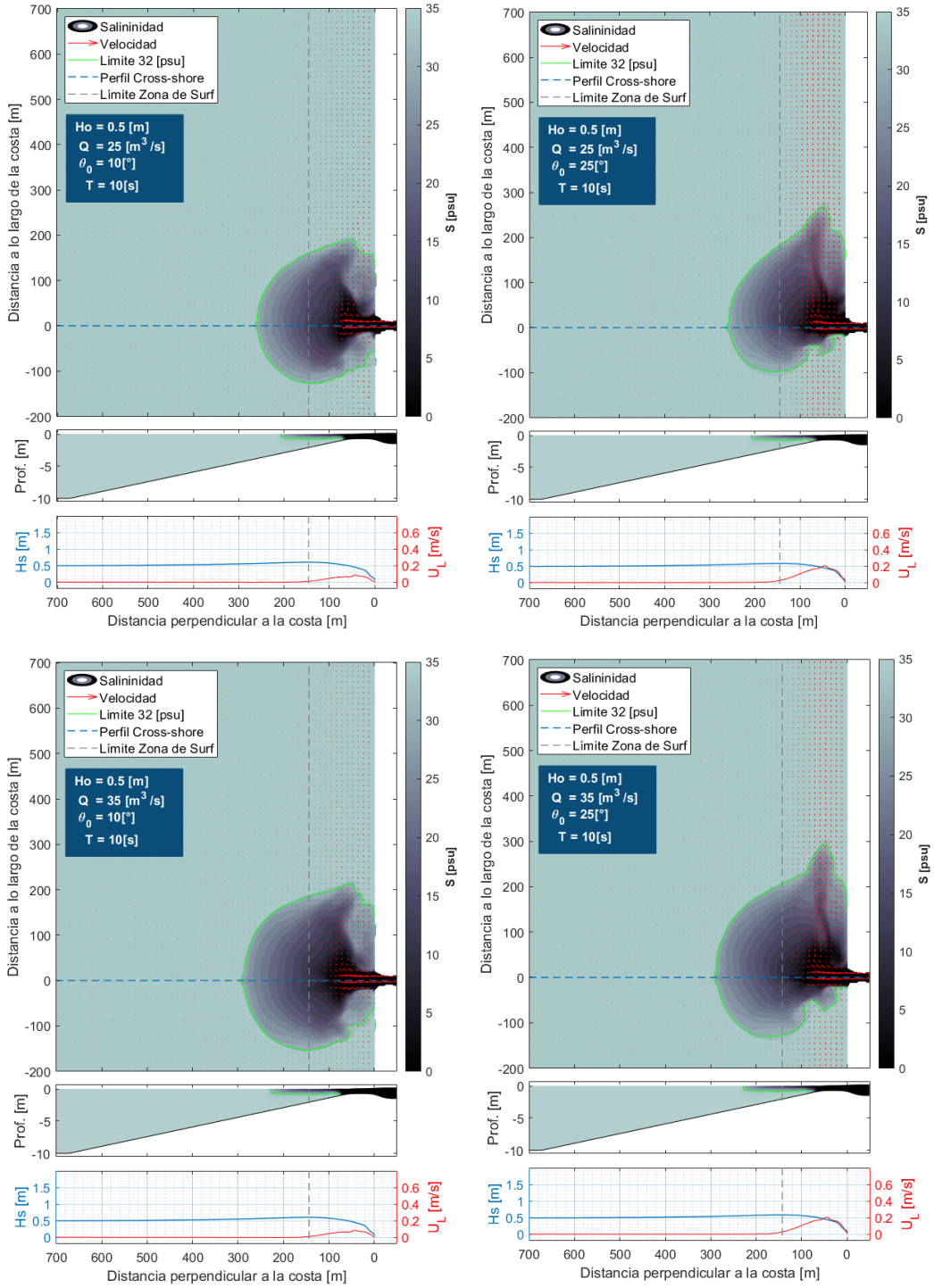
```
$***********MODEL INPUT*******************************
$
MODE NONSTationary TWOD
COORDinates CARTesian
$
CGRID 0. 0. 0. 999 1200 333 400 REP Y
VERT 5
$
INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 333 400 3.0 3.0
READINP BOTTOM 1. 'ABAT3.bot' 1 0 FREE
$
INITial ZERO
$
INPTRANS  SALINITY 0. 0. 0. 333 400 3.0 3.0
READTRANS SALINITY 1. 'ASALI3.sal' 1 0 FREE
$
BOU SIDE W BTYPE WEAK SMOO 10 MIN CON REGULAR 1.0 10 10
BOU SEGM XY 999 303 999 318 BTYPE DISCH SMOO 12 MIN CON FOUR -1.667
$
VISC H CON 0.001
VISC V KEPS 0.07 0.16
SET BACKVISC 0.0001
TRANSP 0.001
FRIC MANNING 0.019
BREAK 0.6 0.3
NONHYDROSTATIC STAndard 1
$
DISCRET UPW MOM
DISCRET UPW WMOM
DISCRET CORRDEP
$
TIMEI METH EXPL 0.2 0.3
$
$************ OUTPUT REQUESTS ************************
$
QUANTITY MVDIR DUR 15 MIN
QUANTITY MVMAG DUR 15 MIN
QUANTITY VEL DUR 10 MIN
QUANTITY VDIR DUR 10 MIN
QUANTITY VMAG DUR 10 MIN
QUANTITY XP YP HEXP 10.
QUANTITY WATLEV
QUANTITY BOTLEV
QUANTITY MVEL MVDIR PROBLEM
QUANTITY HSIG DUR 45 MIN
```

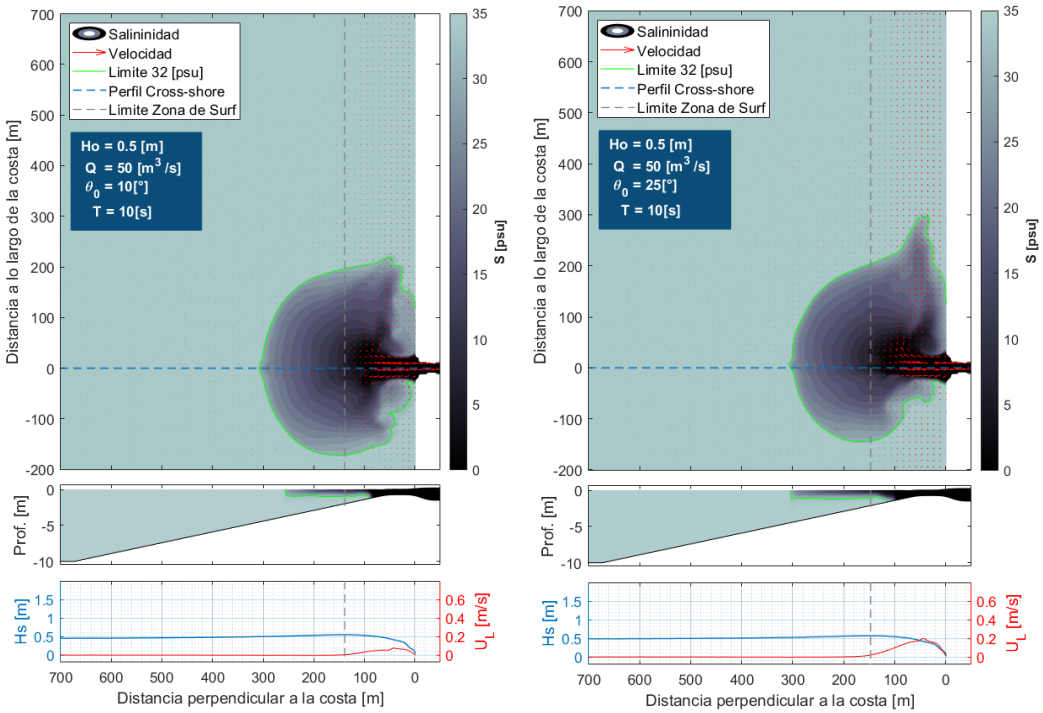
```
QUANTITY SETUP DUR 20 MIN
QUANTITY BRKP
QUANTITY VKSIK
QUANTITY VETAK
QUANTITY SALK
QUANTITY MVKSIK DUR 15 MIN
QUANTITY MVETAK DUR 15 MIN
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 1 334 1 401
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SXP.mat' LAY-OUT 1 XP

BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SYP.mat' LAY-OUT 1 YP
TABLE 'OUTPUT' NOHEADER 'SSUP.tbl' WATL OUTPUT 004200.000 1 SEC
TABLE 'OUTPUT' NOHEADER 'SVEL.tbl' VEL OUTPUT 004200.000 1 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SBOTLEV.mat' LAY-OUT 1 BOTLEV
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SHSIG.mat' LAY-OUT 1 HSIG
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SSETUP.mat' LAY-OUT 1 SETUP
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SMVDIR.mat' LAY-OUT 1 MVDIR
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SMVMAG.mat' LAY-OUT 1 MVMAG
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SVDIR.mat' LAY-OUT 1 VDIR
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SVMAG.mat' LAY-OUT 1 VMAG
BLOCK 'OUTPUT' NOHEADER 'SBRKP.mat' LAY-OUT 1 BRKP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SVZ.mat' VZ  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SSAL.mat' SAL  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SSALK.mat' SALK  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SVETAK.mat' VETAK  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SVKSIK.mat' VKSIK  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SPRESSK.mat' PRESSK  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'STKE.mat' TKE  OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SZK.mat' ZK OUTPUT 000000.000 30 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SZKZK.mat' ZK OUTPUT 004200.000 1 SEC
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SMVETAK.mat' MVETAK
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'SMVKSIK.mat' MVKSIK
$
CURVE 'SALIDA' 0 150 999 999 150
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LXP.mat' XP

TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LYP.mat' YP
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LWATLEV.tbl' WATL
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LBOTLEV.tbl' BOTLEV
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LSUP.tbl' WATL OUTPUT 004200.000 1 SEC
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LVEL.tbl' VEL OUTPUT 004200.000 1 SEC
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LHSIG.tbl' HSIG
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LVEL.tbl' VEL
TABLE 'SALIDA' NOHEADER 'LVDIR.tbl' VDIR
$
TEST 1,0
COMPUTE 000000.000 0.015 SEC 004500.500
STOP
```

8.2 Resultados simulaciones

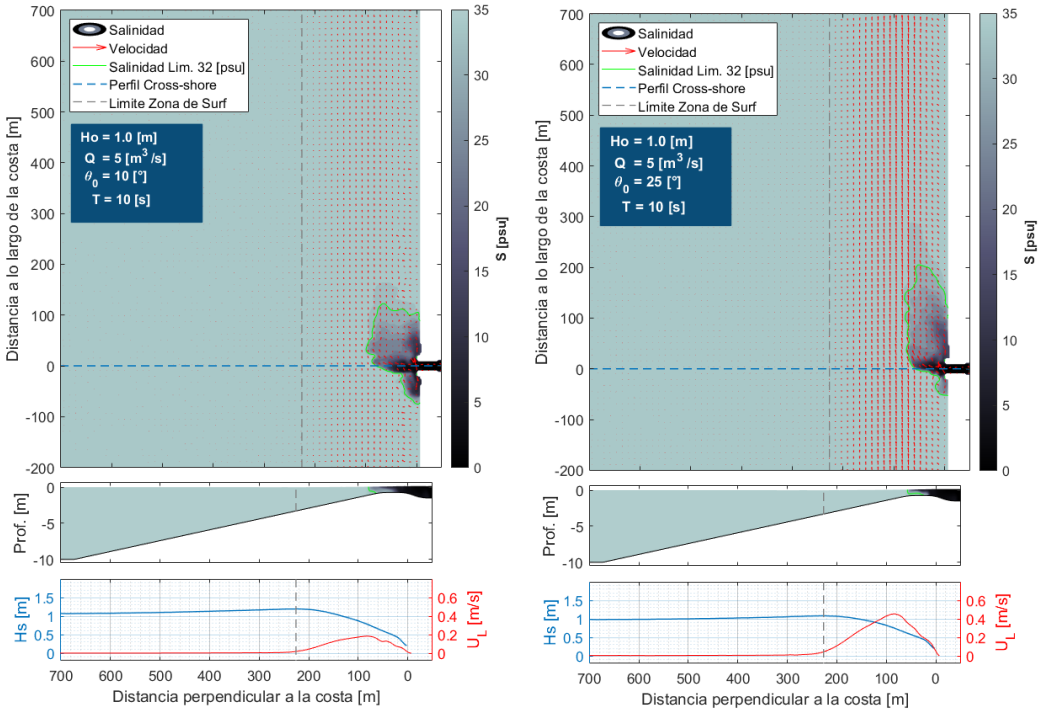
Resultados simulaciones 1-10 (Altura de ola 0.5 [m]), parámetros de entrada en cuadro azul.

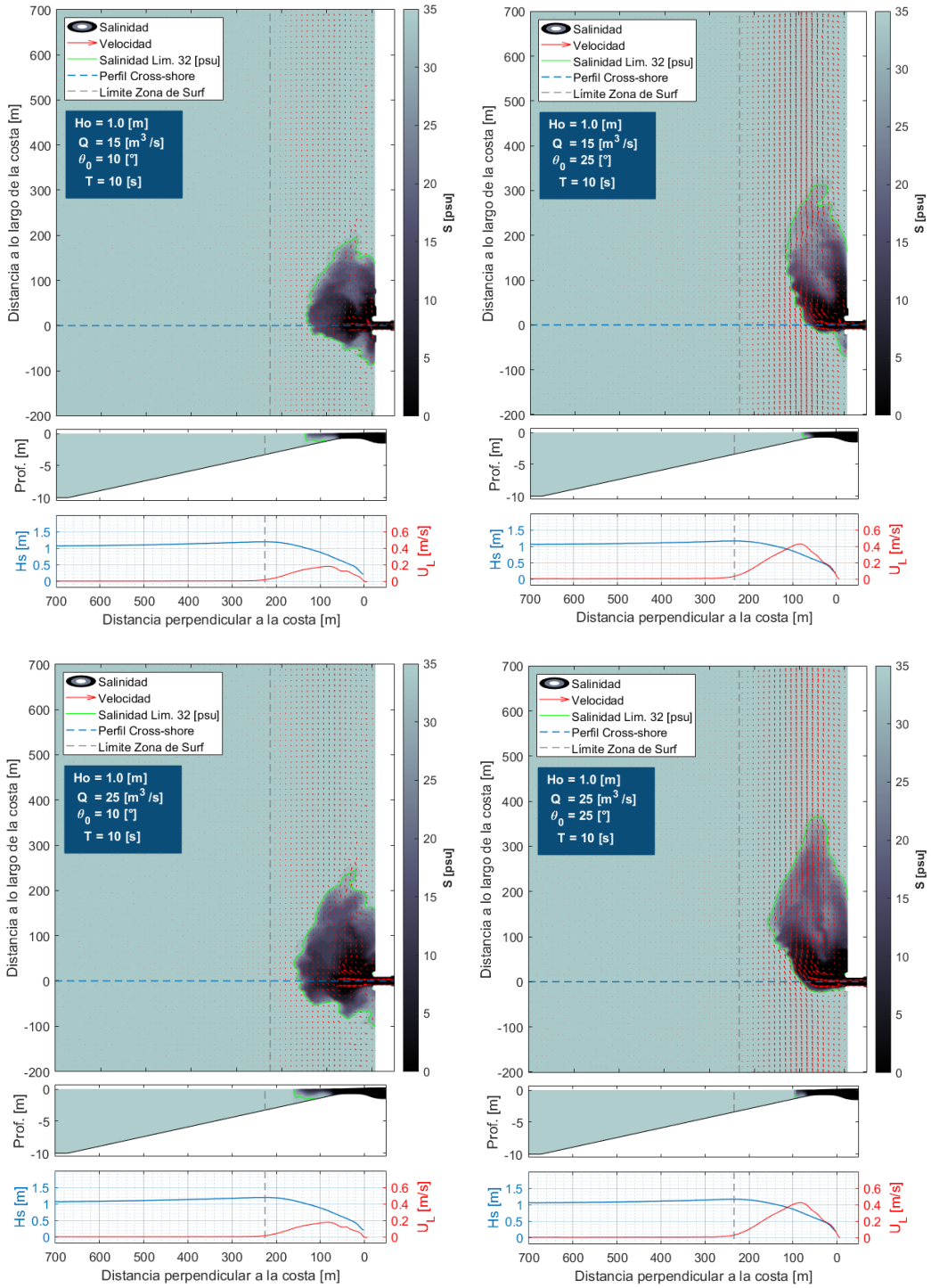


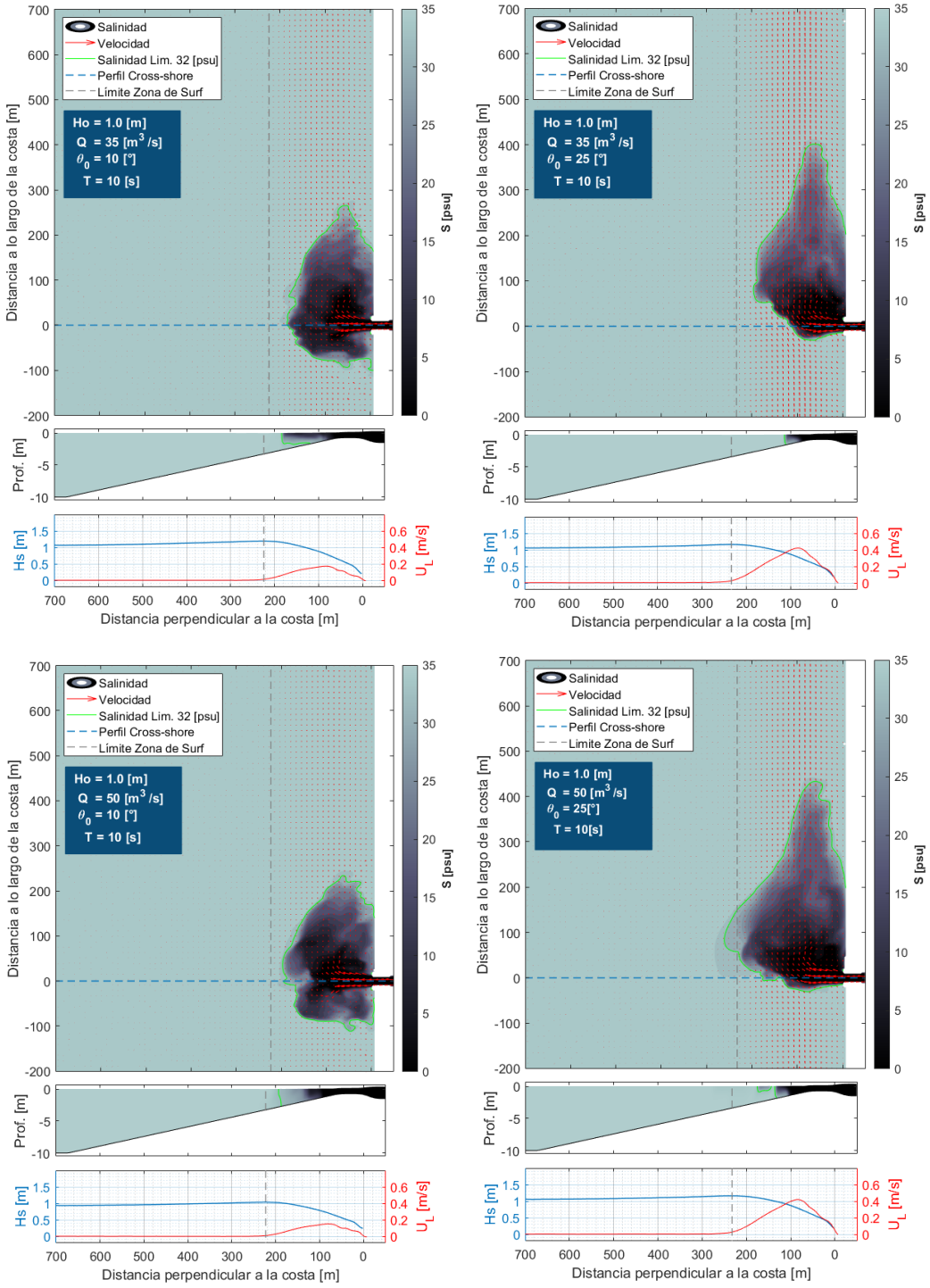

Salininidad
Velocidad
Limite 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Limite Zona de Surf
Ho = 0.5 [m]
Q = 25 [m3/s]
θ0 = 10[°]
T = 10[s]
Ho = 0.5 [m]
Q = 25 [m3/s]
θ0 = 25[°]
T = 10[s]
Ho = 0.5 [m]
Q = 35 [m3/s]
θ0 = 10[°]
T = 10[s]
Ho = 0.5 [m]
Q = 35 [m3/s]
θ0 = 25[°]
T = 10[s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]



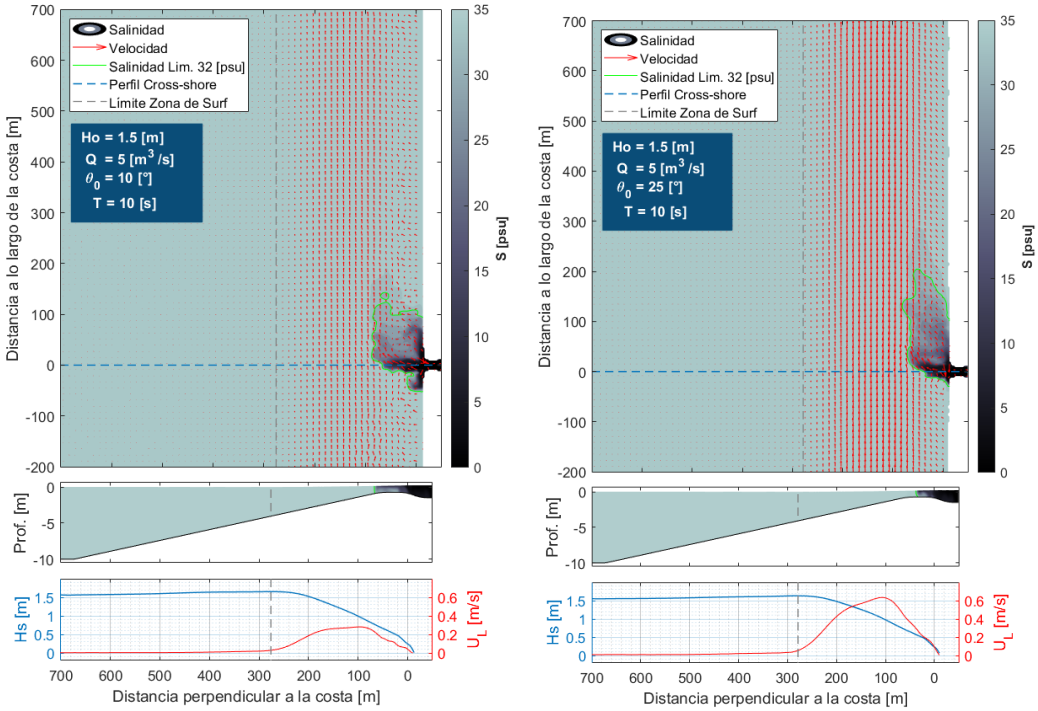
Resultados simulaciones 21-20 (Altura de ola 1.0 [m]), parámetros de entrada en cuadro azul.

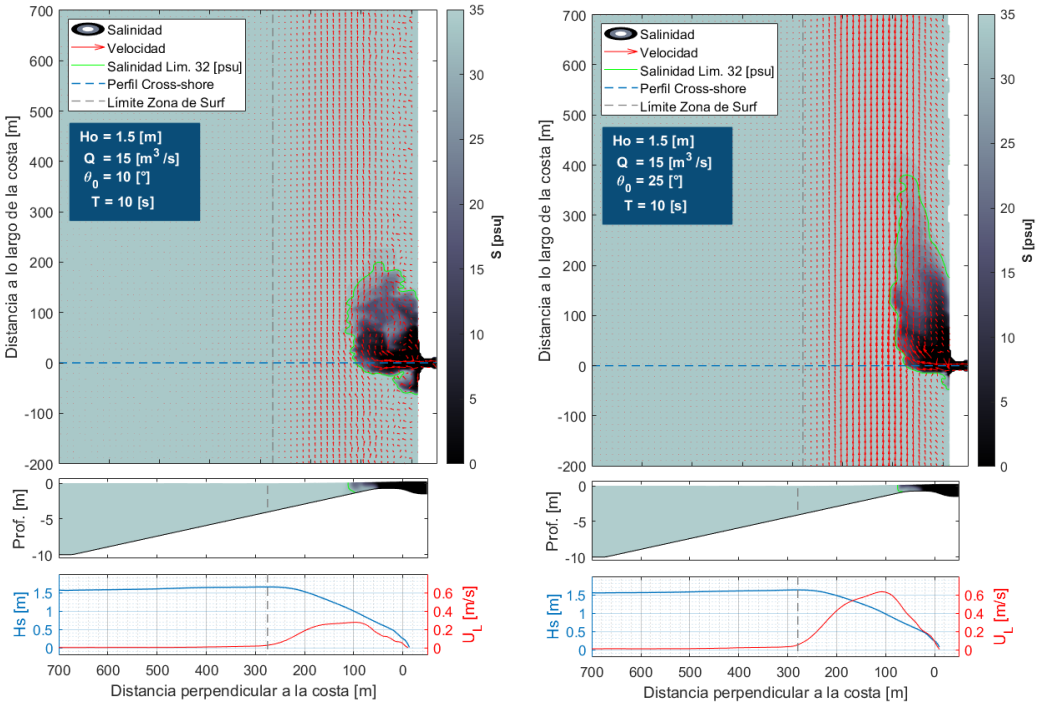


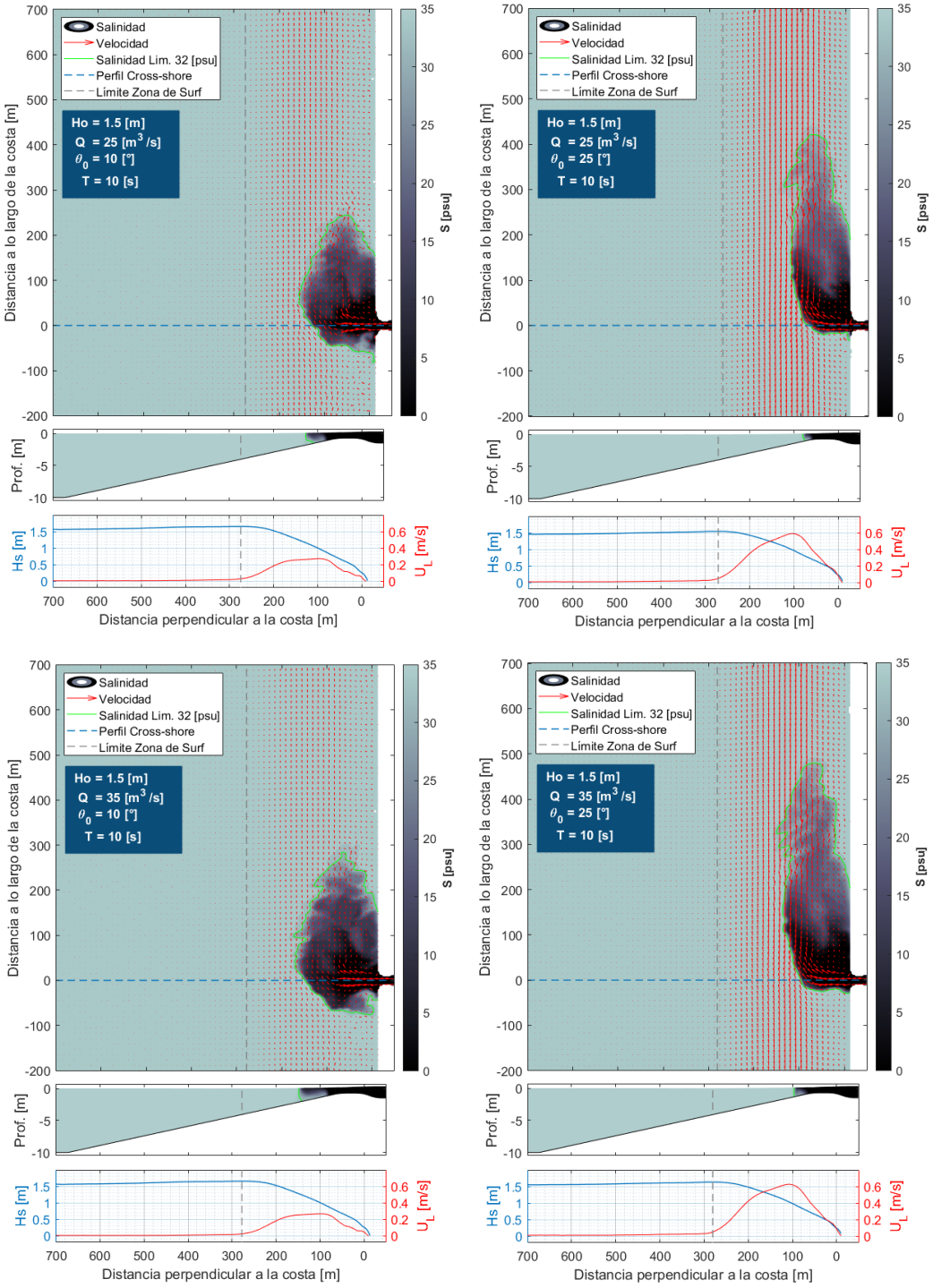

Salinidad
Velocidad
Salinidad Lim. 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Límite Zona de Surf
Ho = 1.0 [m]
Q = 15 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.0 [m]
Q = 15 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.0 [m]
Q = 25 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.0 [m]
Q = 25 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]

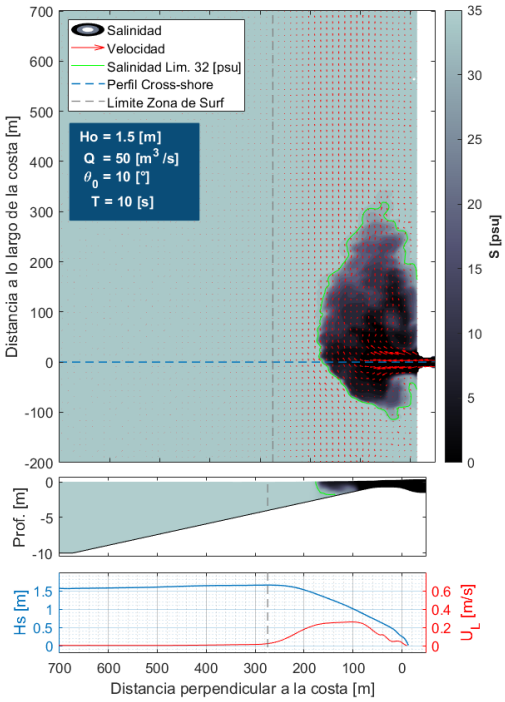

Salinidad
Velocidad
Salinidad Lim. 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Límite Zona de Surf
Ho = 1.0 [m]
Q = 35 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.0 [m]
Q = 35 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.0 [m]
Q = 50 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.0 [m]
Q = 50 [m3/s]
θ0 = 25[°]
T = 10[s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]

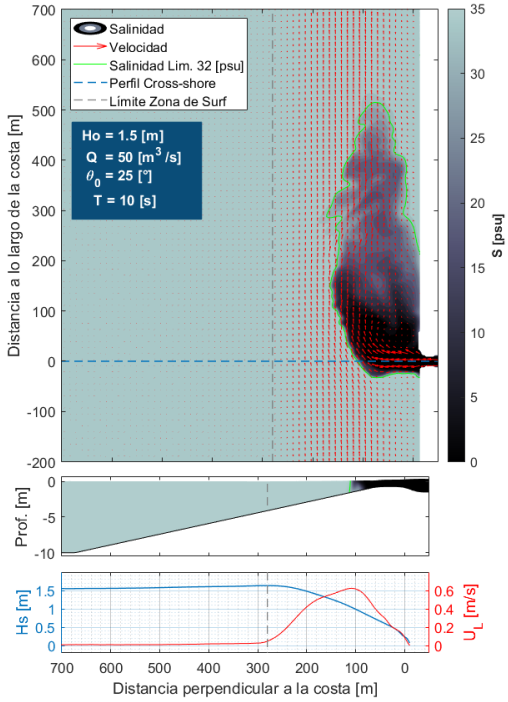
Resultados simulaciones 21-33 (Altura de ola 1.5 [m]), parámetros de entrada en cuadro azul.

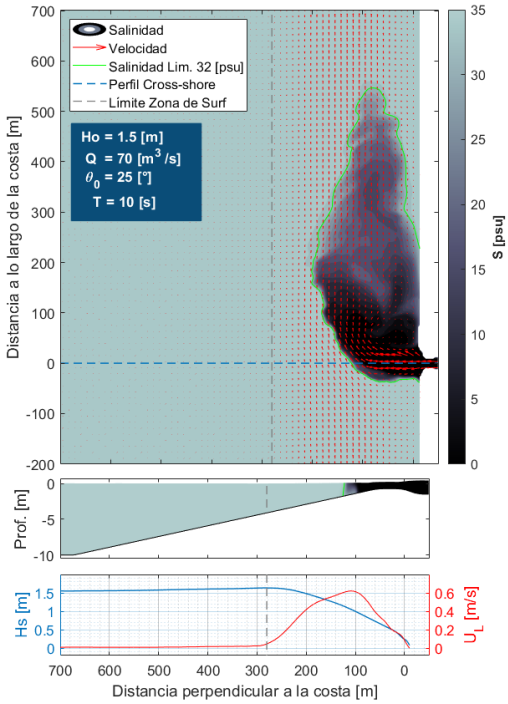


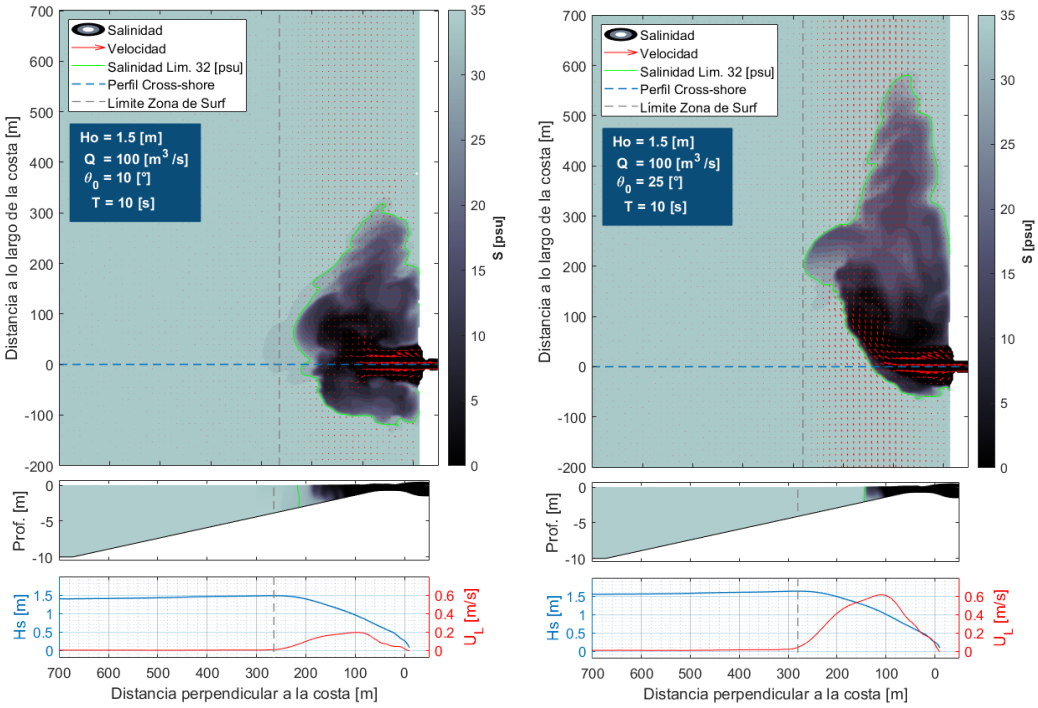



Salinidad
Velocidad
Salinidad Lim. 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Límite Zona de Surf
Ho = 1.5 [m]
Q = 25 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.5 [m]
Q = 25 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.5 [m]
Q = 35 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Ho = 1.5 [m]
Q = 35 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]

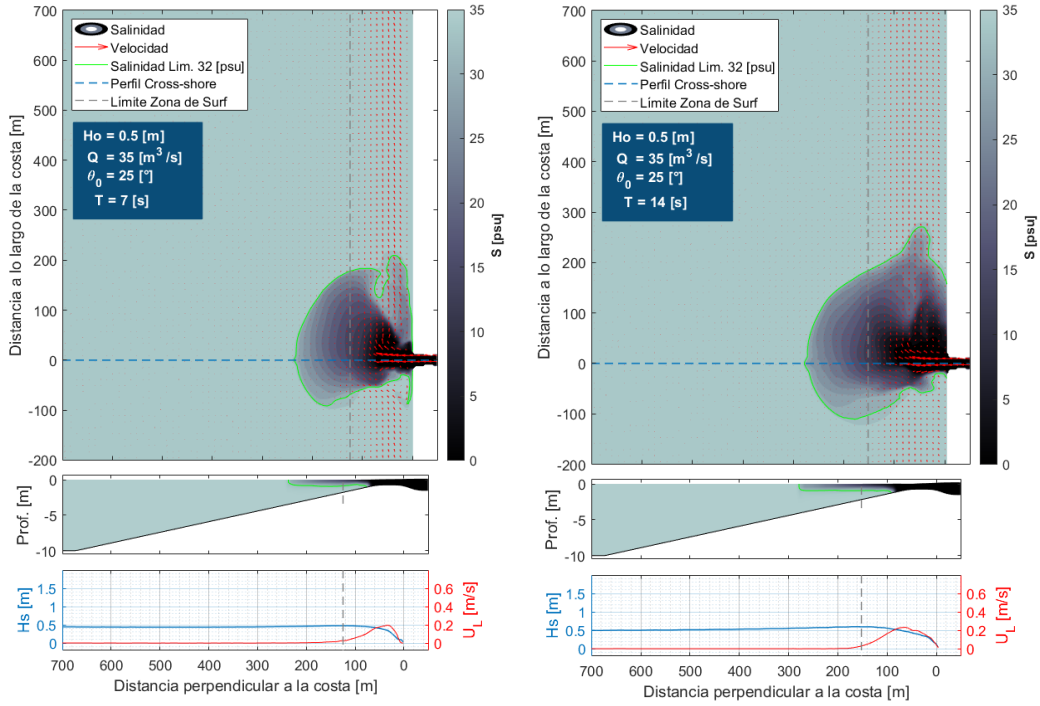

Salinidad
Velocidad
Salinidad Lim. 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Límite Zona de Surf
Ho = 1.5 [m]
Q = 50 [m3/s]
θ0 = 10 [°]
T = 10 [s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]

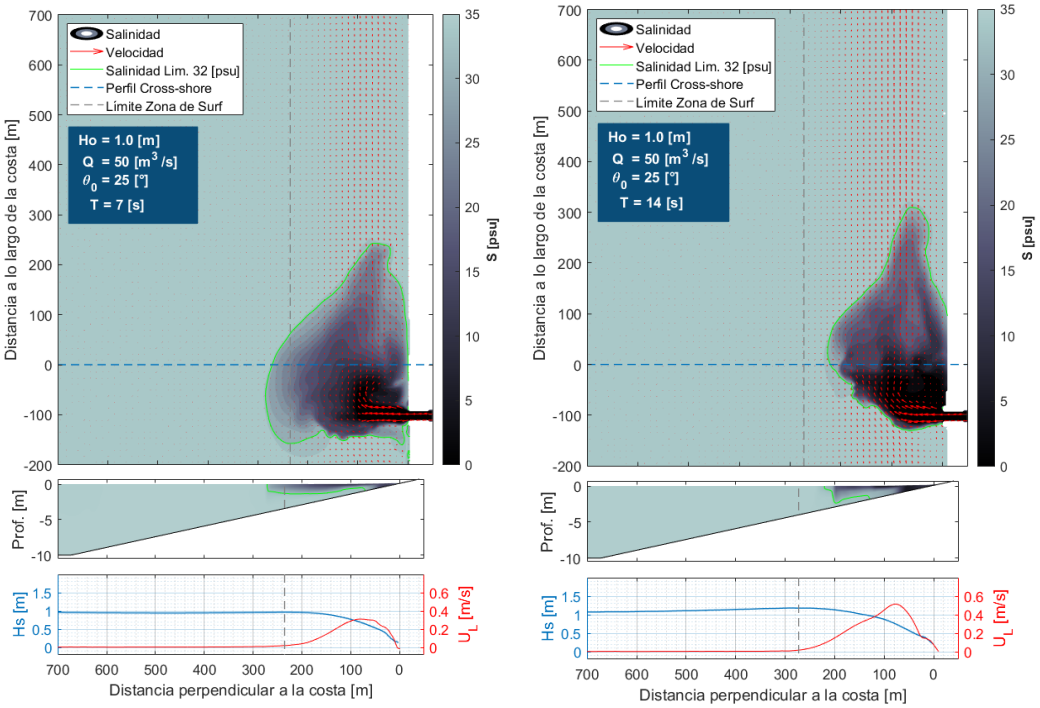
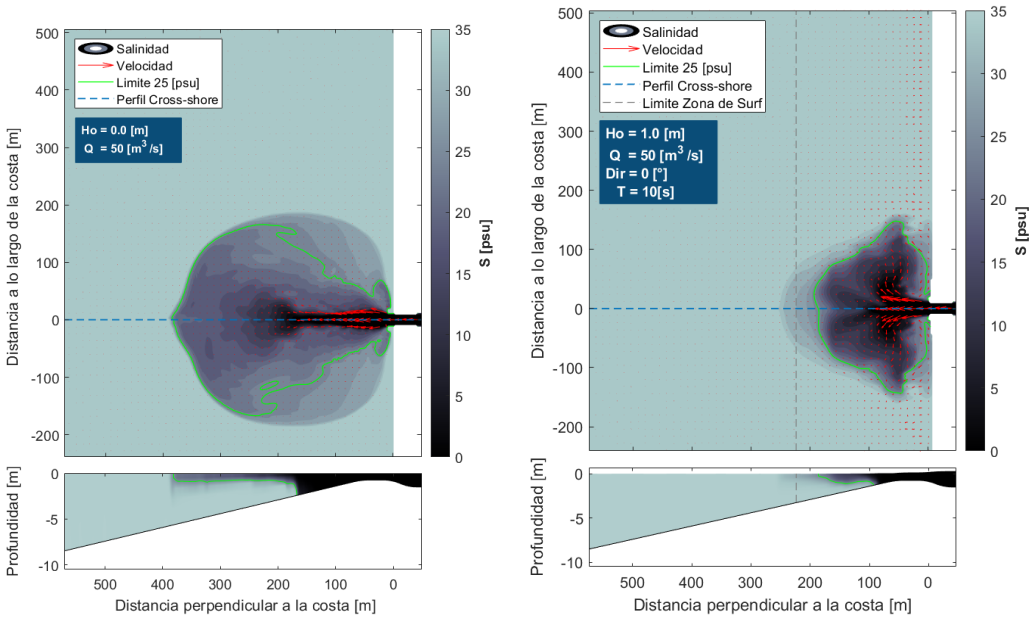

Salinidad
Velocidad
Salinidad Lim. 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Límite Zona de Surf
Ho = 1.5 [m]
Q = 50 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]


Salinidad
Velocidad
Salinidad Lim. 32 [psu]
Perfil Cross-shore
Límite Zona de Surf
Ho = 1.5 [m]
Q = 70 [m3/s]
θ0 = 25 [°]
T = 10 [s]
Distancia a lo largo de la costa [m]
S [psu]
Prof. [m]
Hs [m]
UL [m/s]
Distancia perpendicular a la costa [m]



Resultados simulaciones 34-37 (Periodos de oleaje T = 7 y 14 [s]), parámetros de entrada en cuadro azul.





Resultados simulaciones 38-39 (Casos base, sin oleaje y con oleaje perpendicular), parámetros de entrada en cuadro azul.