



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

# **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE UNA PLUMA DE RÍO EN LA ZONA DE ROMPIENTE DEL OLEAJE**

Memoria de Título presentada por

**Romina Jesús Vera Gahona**

Como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Raúl Pedro Flores Audibert

Mayo 2023



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE UNA PLUMA DE  
RÍO EN LA ZONA DE ROMPIENTE DEL OLEAJE**

AUTOR:

**ROMINA JESÚS VERA GAHONA**

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

Nombre Profesor Guía: Raúl Flores Audibert

Nombre Miembro 1 Comisión: Karina Soto Rivas

Valparaíso, Chile, Mayo de 2023

# **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISPERSIÓN DE UNA PLUMA DE RÍO EN LA ZONA DE ROMPIENTE DEL OLEAJE**

Romina Vera Gahona<sup>1</sup>, Raúl Flores Audibert<sup>1</sup>, Karina Soto Rivas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Federico Santa María

## **Resumen**

Las descargas de río a pequeña escala en el mar representan una fuente importante de agua dulce, sedimentos, nutrientes y contaminantes para el océano costero. Este fenómeno presenta un impacto final en la calidad del agua, la vida marina y la salud pública, ya que la química y biología de las aguas costeras se ven fuertemente alteradas por el transporte fluvial de nutrientes y contaminantes de origen terrestre resultantes de la modificación de los paisajes naturales, como la agricultura y la infraestructura construida. Las características geográficas de las cuencas hacen que en su gran mayoría los ríos chilenos formen descargas costeras de pequeña escala y con caudales bajos, principalmente en la zona central, bajo estas condiciones, el forzante del oleaje se transforma en un agente dinámico muy importante, y la interacción oleaje-río determina el destino final de materiales en la costa, tales como, sedimentos, contaminantes y fertilizantes.

Existen estudios recientes donde parte de su metodología contienen mediciones en terreno, por ejemplo, mediciones en la desembocadura del río Maipo en donde documentan por primera vez la respuesta de la pluma al forzamiento de las olas de infragravedad, y un estudio donde utilizan observaciones del río Quinault para investigar la interacción entre el río y el forzamiento de las olas mediante la sinterización de datos de amarres, derivadores y video del Sistema Aéreo No Tripulado. Posteriormente, la modelación numérica surge como alternativa para realizar simulaciones del fenómeno y ampliar su investigación, un estudio reciente usó el software SWASH para modelar numéricamente un sistema idealizado bajo condiciones de oleaje regular que contribuye al entendimiento de la dinámica de ríos angostos que descargan en la zona de rompiente, y que permite estimar el arrastre de contaminantes de las descargas costeras en la zona de surf para condiciones hidrodinámicas típicas de las costas chilenas.

Este trabajo busca contribuir al entendimiento de la dinámica en zonas de desembocadura de ríos pequeños que descargan en la zona de rompiente, a través del análisis de la dispersión y estructura de la pluma de un río pequeño para distintas condiciones de caudal de salida y oleaje (altura, periodo y dirección) utilizando un enfoque de modelación numérica en SWASH a partir de la ejecución de simulaciones con batimetría idealizada y oleaje irregular como condición de borde. Se establecerán los parámetros de mayor influencia en la dispersión y mezcla de la pluma a través de un análisis enfocado en la cuantificación de la dispersión de la pluma de río en el mar y la estructura de ésta en la zona de rompiente, y en la evaluación de perfiles de salinidad y mezcla de la pluma en la zona de rompiente del oleaje.

Los resultados del modelo SWASH muestran una adecuada predicción del comportamiento de la hidrodinámica en la zona de rompiente del oleaje. En la dispersión de la pluma se plasman las simulaciones en gráficos con datos de salinidad a través del tiempo y para un tiempo final establecido se realiza la comparación de datos de salinidad entre las simulaciones numéricas. En la mezcla de la pluma se muestran distintos cortes transversales del eje X-Z para realizar la comparación entre las simulaciones y ejecutar los análisis de la variación espacial en un tiempo final indicado. Además, se entregan valores de las distancias máximas perpendiculares a la costa, puntos de despegue o lift-off, y tipos de escurrimiento en el inicio de la descarga de la pluma para cada simulación numérica de variación del oleaje (altura, periodo y dirección) y caudal de salida.

## Glosario Terminológico

SWASH	Modelo numérico proveniente del acrónimo en inglés Simulating WAVes till SHore.
<i>La</i>	Escala de longitud del flujo cruzado (Cross Flow Length Scale).
LNf	Escala de longitud del campo cercano (Near-field Plume Length Scale).
<i>Lsz</i>	Ancho de la zona de surf, distancia entre el borde costero y la línea de rotura de olas.
Cross-shore	Perpendicular a la línea de costa.
Along-shore	Paralelo a la línea de costa.
H	Altura significativa del oleaje, en unidad de metros.
T	Periodo del oleaje, en unidad de segundos.
D	Dirección del oleaje, en unidad grados.
Q	Caudal de salida del río en la desembocadura al mar, en unidad metros cúbicos por segundo.
Fetch	Tiempo y distancia recorrida por el viento en un tramo de agua sin obstáculos.

## Índice de Contenido

1. Introducción .....	10
2. Objetivos .....	12
2.1. Objetivo General .....	12
2.2. Objetivos Específicos .....	12
3. Marco Conceptual .....	13
3.1. Oleaje .....	13
3.1.1. Comportamiento del Oleaje.....	13
3.1.2. Oleaje Irregular y Espectro de Olas.....	13
3.2. Descarga Costera.....	14
3.2.1. Comportamiento de la Pluma .....	14
3.2.2. Número de Froude y Despegue de la Pluma.....	14
4. Metodología .....	16
4.1. Modelo SWASH .....	16
4.1.1. Configuración del Modelo.....	16
4.1.2. Base de Datos.....	18
4.1.3. Espectro del Oleaje de Jonswap .....	18
4.1.4. Parámetros Físicos .....	19
4.1.5. Salida de Datos.....	20
4.2. Simulaciones Numéricas en Modelo SWASH.....	20
5. Resultados .....	23
5.1. Dispersión y Mezcla de Caso sin Oleaje.....	23
5.2. Dispersión de la Pluma con Oleaje .....	24
5.2.1. Variación de Altura del Oleaje .....	24
5.2.2. Variación de Periodo del Oleaje .....	26
5.2.3. Variación de Dirección del Oleaje.....	28
5.2.4. Variación de Caudal de Salida del Río .....	30
5.3. Mezcla de la Pluma con Oleaje .....	33
5.3.1. Variación de Altura del Oleaje .....	34
5.3.2. Variación de Periodo del Oleaje .....	38
5.3.3. Variación de Dirección del Oleaje.....	41
5.3.4. Variación de Caudal de Salida del Río .....	45
6. Análisis de Resultados.....	50
6.1. Tiempo de Simulación.....	50
6.2. Caso sin Oleaje.....	50
6.3. Dispersión y Mezcla de la Pluma en Casos con Oleaje .....	51
6.3.1. Altura del Oleaje .....	51

6.3.2. Periodo del Oleaje .....	52
6.3.3. Dirección del Oleaje.....	52
6.3.4. Caudal de Salida.....	53
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	54
8. Referencias.....	55
9. Anexos .....	56
9.1. Ejemplo de Base de Datos .....	56
9.2. Resultados Adicionales de Dispersión de la Pluma .....	59
9.2.1. Variación de Altura del Oleaje .....	59
9.2.2. Variación de Periodo del Oleaje .....	61
9.2.3. Variación de Dirección del Oleaje.....	63
9.2.4. Variación de Caudal de Salida del Río.....	65
9.3. Resultados Adicionales de Mezcla de Pluma.....	68
9.3.1. Variación de Altura del Oleaje .....	68
9.3.2. Variación de Periodo del Oleaje .....	74
9.3.3. Variación de Dirección del Oleaje.....	79
9.3.4. Variación de Caudal de Salida del Río .....	84

## Índice de Figuras

Figura 1: Configuración de modelo numérico, que incluye condiciones de borde, descarga y discretización horizontal y vertical.....	17
Figura 2: Distribución en elevación de modelo numérico, el cual incluye la representación de la batimetría idealizada y la representación de las 5 capas verticales equidistantes.....	18
Figura 3: Comparación de espectros Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Donelan: a) condiciones de fetch limitado y b) oleaje totalmente desarrollado.....	19
Figura 4: Pronóstico del oleaje del puerto San Antonio de octubre de 2022.....	20
Figura 5: Datos de caudal en estación fluviométrica Río Maipo Cabimbao – 5748001. ....	21
Figura 6: Dispersión de la pluma sin oleaje y con caudal de salida de 30 [m <sup>3</sup> /s]. ....	23
Figura 7: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para el caso sin oleaje y con caudal de salida de 30 [m <sup>3</sup> /s]. ....	24
Figura 8: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 1.5 [m] entre 20 y 60 [min]. ..	25
Figura 9: Esquema de comparación de gráficos con variación de altura del oleaje en el tiempo de simulación de 46 minutos. ....	26
Figura 10: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 12 [s] entre 20 y 51 [min].	27
Figura 11: Esquema de comparación de gráficos con variación de periodo del oleaje en el tiempo de simulación de 51 minutos. ....	28
Figura 12: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de 12 [°] entre 20 y 60 [min]. ....	29
Figura 13: Esquema de comparación de gráficos con variación de dirección del oleaje en el tiempo de simulación de 42 minutos. ....	30
Figura 14: Resultados de la dispersión de la pluma con caudal 15 [m <sup>3</sup> /s] entre 20 y 60 [min]. ....	31
Figura 15: Esquema de comparación de gráficos con variación de caudal en el tiempo de simulación de 34 minutos.....	32
Figura 16: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de altura del oleaje, incluye la primera y última simulación. ....	33

Figura 17: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de periodo del oleaje, incluye la primera y última simulación. ....	33
Figura 18: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de dirección del oleaje, incluye la primera y última simulación. ....	34
Figura 19: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de caudal de salida del río, incluye la primera y última simulación. ....	34
Figura 20: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de altura de oleaje entre el tiempo de simulación de 40 a 46 minutos. ....	36
Figura 21: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje medio de 1.5 [m]. ....	38
Figura 22: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de periodo de oleaje entre el tiempo de simulación de 45 a 51 minutos. ....	39
Figura 23: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 12 [s]. ....	41
Figura 24: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de dirección de oleaje entre el tiempo de simulación de 36 a 42 minutos. ....	43
Figura 25: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de 12 [°]. ....	45
Figura 26: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de caudal de salida del río al mar entre el tiempo de simulación de 32 a 34 minutos. ....	46
Figura 27: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un caudal de salida del río al mar de 15 [m <sup>3</sup> /s]. ....	49
Figura 28: Ejemplo de archivo .txt con base de datos de batimetría. ....	56
Figura 29: Ejemplo de archivo .txt con base de datos de salinidad. ....	56
Figura 30: Parte 1 de Código con ejemplo H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°] y Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]. ....	57
Figura 31: Parte 2 de Código con ejemplo H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°] y Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]. ....	58
Figura 32: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 1 [m] entre 20 y 60 [min]. ...	59
Figura 33: Resultados de la dispersión de la pluma con altura el oleaje de 2 [m] entre 20 y 60 [min]. ..	59
Figura 34: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 2.5 [m] entre 20 y 46 [min].	60
Figura 35: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 2.8 [m] entre 20 y 60 [min].	60
Figura 36: Esquema de comparación de gráficos con variación de altura del oleaje en el tiempo inicial de simulación de 20 minutos. ....	61
Figura 37: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 5 [s] entre 20 y 60 [min]. ..	61
Figura 38: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 16 [s] entre 20 y 60 [min].	62
Figura 39: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 20 [s] entre 20 y 60 [min].	62
Figura 40: Esquema de comparación de gráficos con variación de periodo del oleaje en el tiempo inicial de simulación de 20 minutos. ....	63
Figura 41: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de 8 [°] entre 20 y 42 [min].	63
Figura 42: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de 20 [°] entre 20 y 49 [min]. .....	64
Figura 43: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de 26 [°] entre 20 y 54 [min]. .....	64
Figura 44: Esquema de comparación de gráficos con variación de dirección del oleaje en el tiempo inicial de simulación de 20 minutos. ....	65
Figura 45: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de 5 [m <sup>3</sup> /s] entre 20 y 60 [min]. ....	65
Figura 46: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de 45 [m <sup>3</sup> /s] entre 20 y 50 [min]. ....	66
Figura 47: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de 65 [m <sup>3</sup> /s] entre 20 y 37 [min]. ....	66
Figura 48: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de 80 [m <sup>3</sup> /s] entre 20 y 34 [min]. ....	67
Figura 49: Esquema de comparación de gráficos con variación de caudal en el tiempo de simulación de 20 minutos. ....	67
Figura 50: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de altura del oleaje ubicado en 78 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 40 a 46 minutos. ....	69
Figura 51: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 1 [m]. ....	70

Figura 52: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 2 [m].	71
Figura 53: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 2.5 [m].	72
Figura 54: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 2.8 [m].	73
Figura 55: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de periodo del oleaje ubicado en 78 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 45 a 51 minutos.	75
Figura 56: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 5 [s].	76
Figura 57: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 16 [s].	77
Figura 58: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 20 [s].	78
Figura 59: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de dirección del oleaje ubicado en 78 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 36 a 42 minutos.	80
Figura 60: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de 8 [°].	81
Figura 61: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de 20 [°].	82
Figura 62: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de 26 [°].	83
Figura 63: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de caudal de salida del río ubicado en 15 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 32 a 34 minutos.	85
Figura 64: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 5 [m <sup>3</sup> /s].	86
Figura 65: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 45 [m <sup>3</sup> /s].	86
Figura 66: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 65 [m <sup>3</sup> /s].	87
Figura 67: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 80 [m <sup>3</sup> /s].	88

## Índice de Tablas

Tabla 1: Tabla resumen de simulaciones con variación de altura, periodo y dirección del oleaje, y caudal de salida del río en la desembocadura al mar.	21
Tabla 2: Tiempo máximo de simulación para variación de altura del oleaje.	25
Tabla 3: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 9 en el tiempo de simulación de 46 minutos.	26
Tabla 4: Tiempo máximo de simulación para variación de periodo del oleaje.	27
Tabla 5: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 11 en el tiempo de simulación de 51 minutos.	28
Tabla 6: Tiempo máximo de simulación para variación de dirección del oleaje.	29
Tabla 7: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 13 en el tiempo de simulación de 42 minutos.	30
Tabla 8: Tiempo máximo de simulación para variación de caudal.	31
Tabla 9: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 15 en el tiempo de simulación de 34 minutos.	32
Tabla 10: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación de altura del oleaje, según el sistema coordenado de la Figura 20.	36
Tabla 11: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación de altura del oleaje.	36

Tabla 12: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación del periodo del oleaje, según el sistema coordenado de la Figura 22.....	39
Tabla 13: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación del periodo del oleaje. ....	40
Tabla 14: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación de dirección del oleaje, según el sistema coordenado de la Figura 24. ....	43
Tabla 15: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación de dirección del oleaje. ....	43
Tabla 16: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación de caudal de salida del río, según el sistema coordenado de la Figura 26.....	46
Tabla 17: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación de caudal de salida del río.....	47

## 1. Introducción

Las descargas de agua dulce a pequeña escala en el mar son características comunes de las costas de todo el mundo, particularmente en las latitudes medias con climas mediterráneos (Flores et al., 2022). A nivel mundial, estos sistemas representan una fuente importante de agua dulce, sedimentos, nutrientes y contaminantes para el océano costero, con una contribución neta comparable a la de los grandes sistemas fluviales (Kastner et al., 2019). Este fenómeno tiene un impacto final en la calidad del agua, la vida marina y la salud pública, ya que la química y biología de las aguas costeras se ven fuertemente alteradas por el transporte fluvial de nutrientes y contaminantes de origen terrestre resultantes de la modificación de los paisajes naturales, como la agricultura y la infraestructura construida (Rodríguez et al., 2018). En base a esto, es importante comprender el destino del agua de río en el océano costero debido a la gran cantidad de personas que utilizan sectores costeros sin tener conocimiento de los peligros sanitarios que el agua pueda contener (Wong et al., 2013). Además, los estuarios son uno de los sistemas más productivos en el mundo, donde la presencia de especies es útil para la toma de decisiones sobre su conservación (Osorio et al., 2019).

Chile posee una costa de gran longitud en la cual descargan múltiples ríos, estos viajan generalmente desde la cordillera de Los Andes hacia la costa. Las características geográficas de las cuencas hacen que en su gran mayoría los ríos chilenos formen descargas costeras de pequeña escala y con caudales bajos, principalmente en la zona central (Fredes, 2022). Bajo estas condiciones, el forzante del oleaje se transforma en un agente dinámico muy importante, y la interacción oleaje-río determina el destino final de materiales en la costa, tales como, sedimentos, contaminantes y fertilizantes (Olabarrieta et al., 2005).

El estudio de la interacción de plumas de ríos pequeños y el oleaje costero ha sido poco abarcado debido a la complejidad de realizar mediciones en terreno en la zona de rompiente del oleaje y en presencia de fuertes corrientes. De todas maneras, existen estudios recientes donde parte de su metodología contienen mediciones en terreno, por ejemplo, Flores et al. (2022) presentó mediciones en la desembocadura del río Maipo, un pequeño río que desemboca en una zona de surf energética en la costa de Chile, en donde documentan por primera vez la respuesta de la pluma al forzamiento de las olas de infragravedad. Además, Kastner et al. (2019) utilizó observaciones del río Quinault, un pequeño río que desemboca en una zona de surf energética en la costa Oeste del estado de Washington, para investigar la interacción entre el río y el forzamiento de las olas mediante la sinterización de datos de amarres, derivadores y video del Sistema Aéreo No Tripulado, con ello desarrollaron un modelo conceptual basado en tres escalas de longitud: la escala de longitud de la pluma en el campo cercano (*LNF*) el 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, la escala de longitud de flujo cruzado (*La*) que representa la longitud característica para que la descarga se curve debido a corrientes longitudinales por oleaje dentro de la zona de surf, y finalmente el ancho de la zona de rompiente del oleaje (*Lsz*). Las relaciones entre estas escalas de longitud muestran cómo la variabilidad de las mareas y los efectos batimétricos cambian el equilibrio del ímpetu de las olas y el río.

La modelación numérica surge como alternativa para realizar simulaciones del fenómeno y ampliar su estudio. Fredes (2022) usó el software SWASH para modelar numéricamente un sistema idealizado (supone como condiciones de borde batimetría idealizada de pendiente constante y oleaje regular) que contribuye al entendimiento de la dinámica de ríos angostos que descargan en la zona de rompiente, y que permite estimar el arrastre de contaminantes de las descargas costeras en la zona de surf para condiciones hidrodinámicas típicas de las costas chilenas. Implementó un modelo conceptual de clasificación basado en tres escalas de longitud: la escala de longitud de la pluma en el campo cercano (*LNF*), la escala de longitud de flujo cruzado (*La*), y el ancho de la zona de rompiente del oleaje (*Lsz*). La magnitud relativa de *La* y *LNF* con respecto al ancho de la zona de surf (*Lsz*) proporciona un marco para predecir el destino de las aguas del río en el sistema costero. En este trabajo se emplearon simulaciones numéricas detalladas para probar la capacidad y aplicabilidad de estas escalas de longitud para predecir el destino de las aguas del río. Los resultados muestran la capacidad presentada por el modelo numérico para reproducir la interacción río-oleaje, bajo distintos escenarios de parámetros que definen la descarga y el campo de oleaje. Para cada simulación se calculó la magnitud relativa entre las escalas de longitud *LNF* y *La* con respecto al ancho de la zona de surf *Lsz*, los que son utilizados para

predecir si la descarga escapa o queda atrapada en la zona de surf. Las predicciones fueron comparadas según 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.

En base a lo anterior, Fredes (2022) supone un primer paso para extender el análisis y ampliar los valores en los parámetros utilizados y/o incluir nuevas variables en el análisis, tales como, pendiente del fondo marino, ancho o profundidad de la descarga, etc. Además, el poder quitar simplificaciones utilizadas, agregando oleaje mediante un espectro, incluyendo los efectos de la marea o utilizando batimetría realista.

Este trabajo busca contribuir al entendimiento de la dinámica en zonas de desembocadura de ríos pequeños que descargan directamente en la zona de rompiente del oleaje, utilizando un enfoque de modelación numérica a través del modelo SWASH. En particular, se realizarán simulaciones con batimetría idealizada y oleaje irregular como condición de borde, donde se variarán parámetros de caudal y oleaje (altura, periodo y dirección). Se establecerán los parámetros de mayor influencia en la dispersión y mezcla de la pluma a través de un análisis enfocado en la cuantificación de la dispersión de la pluma de río en el mar y la estructura de ésta en la zona de rompiente, y en la evaluación de perfiles de salinidad y mezcla de la pluma en la zona de rompiente del oleaje.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

El objetivo general es analizar la dispersión y estructura de la pluma de un río pequeño en la zona de rompiente del oleaje para distintas condiciones de caudal y oleaje (altura, periodo y dirección) mediante simulaciones numéricas en modelo SWASH.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos son:

1. Desarrollar simulaciones numéricas en modelo SWASH incorporando espectro de oleaje.
2. Cuantificar la dispersión de la pluma en la zona de rompiente.
3. Evaluar perfiles de salinidad y mezcla de la pluma en la zona de rompiente.
4. Establecer los parámetros de mayor influencia en la dispersión y mezcla de la pluma.

## 3. Marco Conceptual

### 3.1. Oleaje

#### 3.1.1. Comportamiento del Oleaje

Clasificando la energía contenida en los movimientos que experimenta la superficie del mar en función de sus periodos característicos, existe un máximo de energía entre los períodos de 2 a 20 segundos. Los movimientos correspondientes a estos periodos son ondas de gravedad, generadas por el viento y que se propagan desde el área de generación perdiendo lentamente energía por fricción con la atmósfera y por viscosidad molecular, hasta que alcanzan las costas, donde se disipan finalmente en los procesos de rotura. Estos movimientos reciben genéricamente el nombre de oleaje. Una manera simple de modelar el comportamiento del oleaje es su descomposición en una suma de trenes de ondas regulares de amplitudes, períodos y direcciones variables (G.I.O.C. et al., 2000).

- **Altura de ola:** Se define como la distancia vertical desde la cresta (máximo) hasta el del valle (mínimo) de la ola (UV, 2022).
- **Altura de ola significativa (H):** Es el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar. Severdrup and Munk (1947) presentaron por primera vez este concepto producto de la necesidad de establecer un parámetro estadístico que relacionara las alturas de ola obtenidas en el registro instrumental del oleaje y las establecidas a través de observación visual de un estado de mar. Se define como la media aritmética del tercio de olas de mayor altura del registro.
- **Periodo del oleaje (T):** Corresponde al tiempo entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto (UV, 2022).
- **Dirección del oleaje (D):** Compuesto por un ángulo que indica hacia dónde va dirigido el movimiento del mar. Este valor depende del sistema de referencia establecido (UV, 2022).

#### 3.1.2. Oleaje Irregular y Espectro de Olas

El oleaje irregular es el más representativo de la realidad, el cual se puede modelar a partir de espectros del oleaje. La forma del espectro del oleaje en un punto depende de las condiciones externas de generación del oleaje: velocidad del viento, fetch, tiempo de generación, batimetría, etc. y de las condiciones internas: interacción no lineal entre componentes, disipación de energía por rotura o por fricción con el fondo, etc.

El espectro sólo entrega una buena representación del oleaje cuando este puede ser representado correctamente mediante la superposición lineal de componentes sinusoidales. Sin embargo, en profundidades reducidas las olas poseen crestas más apuntadas y de menor duración que los senos, lo que se manifiesta por una generación de nuevos armónicos que aparecen en el espectro como picos adicionales, generalmente en la zona de alta frecuencia (G.I.O.C. et al., 2000).

Existen los siguientes tipos de espectros del oleaje:

- **Espectro de direcciones:** Parámetro del oleaje que representa la distribución de la energía en un rango de direcciones. Permite identificar desde qué dirección proviene el oleaje y qué tan amplia es la dispersión con respecto a la o las direcciones principales. La presencia de varios máximos en el espectro de direcciones es indicativa en un oleaje multimodal (UV, 2022).
- **Espectro de frecuencias:** Parámetro del oleaje que representa la distribución de la energía en un rango de frecuencias. Permite identificar cuáles son las frecuencias del oleaje y cuán amplia es la dispersión con respecto a la o las frecuencias principales. Frecuencias bajas corresponden a periodos “largos” (mar de fondo) y frecuencias altas a periodos “cortos” (mar de viento). La presencia de varios máximos en el espectro de frecuencias es indicador de oleaje multimodal (UV, 2022).
- **Espectro de direcciones y frecuencias:** Parámetro del oleaje que representa la distribución de la energía en un rango de frecuencias y direcciones. También se conoce como espectro bidimensional (UV, 2022).

En este estudio se aplicará el espectro del oleaje de frecuencias JONSWAP, el cual se detalla en el apartado 4.1.3.

## 3.2. Descarga Costera

### 3.2.1. Comportamiento de la Pluma

Ruano (2017) indica que los tres principales procesos que caracterizan la dinámica de la dispersión de la pluma hacia el mar son:

1. Aceleración: Resultante del equilibrio entre las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad (flotabilidad).
2. Mezclado: Gobernado por la turbulencia debida a la fricción inferior e interfacial.
3. Geostrofica: El equilibrio entre Coriolis y el gradiente de presión cruzado desarrollado generan una corriente costera. La dirección del flujo geostrofico es paralela a las isobaras.

### 3.2.2. Número de Froude y Despegue de la Pluma

El número de Froude (ver Ecuación ( 1 )) describe el comportamiento de la velocidad de flujo respecto a la velocidad de propagación de una onda superficial y sirve, por tanto, como medida para la descarga subcrítica (río) y supercrítica (torrente).

- **Descarga crítica:** La velocidad de flujo es igual a la velocidad de propagación de una onda superficial. Las perturbaciones en el comportamiento de la descarga no son perceptibles río arriba.
- **Descarga subcrítica o de río:** La velocidad de flujo es menor que la velocidad de propagación de una onda superficial. La descarga subcrítica tiene normalmente una profundidad de descarga mayor y una velocidad de flujo menor. Las perturbaciones en el comportamiento de la descarga son perceptibles río arriba.
- **Descarga supercrítica o de torrente:** La velocidad de flujo es mayor que la velocidad de propagación de una onda superficial. Las perturbaciones en el comportamiento de la descarga no son perceptibles río arriba.

A continuación, la Ecuación ( 1 ) ilustra el cálculo del número de Froude.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g' * hp}} \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad de la capa superior en [m/s],  $hp$  es la altura de la pluma en [m], y  $g'$  es la gravedad reducida del sistema (ver Ecuación ( 2 )).

$$g' = \frac{g * \Delta\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

En donde  $g$  es la aceleración gravitacional aproximada a 9.81 [m/s<sup>2</sup>],  $\Delta\rho$  corresponde a la diferencia de densidad entre la pluma y el océano, mientras que  $\rho_0$  es la densidad del océano en donde se supone un valor constante de 1026 [kg/m<sup>3</sup>] debido a que presenta una salinidad de 35 [psu].

El número de Froude será calculado en el inicio de la descarga de la pluma a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa. En esta sección transversal de río se observa una altura de la pluma ( $hp$ ) inferior a 1 [m], por ende, los efectos de presión serán despreciables y se tomarán ecuaciones para el cálculo de densidad de la pluma bajo condiciones de 1 [atm] (ver Ecuación ( 3 )) (Millero et al., 1981).

$$\rho(S, T, 0) = \rho_0 + Asp * S + Bsp * S^{1.5} + Csp * S^2 \quad (3)$$

Donde  $S$  es la salinidad del agua en unidades prácticas de salinidad [psu],  $\rho_0$  es la densidad del agua pura en [kg/m<sup>3</sup>], y  $Asp$ ,  $Bsp$  y  $Csp$  son coeficientes en función de la temperatura del agua. Cero en  $\rho(S, T, 0)$  significa que se mide en la superficie a presión atmosférica donde la presión manométrica es cero.

La densidad del agua pura y coeficientes mencionados como funciones de la temperatura vienen dados por las Ecuaciones ( 4 ), ( 5 ), ( 6 ) y ( 7 ). Estas ecuaciones se utilizan para determinar la dependencia de la densidad del agua pura y salada de la temperatura. Los índices sp significan presión estándar.

$$\rho_0 = 999.84259 + 6.793952 * 10^{-2} * T - 9.095290 * 10^{-3} * T^2 + 1.001685 * 10^{-4} * T^3 - 1.120083 * 10^{-6} * T^4 + 6.536332 * 10^{-9} * T^5 \quad (4)$$

$$Asp = 0.824493 - 4.0899 * 10^{-3} * T + 7.6438 * 10^{-5} * T^2 - 8.2467 * 10^{-7} * T^3 + 5.3875 * 10^{-9} * T^4 \quad (5)$$

$$Bsp = -5.72466 * 10^{-3} + 1.0227 * 10^{-4} * T - 1.6546 * 10^{-6} * T^2 \quad (6)$$

$$Csp = 4.8314 * 10^{-4} \quad (7)$$

En donde T es la temperatura en [°C].

El Gobierno de Chile (s.f.) presenta un mapa de Chile con temperaturas de referencia en cuerpos de agua superficiales continentales, este contiene datos de máxima (25 [°C]) y mínima (7 [°C]) temperatura del río Maipo. En base a la información anterior, en este estudio al trabajar con datos medios se supondrá una temperatura del agua del río de 15 [°C]. Al reemplazar este valor en las Ecuaciones ( 4 ), ( 5 ) y ( 6 ) se utilizarán los valores de  $\rho_0 = 1000.12$  [kg/m<sup>3</sup>],  $Asp = 0.7778$  [-],  $Bsp = -0.0046$  [-] y  $Csp = 0.0005$  [-] en la obtención de la densidad de la pluma (ver Ecuación ( 3 )) para las distintas simulaciones numéricas presentadas en la Tabla 1.

Por último, se observa que la densidad de la pluma sólo variará con la salinidad, por ende, se obtendrán valores del número de Froude en la superficie, zona media y piso de la sección transversal del inicio de la desembocadura de la pluma. Con el fin de estimar el tipo de escurrimiento del fluido, ya sea subcrítico (Río,  $Fr < 1$ ) o supercrítico (Torrente,  $Fr > 1$ ).

Por otro lado, el comportamiento dinámico de las plumas depende del momentum de salida y de la flotabilidad. Según lo anterior, utilizando el número de Froude (ver Ecuación ( 1 )) se pueden definir regiones donde uno de los efectos domina por sobre otros.

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 se tiene que  $Fr > 1$ . Luego, a medida que se avanza por la descarga se ve que el número de Froude comienza a descender 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 (Fredes, 2022).

Cuando el número de Froude es igual a 1 la velocidad del flujo se reduce a la velocidad de la corriente de gravedad, que es donde se encuentra el punto de despegue o también conocido como lift-off. El despegue ocurre cuando el agua dulce flotante del río se desprende del fondo y fluye sobre el agua salada del océano. Por lo tanto, en condiciones de bajo caudal esto ocurre en el canal del río, en cambio, bajo condiciones de alto caudal esto sucede fuera de la desembocadura del río (Horner-Devine et al. 2020).

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 formará una pluma en la superficie por la cual se propagará costa afuera (Fredes, 2022).

## 4. Metodología

Este trabajo busca contribuir al entendimiento de la dinámica en zonas de desembocadura de ríos pequeños que descargan en la zona de rompiente del oleaje, a través de la ejecución de distintas simulaciones numéricas en modelo SWASH (ver Tabla 1) incorporando variación de caudal de salida de un río y oleaje irregular, a fin de obtener la distribución de salinidad en la zona de rompiente. En base a estos resultados, se crearán nuevos códigos en Matlab para lograr una representación gráfica de la mezcla y dispersión de la pluma de río en el mar en distintos instantes de tiempo, con vista en planta y diversas secciones transversales en elevación de la zona de estudio. Con ello se podrán analizar los resultados, evaluar perfiles de salinidad de la dispersión de la pluma de río en el mar, y establecer los parámetros de mayor influencia del fenómeno. Las variables involucradas son: caudal de salida del río, altura, periodo y dirección de las olas del mar.

### 4.1. Modelo SWASH

SWASH es una herramienta numérica implementada para simular fenómenos de transporte y flujo rotacional inestable, no hidrostático, de superficie libre, en aguas costeras impulsado por olas, mareas, flotabilidad y fuerzas del viento. En donde aplican numéricamente las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes, y proporciona una base general para describir las transformaciones de las olas desde aguas profundas hasta una playa o un puerto, y flujos impulsados por la densidad en mares costeros, estuarios, lagos y ríos.

En principio, el software SWASH no tiene limitaciones y puede capturar fenómenos de flujo con escalas espaciales de centímetros a kilómetros y escalas temporales de segundos a horas. Sin embargo, este se restringe a resolver la dinámica de la transformación de las olas, el flujo de flotabilidad y el intercambio turbulento de impulso, salinidad, calor y sedimentos en suspensión en mares poco profundos, aguas costeras, estuarios, arrecifes, ríos y lagos. Algunos ejemplos son las aplicaciones costeras a pequeña escala, como las olas que se acercan a una playa, la penetración de las olas en un puerto, las olas de inundación en un río, el flujo oscilatorio a través de las copas de los árboles, la intrusión de sal en un estuario, las olas internas y los sistemas oceánicos, de plataformas y costeros a gran escala impulsado por Coriolis y fuerzas meteorológicas para simular maremotos e inundaciones por marejadas ciclónicas.

Cabe destacar que SWASH no es un modelo de ondas tipo Boussinesq, la estructura vertical del flujo es parte de la solución. De hecho, el software SWASH puede ejecutarse en modo promediado en profundidad o modo multicapa en el que el dominio computacional se divide en un número fijo de capas verticales que siguen el terreno. SWASH mejora su dispersión de frecuencia al aumentar este número de capas en lugar de aumentar el orden de las derivadas de las variables dependientes como lo hacen los modelos de ondas tipo Boussinesq. Sin embargo, SWASH contiene como máximo derivadas espaciales de segundo orden, mientras que las aproximaciones de diferencias finitas aplicadas son como máximo de segundo orden tanto en el tiempo como en el espacio. Esta es probablemente la razón principal por la que SWASH es mucho más robusto y rápido que cualquier otro modelo de onda tipo Boussinesq.

El paquete de software de SWASH incluye procesamiento previo y posterior fácil de usar, y no necesita bibliotecas especiales. Además, es altamente flexible, accesible y fácilmente ampliable en varias funcionalidades del modelo.

En este trabajo, se plantea un modelo en SWASH para estudiar la zona de rompiente, ya que permite simular la propagación y rotura del oleaje junto con fenómenos de transporte (salinidad) hasta tres dimensiones espaciales.

#### 4.1.1. Configuración del Modelo

Este trabajo está enfocado en analizar la dinámica costera derivada de la interacción de un campo de oleaje incidente y una descarga de agua fresca de río. Buscando aislar otras variables que puedan influir el desarrollo de la pluma, el modelo propuesto no considera condiciones batimétricas que generen impacto en las corrientes costeras.

El dominio computacional del modelo se establece en una dimensión en planta de 333 x 400 en dirección cross-shore y along-shore respectivamente. La grilla se compone de elementos cuadrados uniformes de 3 x 3 [m]. Con ello, se genera un dominio de 999 x 1200 [m] (Figura 1). Además, el modelo se ejecuta en modo multicapa utilizando 5 capas distribuidas equidistantemente a lo largo del eje Z vertical (Figura 2).

La descarga del río posee un ancho constante de 24 [m] y se ubica en la zona Este del modelo ya que se espera que las corrientes generadas acorde a la dirección impuesta para el oleaje incidente transporten la pluma hacia el Oeste (Figura 1).

Todas las simulaciones numéricas del modelo SWASH utilizan la misma batimetría, la cual se extiende desde una profundidad máxima de 10 [m] costa afuera hasta una altura de 0.80 [m] en la costa, con pendiente de playa constante de valor 0.015 en dirección cross-shore (eje X). Además, la batimetría es uniforme en la dirección along-shore (eje Y) y se impone un campo de oleaje irregular en el espacio, pero constante en el límite izquierdo del dominio como condición de borde. También se especifican condiciones de borde periódicas en los extremos norte y sur, para eliminar la posibilidad de que se generen 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 del eje Y positivo (Figura 1).

Considerando que SWASH no puede comenzar la simulación a partir de un estado en el cual la descarga y el oleaje ya se encuentren interactuando, se opta por establecer condiciones iniciales de salinidad uniforme de 35 [psu] en todo el dominio a excepción del borde aguas arriba de la descarga en la cual se establece una salinidad de 0 [psu]. Una vez iniciada la simulación, comienza a ingresar la descarga (con 0 [psu]) a través del río y a generarse la pluma.

Las simulaciones tendrán una duración de 1 hora, en donde dará inicio la toma de datos desde los 20 minutos con un delta de tiempo cada 2 segundos. También presentará un tiempo inicial adicional de 10 minutos para suavizar la transición de las condiciones iniciales del modelo del fenómeno.

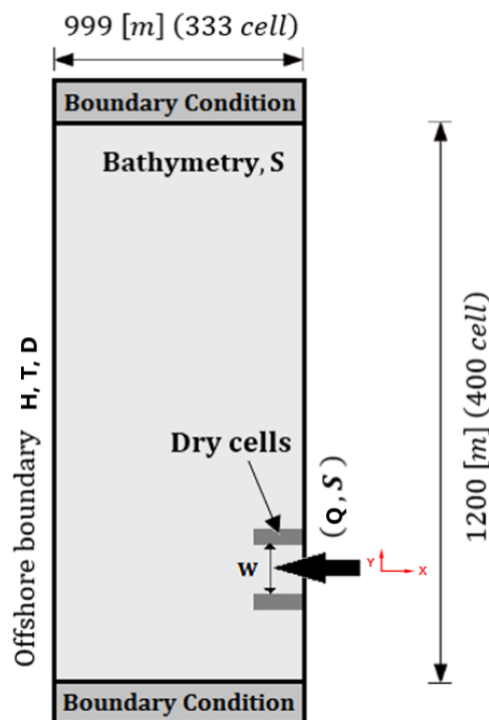


Figura 1: Configuración de modelo numérico, que incluye condiciones de borde, descarga y discretización horizontal y vertical.

Fuente: Elaboración propia.

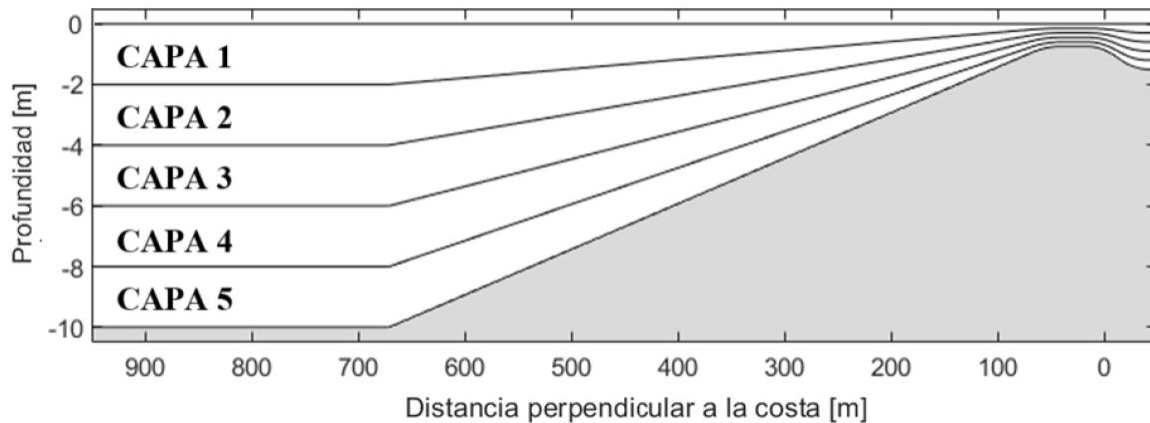


Figura 2: Distribución en elevación de modelo numérico, el cual incluye la representación de la batimetría idealizada y la representación de las 5 capas verticales equidistantes.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Base de Datos

El input en el software SWASH se compone de 3 archivos .txt:

- Código: Se incorpora el espectro del oleaje y variación de caudal de salida de río. Dentro de este archivo se indica que se quiere extraer, en este caso, se da importancia a los resultados de salinidad en el tiempo.
- Batimetría: Idealizada con pendiente constante y profundidad máxima de 10 [m].
- Salinidad: El mar toma un valor medio de 35 [psu] y el río toma un valor de 0 [psu] en el instante de tiempo inicial.

Para las distintas simulaciones numéricas en SWASH se mantendrán constantes los archivos de Batimetría y Salinidad inicial, estos se adjuntan en Anexos en la Figura 28 y Figura 29 de manera respectiva.

El archivo que debe ser modificado es el de Código, en la Figura 30 y Figura 31 de Anexos se presenta un ejemplo con las constantes  $H = 1.5$  [m],  $T = 8$  [s],  $D = 15$  [°] y la variable  $Q = 30$  [m<sup>3</sup>/s]. Como se logra observar en la Figura 30 de Anexos, se identifican los elementos más importantes, primero la definición de la grilla, el llamado de los archivos de batimetría y salinidad, la definición de la altura (H), periodo (T), dirección (D) y caudal (Q), y el cálculo del archivo de salinidad en el tiempo.

#### 4.1.3. Espectro del Oleaje de Jonswap

En el modelo se utiliza por defecto el espectro JONSWAP (ver Ecuación ( 8 )), el cual es un espectro escalar teórico multiparamétrico desarrollado por Hasselman a partir del espectro Pierson-Moskowitz para incluir oleajes limitados por el fetch, basado en el ajuste de espectros reales medidos en el Mar del Norte entre 1968 y 1969.

La forma espectral propuesta es:

$$S(w) = \frac{\alpha * g^2}{16 * \Pi^4} * w^{-5} * \exp \left[ -\frac{5}{4} * \left( \frac{w}{wp} \right)^{-4} \right] * \gamma^\delta$$

$$\delta = \exp \left[ -\frac{1}{2 * \sigma^2} * \left( \frac{w}{wp} - 1 \right)^2 \right] \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma^1 & \text{para } w \leq wp \\ \sigma^2 & \text{para } w \geq wp \end{cases}$$

Donde  $w$  es la frecuencia,  $w_p$  es la frecuencia peak,  $g$  es la aceleración de gravedad, y siendo los parámetros restantes  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma^1$  y  $\sigma^2$  elementos de datos. Se modifica  $\gamma$  que viene por defecto ( $\gamma = 3.3$ ) a un valor de 1.42 para la mejora del peak.

Fundamentalmente permite definir oleajes tipo sea (o mar de viento) parcialmente desarrollados, es decir, aquellas situaciones en las cuales el mecanismo de generación del oleaje está limitado por la longitud del fetch y/o por la duración de actuación del viento generador (ver Figura 3).

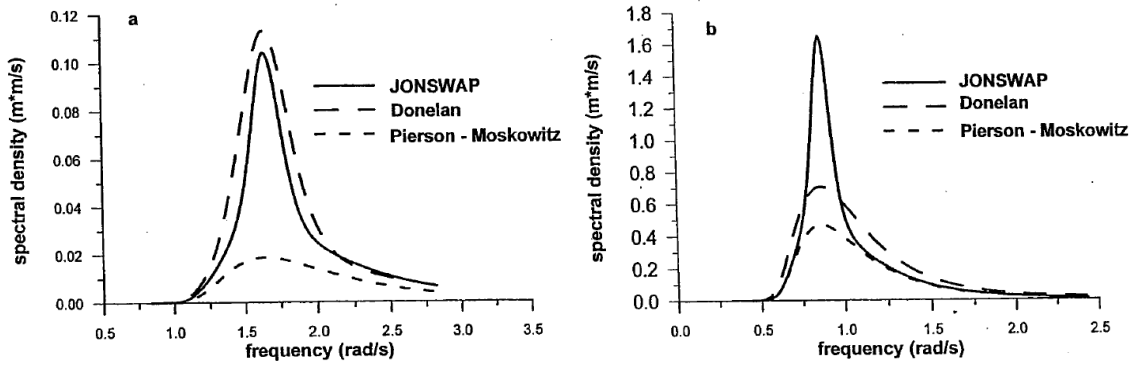


Figura 3: Comparación de espectros Pierson-Moskowitz, JONSWAP y Donelan: a) condiciones de fetch limitado y b) oleaje totalmente desarrollado.

Fuente: G.I.O.C. 2000.

#### 4.1.4. Parámetros Físicos

El modelo define parámetros físicos, estos principalmente equivalen a los valores de la viscosidad tanto vertical como horizontal, difusividad, fricción de fondo y parámetros de control de rotura del oleaje.

La viscosidad horizontal utiliza un esquema de viscosidad constante de 0.001 [m²/s] (valor promedio de la viscosidad del agua). Por otro lado, el esquema utilizado en la viscosidad vertical corresponde al modelo  $k - \epsilon$  estándar, 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). Adicionalmente, por razones de estabilidad numérica, se define la viscosidad de fondo en 0.0001 [m²/s] (Fredes, 2022).

El coeficiente de difusividad indica la facilidad con que un soluto se mueve por un disolvente, en este caso, el parámetro mencionado 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 se incluye automáticamente para simulaciones en tres dimensiones y se relaciona con el modelo de viscosidad vertical ( $k - \epsilon$  estándar), y el valor de la difusividad horizontal depende del flujo y del tamaño de la grilla de cada simulación en cuestión, considerando el tamaño de grilla del ítem 4.1.1. se opta por establecer la difusividad horizontal en 0.001 [m²/s].

Según la recomendación del manual de SWASH para la simulación de olas y circulación costera, la fricción del fondo considera un coeficiente de Manning de 0.019.

SWASH permite definir dos coeficientes de control, el primero es el parámetro de inclinación máxima  $\alpha$  y el segundo corresponde al parámetro de persistencia  $\beta$ , estos coeficientes se definen con los valores

por defecto de 0.6 y 0.3 respectivamente. Esto permite activar el control de rotura del oleaje ya que la resolución vertical de capas es relativamente baja, lo cual 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.

#### 4.1.5. Salida de Datos

Luego de correr las simulaciones numéricas en el modelo SWASH presentes en el ítem 4.2., se extraen diversos resultados en archivos Matlab. Por ende, se deben crear nuevos códigos Matlab para elegir los datos de salinidad de interés (selección de tiempo y espacio adecuado) y lograr una representación gráfica, ya sea a nivel en planta de la dispersión de la pluma, como también de vista en elevación para la representación de la mezcla.

### 4.2. Simulaciones Numéricas en Modelo SWASH

Para definir las pruebas o simulaciones numéricas en SWASH, se extraen los datos de la Figura 4 con valores de altura, periodo y dirección del Puerto de San Antonio, cercano al río Maipo. Cabe destacar que el Atlas del Oleaje de Chile de la Universidad de Valparaíso contiene  $0 [^\circ]$  en dirección hacia el Norte, al hacer similitudes con la referencia del programa SWASH se tienen  $90 [^\circ]$  hacia el Norte.

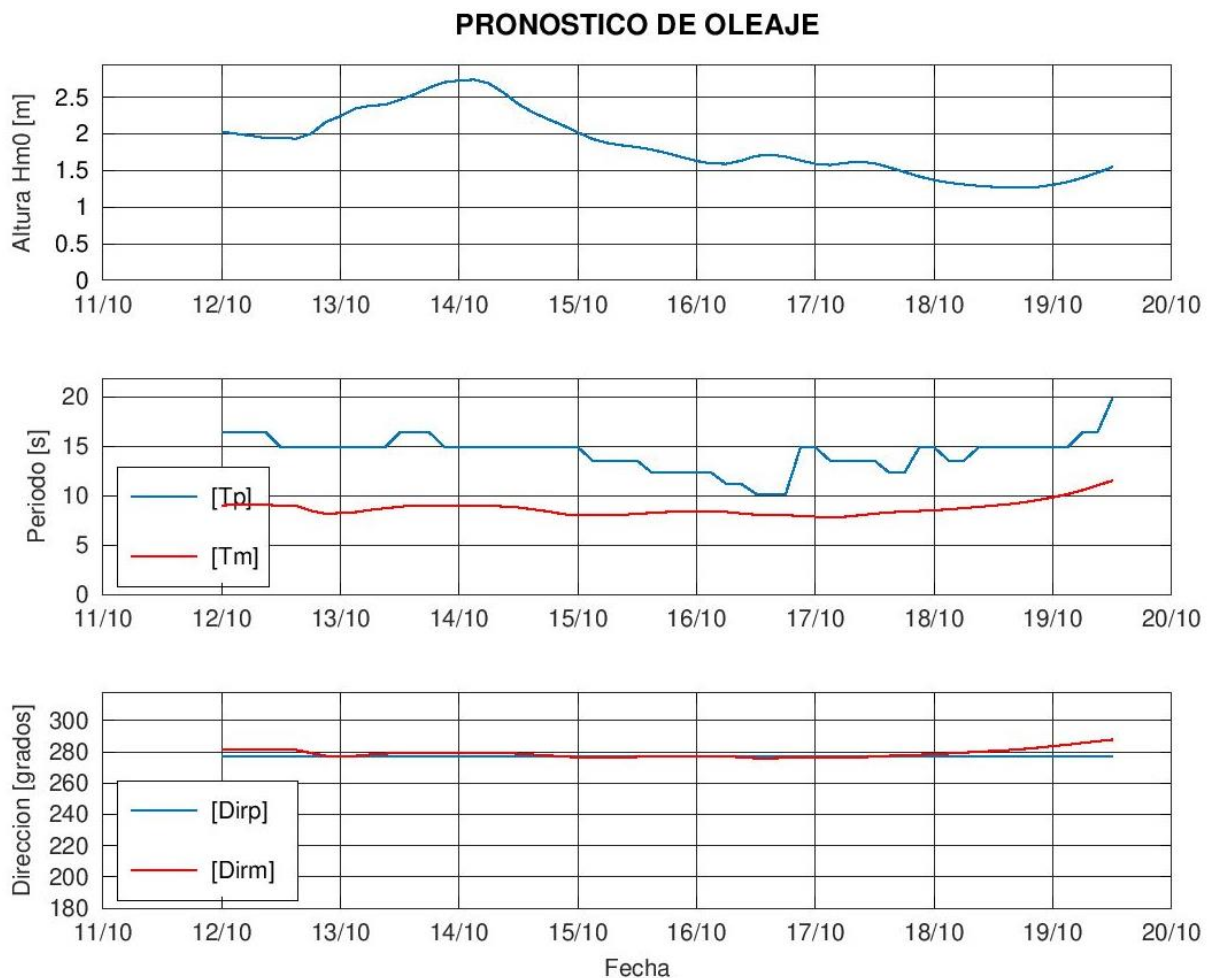


Figura 4: Pronóstico del oleaje del puerto San Antonio de octubre de 2022.

Fuente: Atlas del Oleaje de Chile, Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso de Chile.

Luego, con los datos de la estación fluviométrica (5748001 - Río Maipo en Cabimbao) más cercana a la desembocadura del río Maipo se extraen los valores de caudal (ver Figura 5).



Figura 5: Datos de caudal en estación fluviométrica Río Maipo Cabimbao – 5748001.

Fuente: CAMELS.

Se presenta una cantidad de 5 simulaciones para variación de altura de la ola, 5 simulaciones para la variación del periodo de la ola, 5 simulaciones para la variación de la dirección de las olas del mar, y 6 simulaciones para la variación de caudal de salida del río en la desembocadura al mar. En la Tabla 1 se encuentra el resumen con los valores definidos de las variables.

Tabla 1: Tabla resumen de simulaciones con variación de altura, periodo y dirección del oleaje, y caudal de salida del río en la desembocadura al mar.

Fuente: Elaboración propia.

Simulaciones numéricas con variación de altura del oleaje Constantes: T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]						
Número de simulación	1	2	3	4	5	-
H [m]	1	1.5	2	2.5	2.8	-
Simulaciones numéricas con variación de periodo del oleaje Constantes: H = 1.5 [m], D = 15 [°], Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]						
Número de simulación	1	2	3	4	5	-
T [s]	5	8	12	16	20	-
Simulaciones numéricas con variación de dirección del oleaje Constantes: H = 1.5 [m], T = 8 [s], Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]						

Número de simulación	1	2	3	4	5	-
D [°]	8	12	15	20	26	-
<p>Simulaciones numéricas con variación de caudal de salida del río</p> <p>Constantes: H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°]</p>						
Número de simulación	1	2	3	4	5	6
Q [m <sup>3</sup> /s]	5	15	30	45	65	80

## 5. Resultados

En primer lugar, en el apartado 5.1. se ilustran los resultados de dispersión y mezcla de la pluma de una simulación base sin oleaje, la cual sólo presenta descarga con un caudal de 30 [m<sup>3</sup>/s].

Posteriormente, en el apartado 5.2 y 5.3 se presentan los resultados de dispersión y mezcla de la pluma de las simulaciones con oleaje propuestas en la Tabla 1.

### 5.1. Dispersión y Mezcla de Caso sin Oleaje

El caso base sin oleaje presenta una descarga de caudal de 30 [m<sup>3</sup>/s]. La Figura 6 ilustra la dispersión de la pluma a través del tiempo de simulación de 20 a 60 minutos, se observa que en el instante final de tiempo en el centro de la descarga existe una distancia máxima perpendicular a la costa de 492 [m].

Luego, la Figura 7 muestra la mezcla de la pluma en distintas secciones de distancia paralela a la costa para un tiempo de simulación de 54 a 60 [min], en donde se demuestra simetría y se obtiene un punto de despegue a 159 [m] perpendicular a la costa en la descarga del río. Además, al calcular el número de Froude en el eje transversal del inicio de la desembocadura del río al mar a partir de las Ecuaciones ( 1 ), ( 2 ) y ( 3 ), con una velocidad de superficie  $v = 1.71$  [m/s], altura de agua  $h_p = 0.84$  [m], salinidad  $S = 0$  [psu], se llega a un número de Froude de 3.74 ( $Fr > 1$ ), por lo que hay escurrimiento del tipo torrente en el caso sin oleaje.

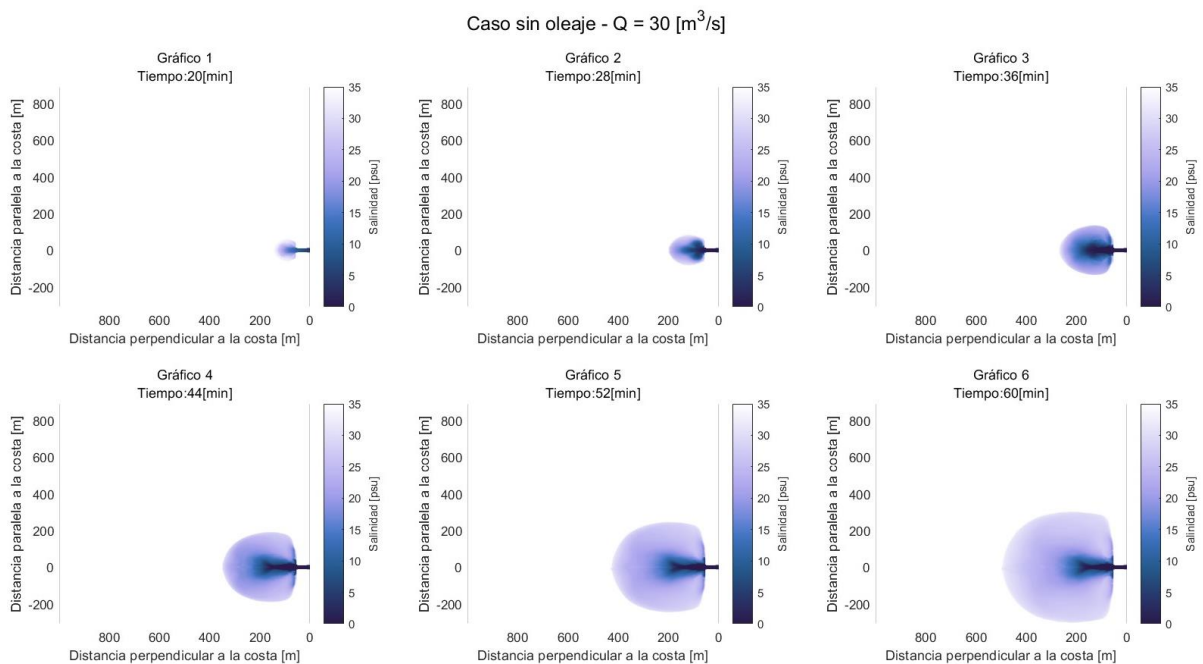
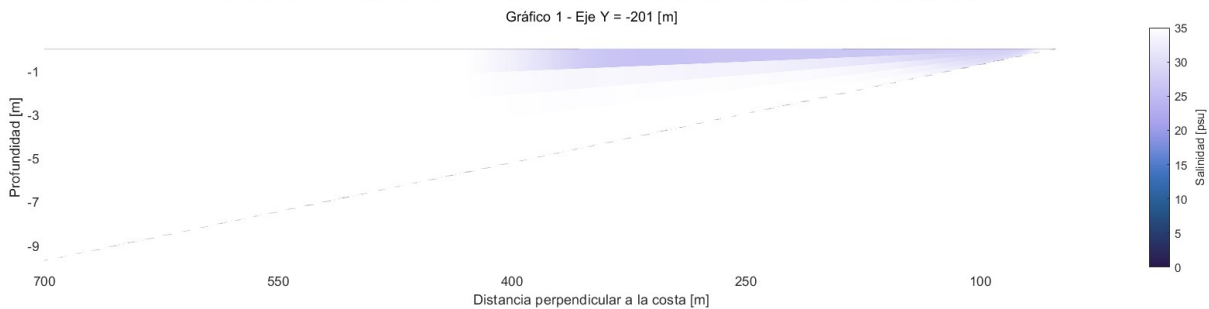


Figura 6: Dispersión de la pluma sin oleaje y con caudal de salida de 30 [m<sup>3</sup>/s].

Fuente: Elaboración propia.

Resultado sin oleaje con salinidad promedio entre tiempo de 54 a 60 [min] - Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



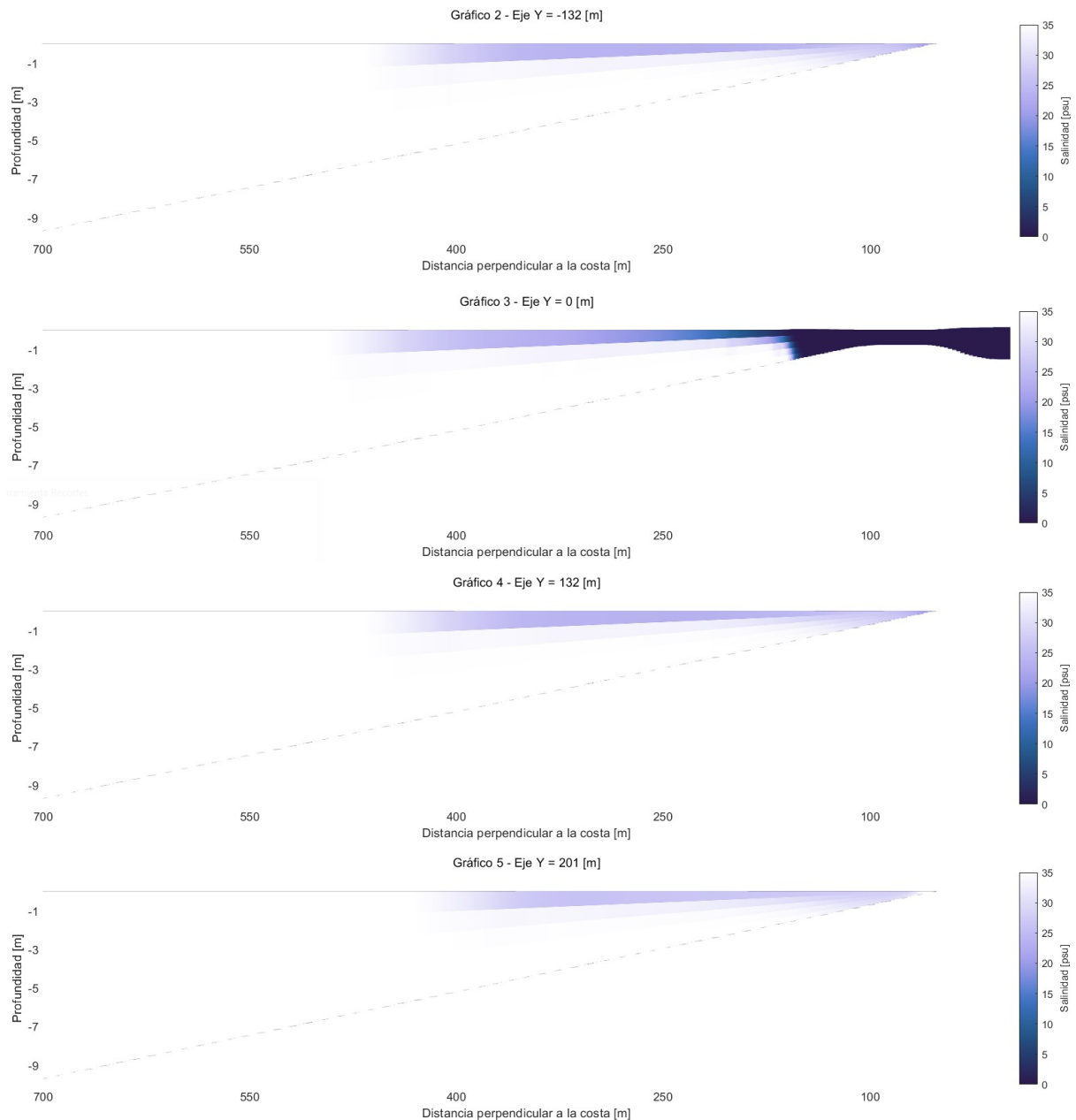


Figura 7: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para el caso sin oleaje y con caudal de salida de  $30 \text{ [m}^3\text{/s]}$ .

Fuente: Elaboración propia.

## 5.2. Dispersión de la Pluma con Oleaje

A continuación, se presentan los resultados de la dispersión de una pluma de río en el mar sobre las simulaciones presentadas en la Tabla 1, el cual abarca la variación de altura, periodo y dirección del oleaje, y variación del caudal de salida del río.

### 5.2.1. Variación de Altura del Oleaje

En la Tabla 2 se presenta el tiempo máximo de ejecución de las simulaciones para las distintas variaciones de altura del oleaje. Luego, en la Figura 8 se tienen los resultados con la altura del oleaje medio de  $1.5 \text{ [m]}$  a través del tiempo (entre  $20 \text{ [min]}$  y  $60 \text{ [min]}$ ). Además, en la Figura 9 se adjunta un esquema de comparación entre las distintas simulaciones de altura del oleaje en un instante de tiempo máximo de

46 [min]. Por último, en la Tabla 3 se añade la distancia máxima perpendicular a la costa de la dispersión de la pluma de río en el mar y su respectiva ubicación vertical, en base a los resultados de la Figura 9 anteriormente indicada. Resultados adicionales se encuentran en Anexos.

Tabla 2: Tiempo máximo de simulación para variación de altura del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

Simulaciones numéricas con variación de altura del oleaje					
Constantes: $T = 8$ [s], $D = 15$ [°], $Q = 30$ [m <sup>3</sup> /s]					
Número de simulación	1	2	3	4	5
H [m]	1	1.5	2	2.5	2.8
Tiempo máximo de simulación [min]	60	60	60	46	60

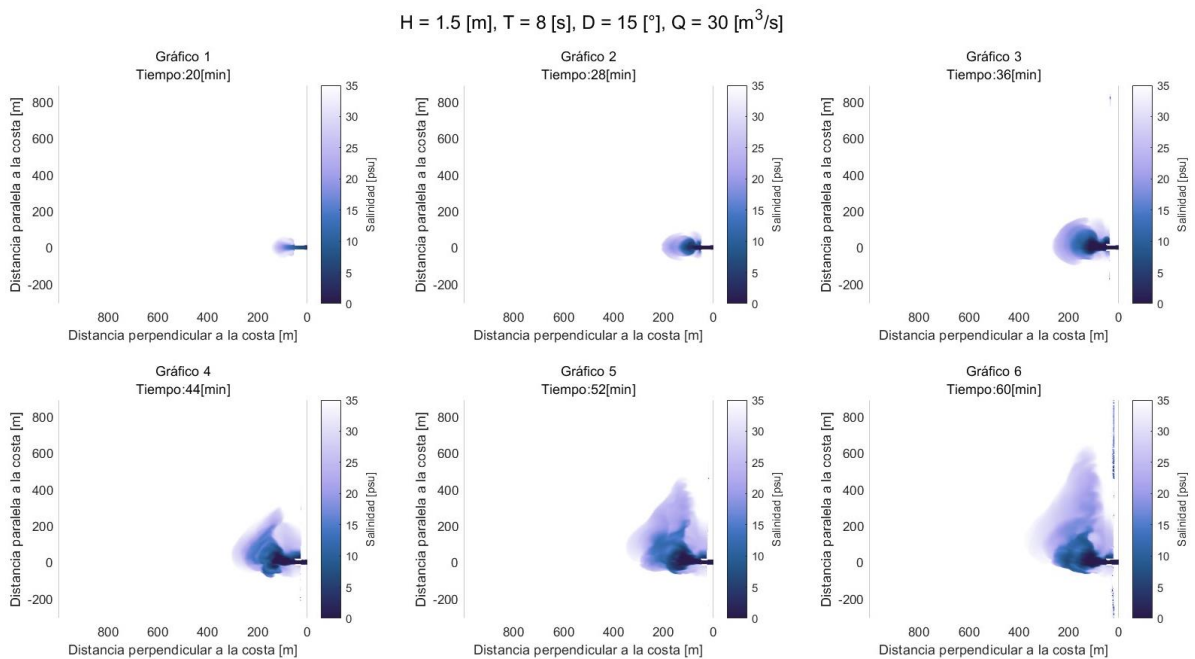


Figura 8: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 1.5 [m] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

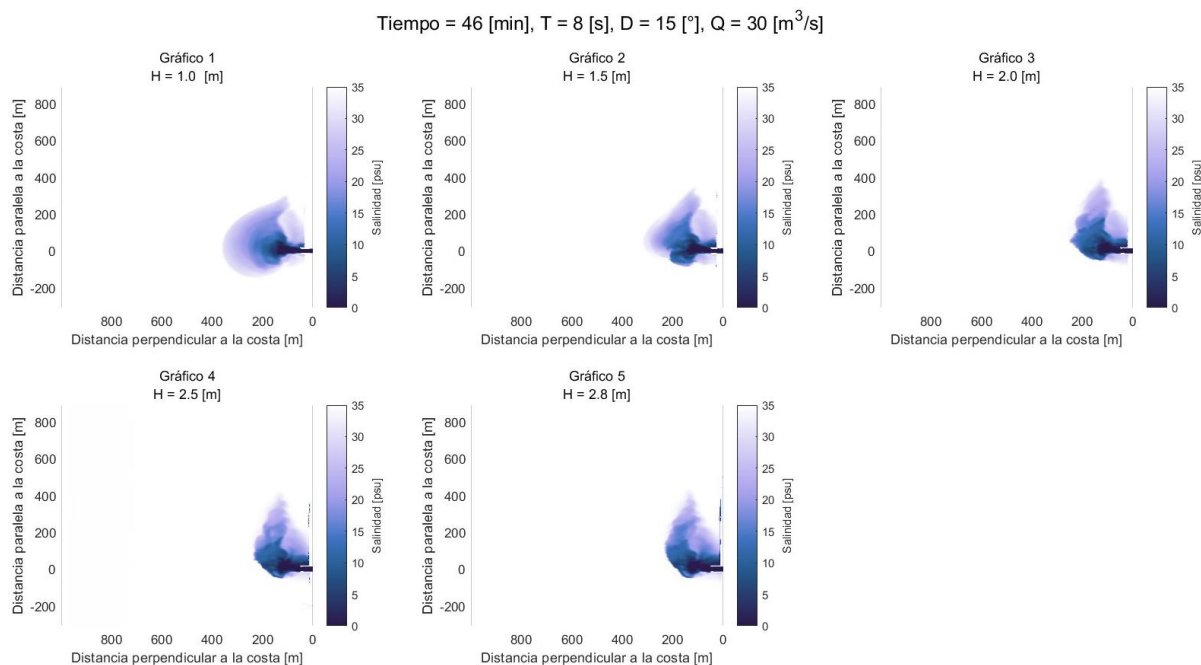


Figura 9: Esquema de comparación de gráficos con variación de altura del oleaje en el tiempo de simulación de 46 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 9 en el tiempo de simulación de 46 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
H [m]	1	1.5	2	2.5	2.8
Distancia máxima perpendicular a la costa de dispersión de la pluma [m]	366	324	264	246	240
Ubicación vertical paralela a la costa [m] que contiene el rango de ubicación de la distancia máxima perpendicular a la costa	Inicio: -3 Fin: 45 Rango: 48	Inicio: 30 Fin: 75 Rango: 45	Inicio: 42 Fin: 63 Rango: 21	Inicio: 48 Fin: 93 Rango: 45	Inicio: 102 Fin: 141 Rango: 39

### 5.2.2. Variación de Periodo del Oleaje

La Tabla 4 contiene el tiempo máximo de ejecución de las simulaciones para las distintas variaciones de periodo del oleaje. Posteriormente, en la Figura 10 se tienen resultados con el periodo del oleaje de 12 [s] a través del tiempo (entre 20 y 51 [min]). Además, en la Figura 11 se adjunta un esquema de

comparación entre las distintas simulaciones de periodo del oleaje en un instante de tiempo máximo de 51 [min]. Por último, en la Tabla 5 se añade la distancia máxima perpendicular a la costa de la dispersión de la pluma de río en el mar y su respectiva ubicación vertical, en base a los resultados de la Figura 11 mencionada anteriormente. Resultados adicionales se encuentran en Anexos.

Tabla 4: Tiempo máximo de simulación para variación de periodo del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

Simulaciones numéricas con variación de periodo del oleaje					
Constantes: H = 1.5 [m], D = 15 [°], Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]					
Número de simulación	1	2	3	4	5
T [s]	5	8	12	16	20
Tiempo máximo de simulación [min]	60	60	51	60	60

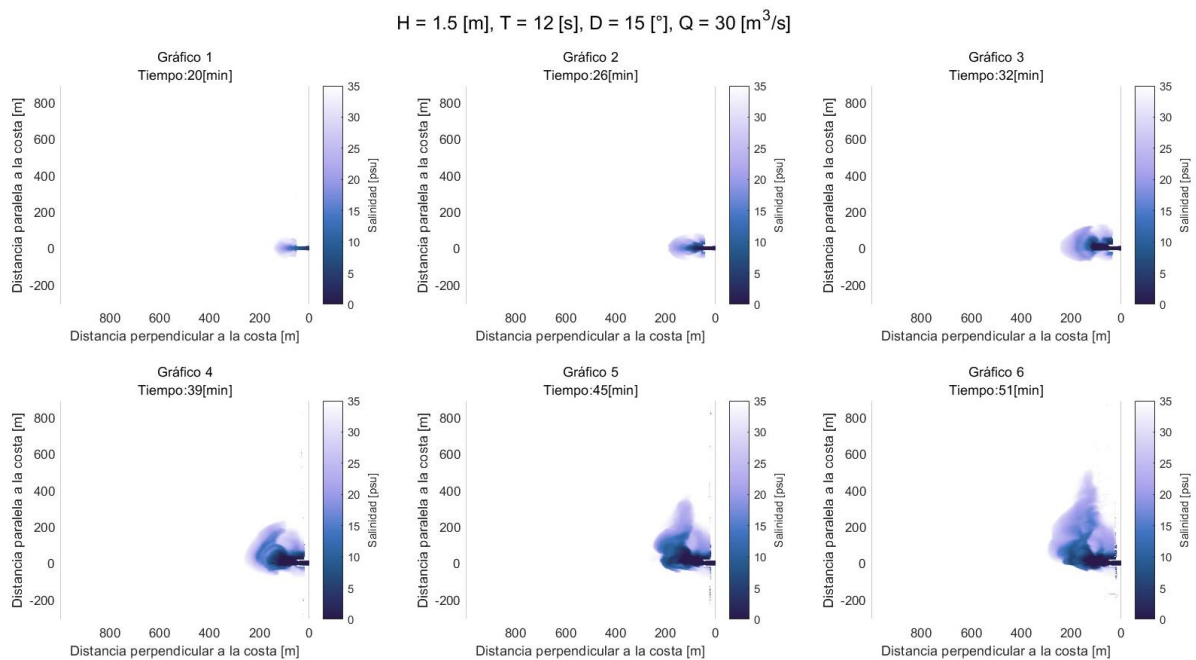


Figura 10: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 12 [s] entre 20 y 51 [min].

Fuente: Elaboración propia.

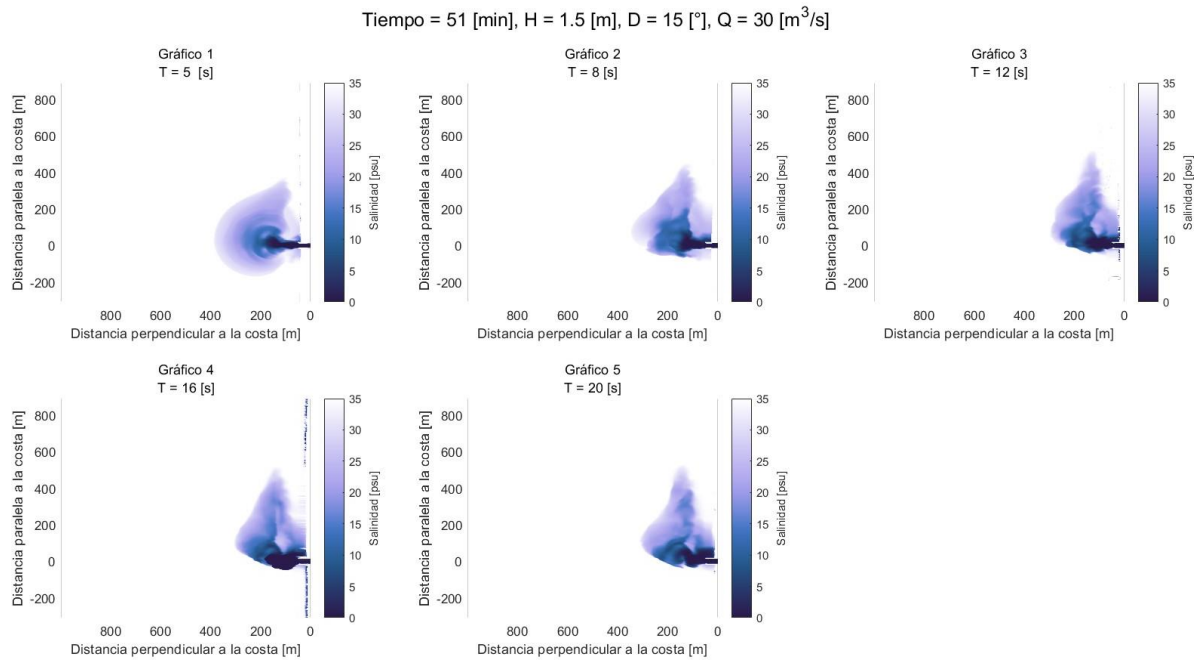


Figura 11: Esquema de comparación de gráficos con variación de periodo del oleaje en el tiempo de simulación de 51 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 11 en el tiempo de simulación de 51 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
T [s]	5	8	12	16	20
Distancia máxima perpendicular a la costa de dispersión de la pluma [m]	390	348	300	309	312
Ubicación vertical paralela a la costa [m] que contiene el rango de ubicación de la distancia máxima perpendicular a la costa	Inicio: 3 Fin: 60 Rango: 57	Inicio: 54 Fin: 102 Rango: 48	Inicio: 48 Fin: 102 Rango: 54	Inicio: 81 Fin: 111 Rango: 30	Inicio: 90 Fin: 129 Rango: 39

### 5.2.3. Variación de Dirección del Oleaje

Se incluye en la Tabla 6 el tiempo máximo de ejecución de las simulaciones para las distintas variaciones de dirección del oleaje. Luego, en la Figura 12 se tienen resultados con dirección del oleaje de 12 [°] a través del tiempo (entre 20 y 60 [min]). Además, en la Figura 13 se adjunta un esquema de comparación

entre las distintas simulaciones de dirección del oleaje en un instante de tiempo máximo de 42 [min]. Por último, en la Tabla 7 se añade la distancia máxima perpendicular a la costa de la dispersión de la pluma de río en el mar y su respectiva ubicación vertical, basado en los resultados de la Figura 13. Resultados adicionales se encuentran en Anexos.

Tabla 6: Tiempo máximo de simulación para variación de dirección del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

Simulaciones numéricas con variación de dirección del oleaje					
Constantes: H = 1.5 [m], T = 8 [s], Q = 30 [m <sup>3</sup> /s]					
Número de simulación	1	2	3	4	5
D [°]	8	12	15	20	26
Tiempo máximo de simulación [min]	42	60	60	49	54

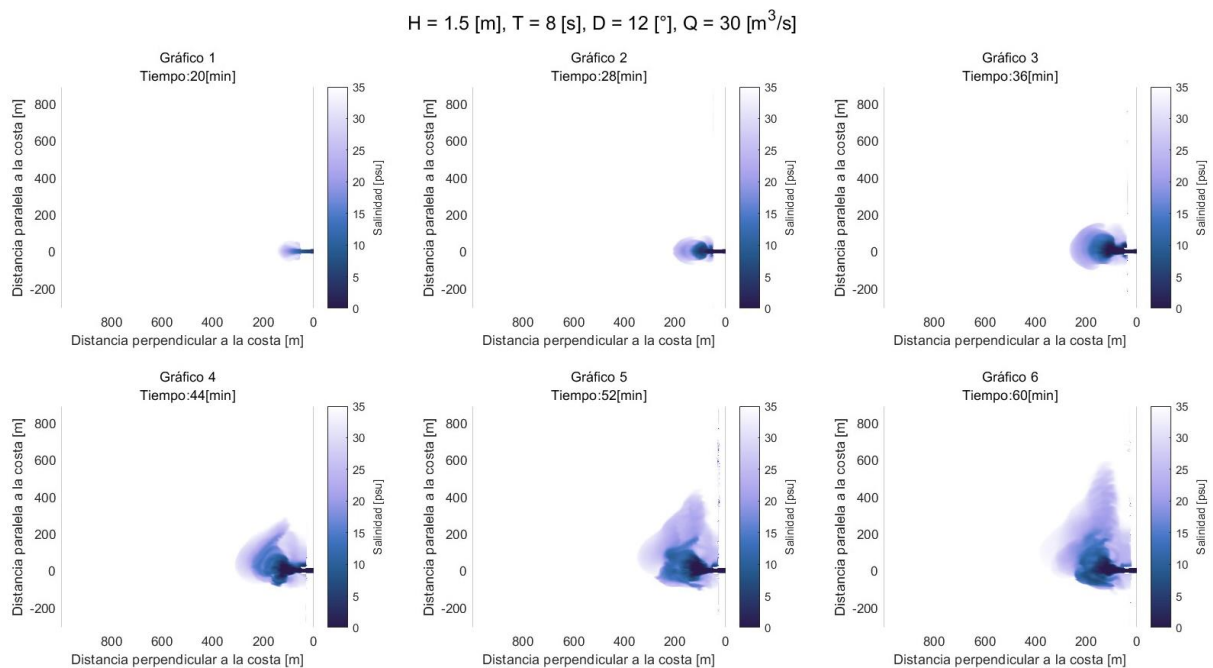
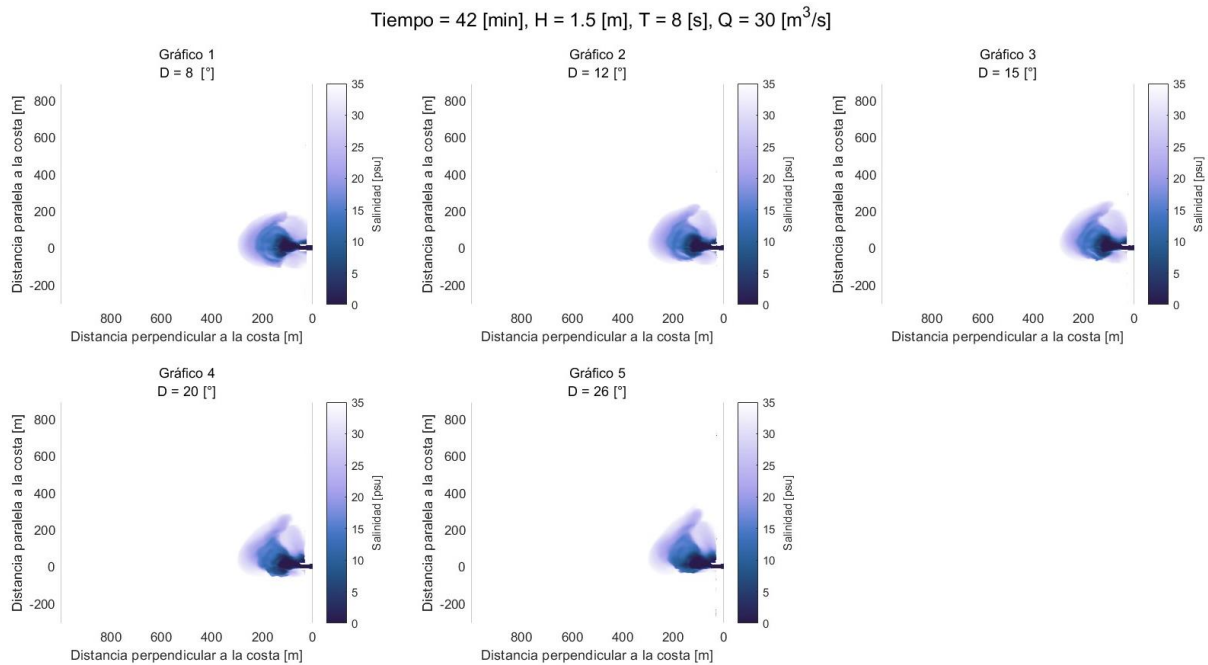


Figura 12: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de 12 [°] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 13: Esquema de comparación de gráficos con variación de dirección del oleaje en el tiempo de simulación de 42 minutos.*

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 7: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 13 en el tiempo de simulación de 42 minutos.*

*Fuente: Elaboración propia.*

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
D [°]	8	12	15	20	26
Distancia máxima perpendicular a la costa de dispersión de la pluma [m]	306	306	303	306	306
Ubicación vertical paralela a la costa [m] que contiene el rango de ubicación de la distancia máxima perpendicular a la costa	Inicio: 0 Fin: 33 Rango: 33	Inicio: 6 Fin: 39 Rango: 33	Inicio: 12 Fin: 36 Rango: 24	Inicio: 15 Fin: 45 Rango: 30	Inicio: 24 Fin: 54 Rango: 30

### 5.2.4. Variación de Caudal de Salida del Río

En la Tabla 8 se presenta el tiempo máximo de simulación para las distintas variaciones de caudal de salida del río en el mar. Luego, en la Figura 14 se tienen los resultados con un caudal de 15 [m<sup>3</sup>/s] a través del tiempo (entre 20 y 60 [min]). Además, en la Figura 15 se adjunta un esquema de comparación

entre las distintas simulaciones de altura del oleaje en un instante de tiempo máximo de 34 [min]. Por último, en la Tabla 9 se añade la distancia máxima perpendicular a la costa de la dispersión de la pluma de río en el mar y su respectiva ubicación vertical, en base a los resultados de la Figura 15 anteriormente indicada. Resultados adicionales se encuentran en Anexos.

Tabla 8: Tiempo máximo de simulación para variación de caudal.

Fuente: Elaboración propia.

Simulaciones numéricas con variación de caudal de salida del río						
Constantes: H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°]						
Número de Simulación	1	2	3	4	5	6
Q [m <sup>3</sup> /s]	5	15	30	45	65	80
Tiempo máximo de simulación [min]	60	60	60	50	37	34

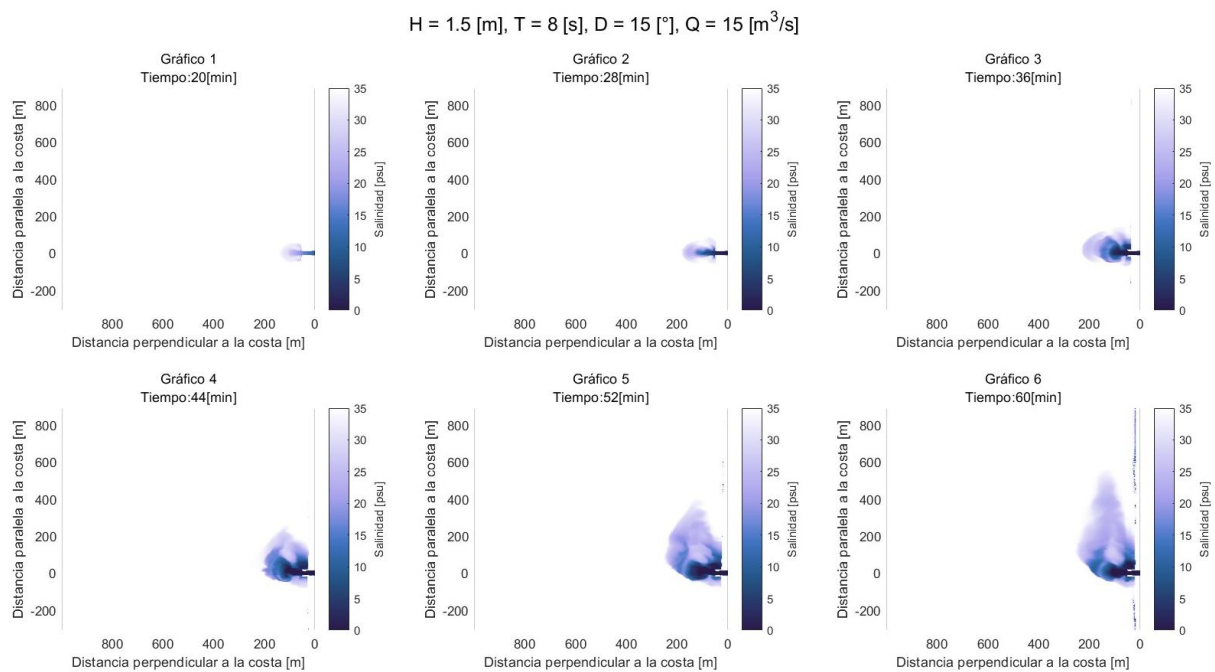


Figura 14: Resultados de la dispersión de la pluma con caudal 15 [m<sup>3</sup>/s] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

Tiempo = 34 [min], H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°]

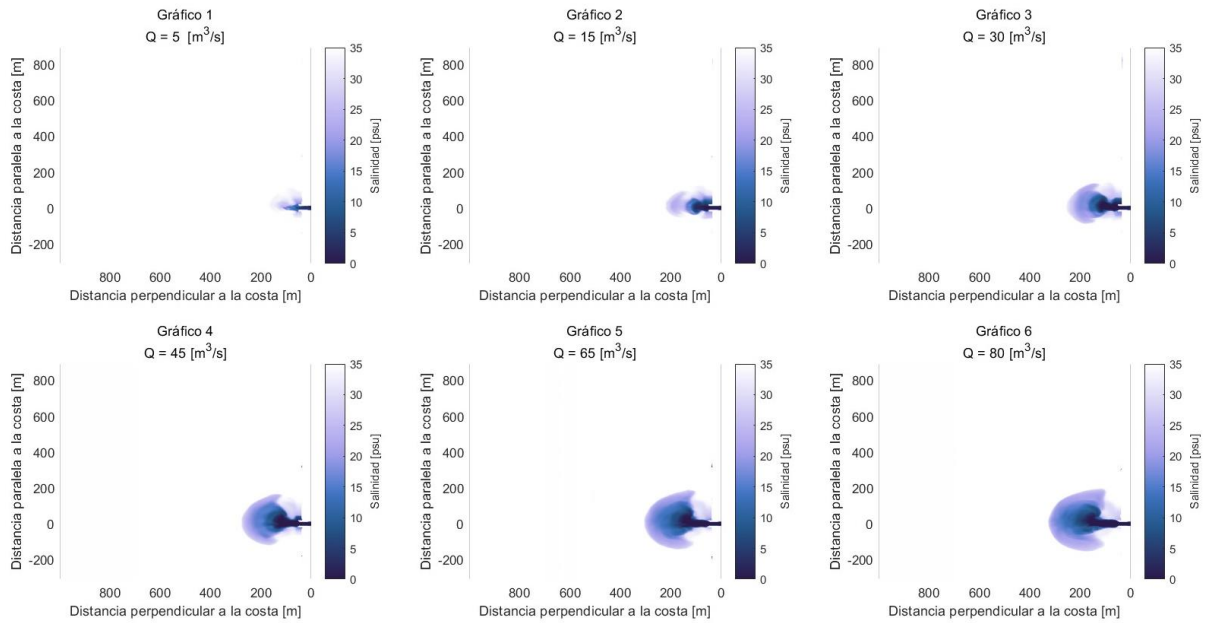


Figura 15: Esquema de comparación de gráficos con variación de caudal en el tiempo de simulación de 34 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Distancia máxima del eje X de la dispersión de la pluma con respecto al esquema de la Figura 15 en el tiempo de simulación de 34 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5	Gráfico 6
Q [m <sup>3</sup> /s]	5	15	30	45	65	80
Distancia máxima perpendicular a la costa de dispersión de la pluma [m]	180	228	261	282	309	333
Ubicación vertical paralela a la costa [m] que contiene el rango de ubicación de la distancia máxima perpendicular a la costa	Inicio: 6 Fin: 27 Rango: 21	Inicio: 3 Fin: 24 Rango: 21	Inicio: -9 Fin: 18 Rango: 27	Inicio: -15 Fin: 30 Rango: 45	Inicio: -21 Fin: 39 Rango: 60	Inicio: 0 Fin: 24 Rango: 24

### 5.3. Mezcla de la Pluma con Oleaje

La representación de batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con el espectro de oleaje involucrado se presenta en la Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 para el tiempo final de variación de altura, periodo y dirección del oleaje, y caudal de salida del río al mar, de manera respectiva.

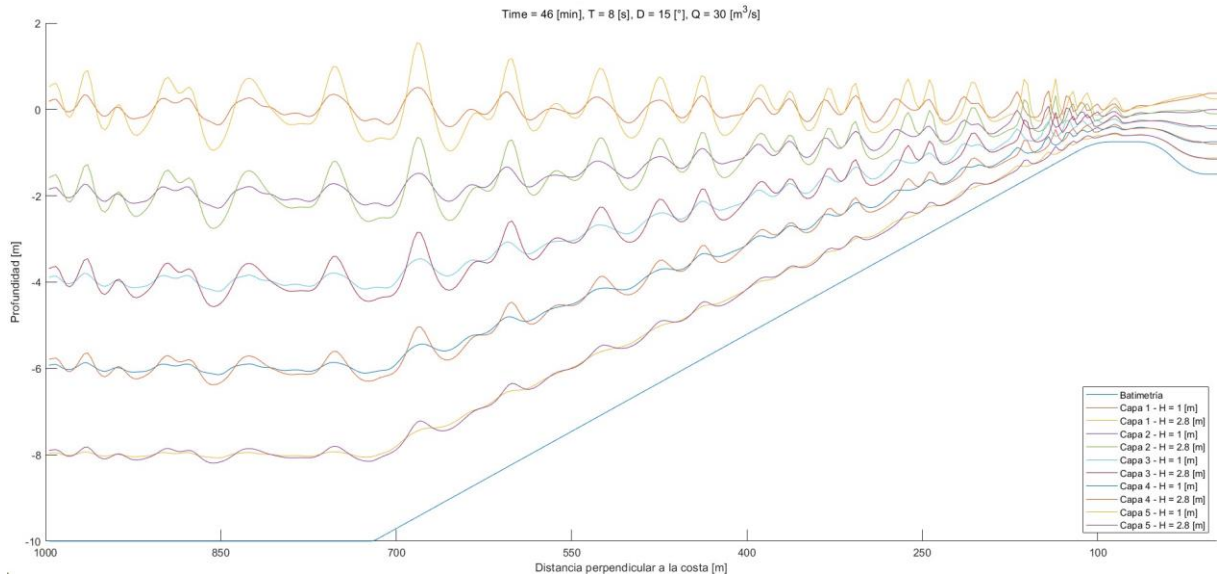


Figura 16: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de altura del oleaje, incluye la primera y última simulación.

Fuente: Elaboración propia.

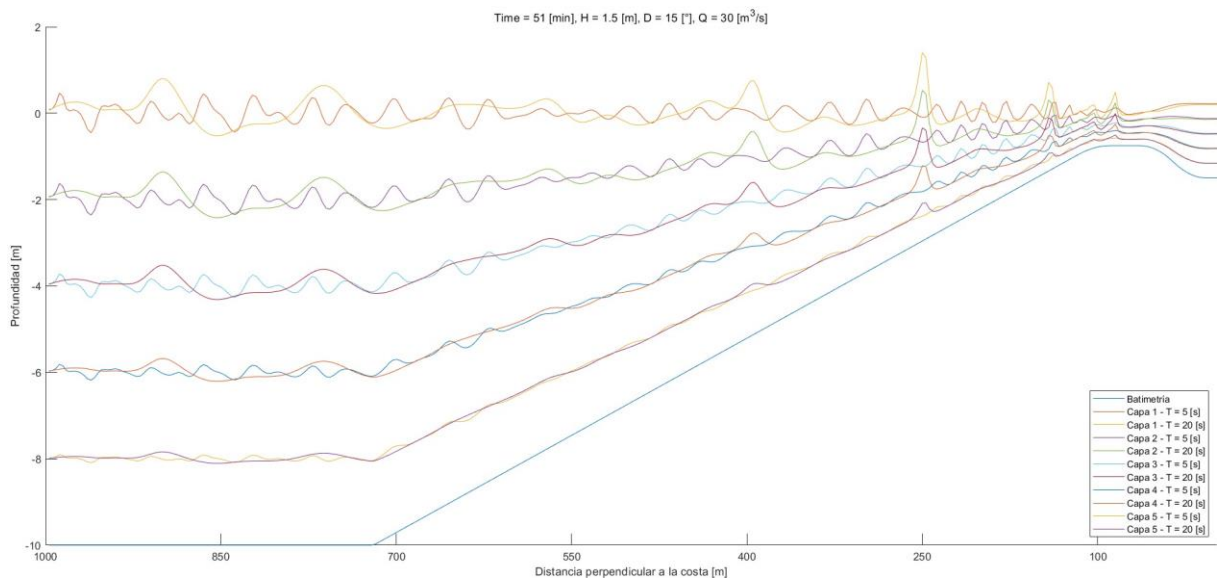


Figura 17: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de periodo del oleaje, incluye la primera y última simulación.

Fuente: Elaboración propia.

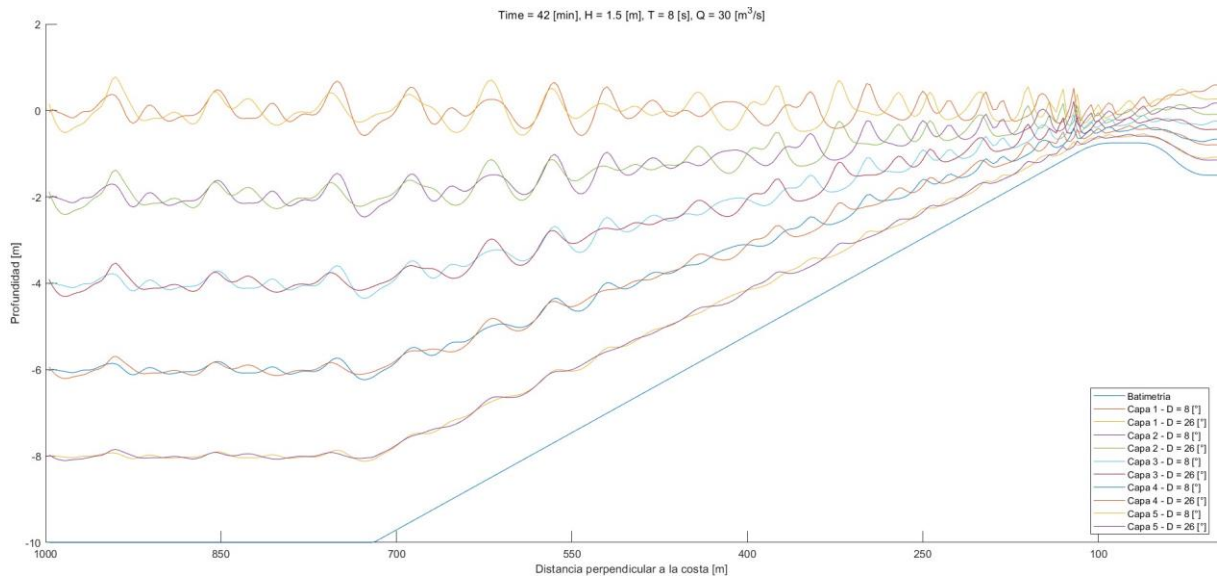


Figura 18: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de dirección del oleaje, incluye la primera y última simulación.

Fuente: Elaboración propia.

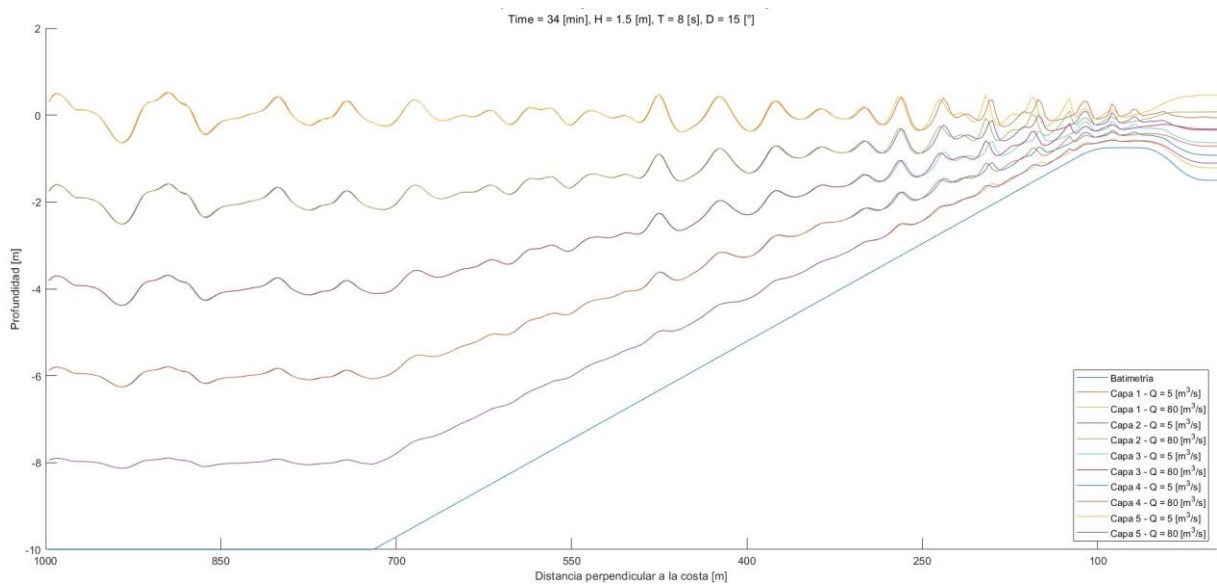


Figura 19: Batimetría idealizada y visualización de capas del modelo SWASH con espectro de oleaje involucrado en variación de caudal de salida del río, incluye la primera y última simulación.

Fuente: Elaboración propia.

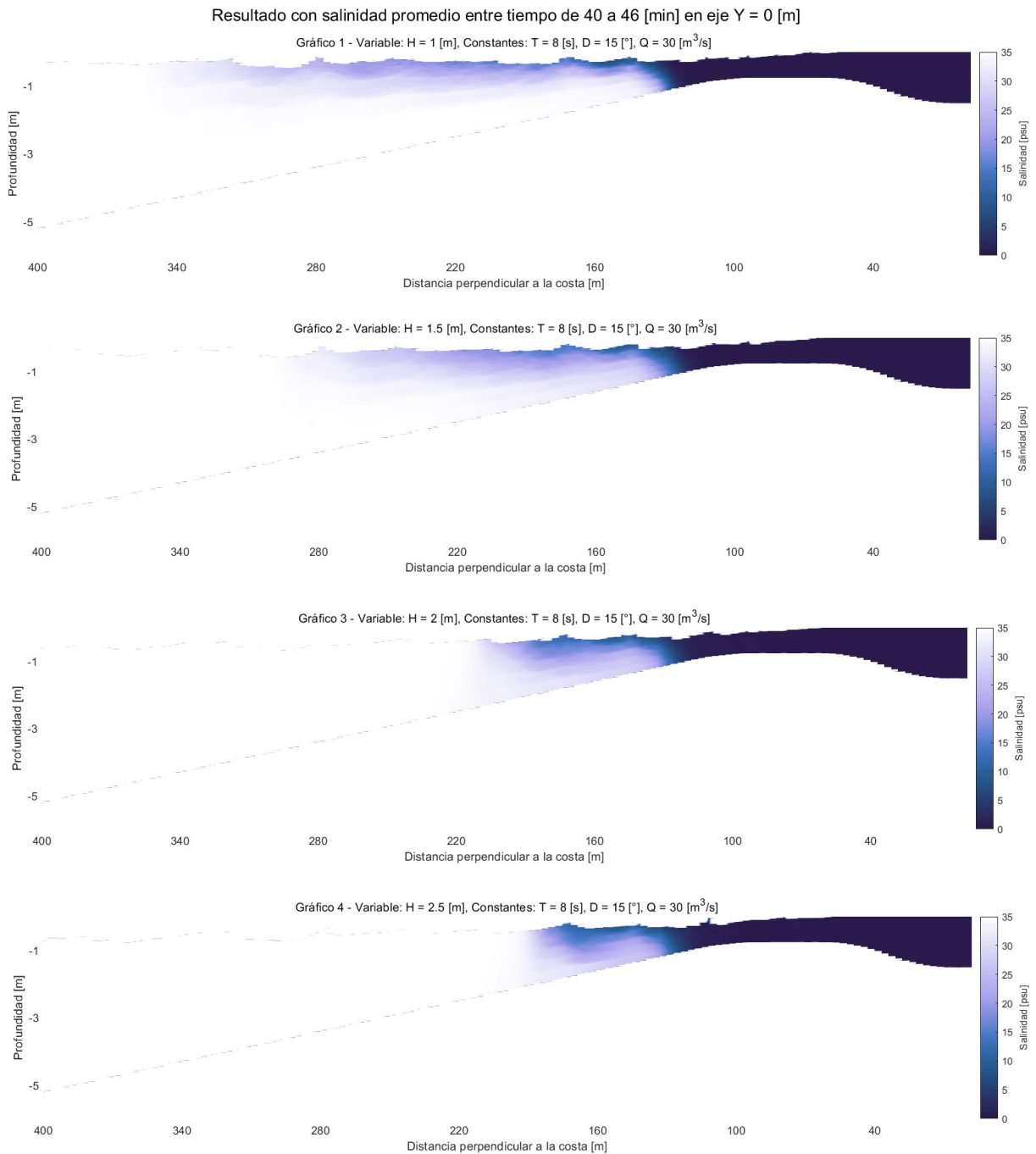
A continuación, se ilustran los resultados de la mezcla de una pluma de río en el mar sobre las simulaciones presentadas en la Tabla 1, el cual abarca la variación de altura, periodo y dirección del oleaje, y variación del caudal de salida del río.

### 5.3.1. Variación de Altura del Oleaje

La Figura 20 ilustra gráficos de mezcla de la pluma a partir del promedio de salinidad de los resultados entre el tiempo de 40 [min] hasta 46 [min] para cada altura del oleaje en posición de 0 [m] del eje Y, es decir, en el centro de la descarga.

Luego, la Tabla 10 muestra los resultados de la distancia perpendicular a la costa en donde se produce el punto de despegue o lift-off para cada simulación entre el tiempo de 40 [min] hasta 46 [min]. También se añade la Tabla 11 que contiene los valores del número de Froude en el punto del inicio de la descarga en donde se determina el régimen de torrente del flujo en el mismo instante de tiempo mencionado anteriormente, calculado a partir de las Ecuaciones ( 1 ), ( 2 ) y ( 3 ). Se destaca que toda la sección transversal del inicio de la desembocadura del río presenta una salinidad de 0 [psu], por lo tanto, arroja el mismo valor de número de Froude en la superficie, medio y fondo.

Además, la Figura 21 toma el valor de altura media del oleaje de 1.5 [m] y se obtienen capturas de la mezcla de la pluma a medida que se desplaza a través del eje Y.



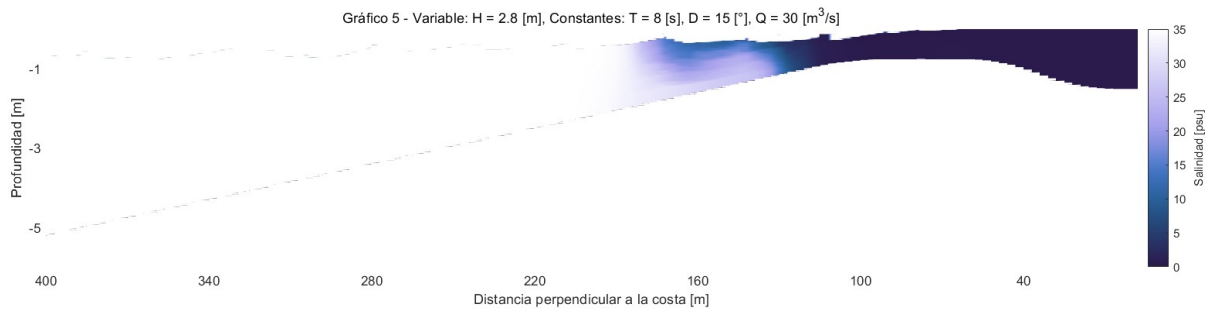


Figura 20: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de altura de oleaje entre el tiempo de simulación de 40 a 46 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación de altura del oleaje, según el sistema coordenado de la Figura 20.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
H [m]	1	1.5	2	2.5	2.8
Distancia del punto de despegue [m]	132	129	129	129	129

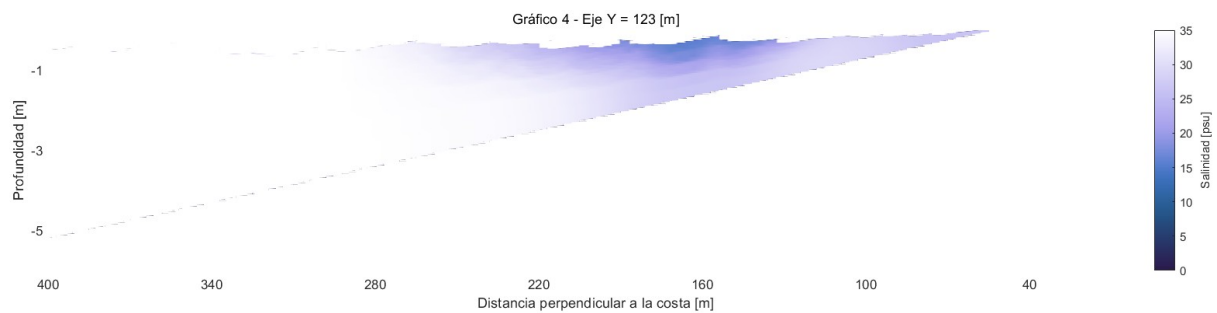
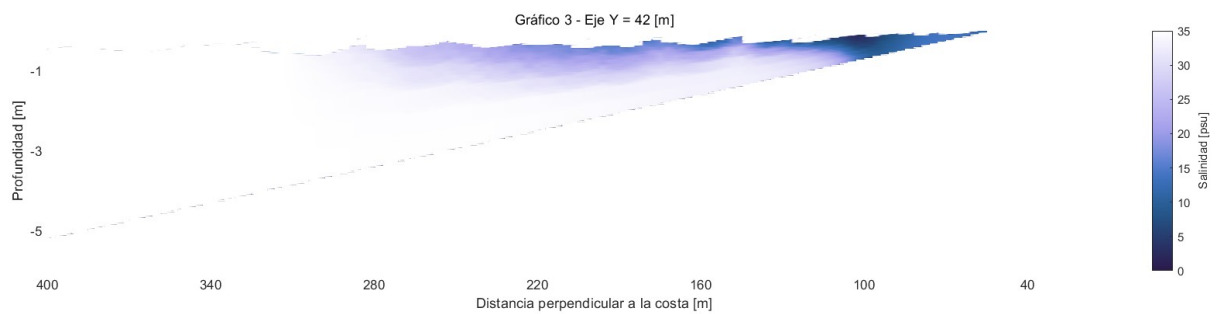
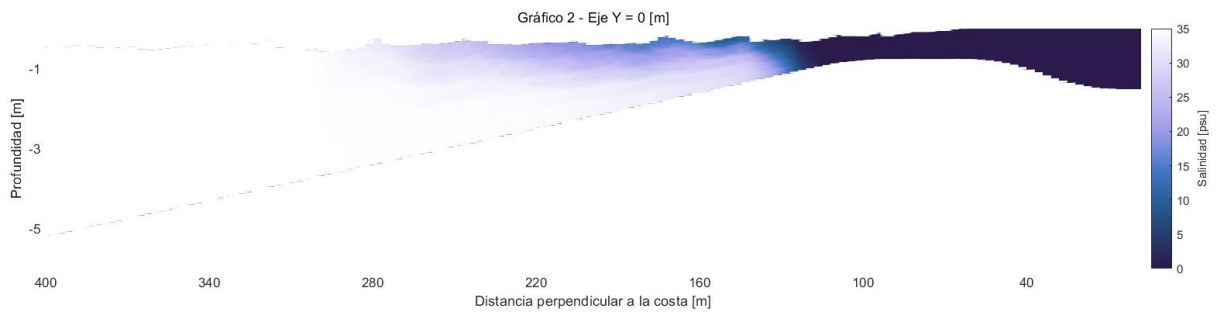
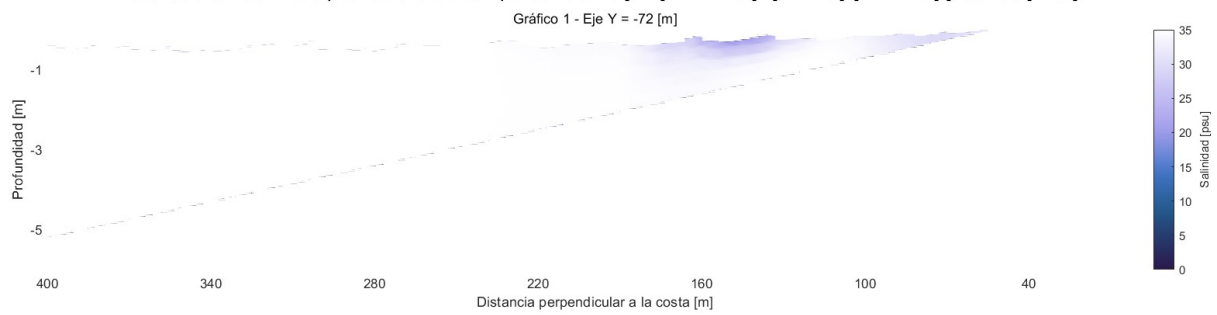
Tabla 11: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación de altura del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
H [m]	1	1.5	2	2.5	2.8
hp [m]	0.84	0.85	0.89	0.87	0.91
v [m/s]	1.56	1.61	1.77	1.82	1.94
S [psu]	0	0	0	0	0
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12

$\Delta\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90
$g'$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Fr [-]	3.42	3.51	3.77	3.91	4.08
Tipo de escurrimiento	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 40 a 46 [min] - H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



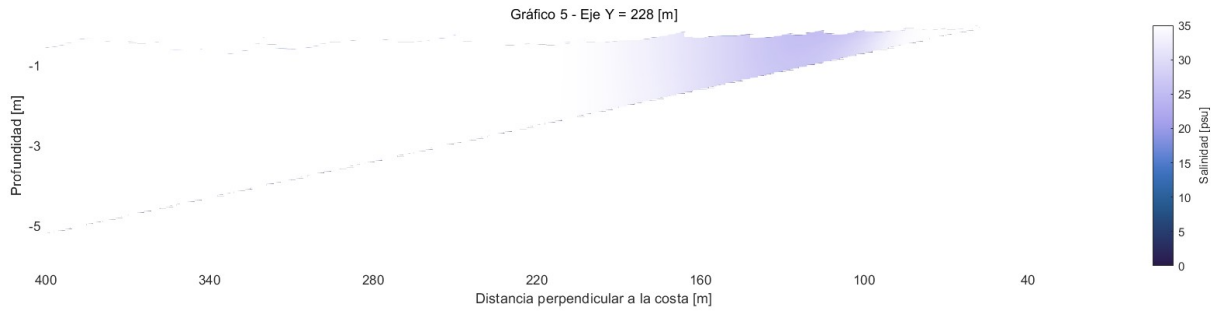


Figura 21: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje medio de 1.5 [m].

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2. Variación de Periodo del Oleaje

En la Figura 22 se muestran gráficos de mezcla de la pluma a partir del promedio de salinidad de los resultados entre el tiempo de 45 [min] hasta 51 [min] para cada periodo del oleaje ubicado en 0 [m] del eje Y, es decir, en el centro de la descarga.

Luego, la Tabla 12 muestra los resultados de la distancia perpendicular a la costa en donde se produce el punto de despegue o lift-off para cada simulación entre el tiempo de 45 [min] hasta 51 [min]. Y la Tabla 13 contiene los valores del número de Froude en el punto del inicio de la descarga en donde se determina el régimen de torrente del flujo en el mismo instante de tiempo mencionado anteriormente, calculado a partir de las Ecuaciones ( 1 ), ( 2 ) y ( 3 ). Se destaca que toda la sección transversal del inicio de la desembocadura del río presenta una salinidad de 0 [psu], por lo tanto, arroja el mismo valor de número de Froude en la superficie, medio y fondo.

Además, la Figura 23 toma el valor de periodo de 12 [s] y se obtienen capturas de la mezcla de la pluma a medida que se desplaza a través del eje Y.

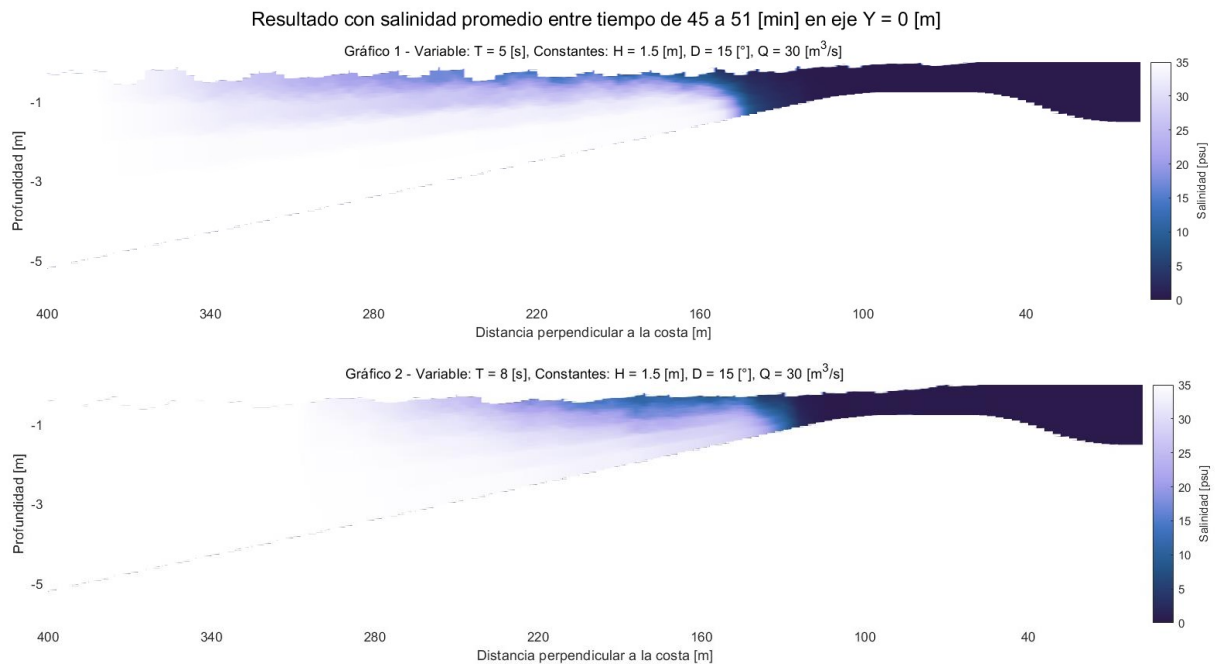




Figura 22: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de periodo de oleaje entre el tiempo de simulación de 45 a 51 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación del periodo del oleaje, según el sistema coordenado de la Figura 22.

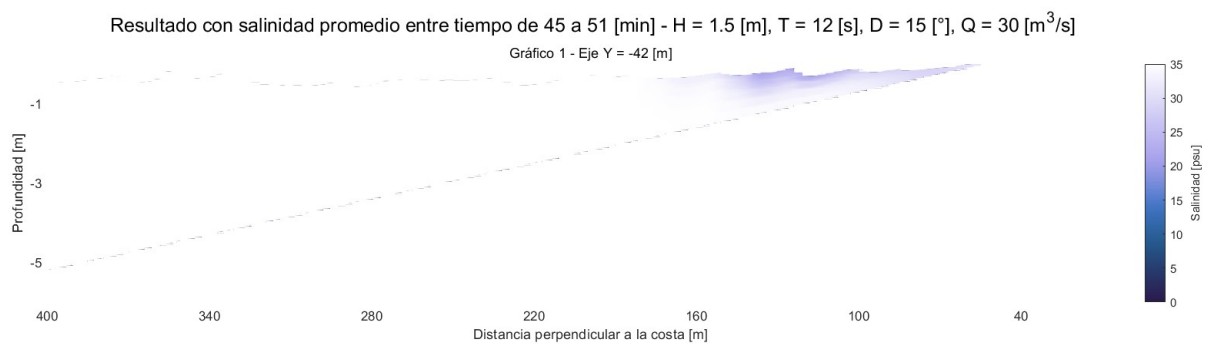
Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
T [s]	5	8	12	16	20
Distancia del punto de despegue [m]	144	132	132	126	129

Tabla 13: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación del periodo del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
T [s]	5	8	12	16	20
hp [m]	0.86	0.85	0.84	0.87	0.84
v [m/s]	1.60	1.79	1.80	1.71	1.75
S [psu]	0	0	0	0	0
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12
$\Delta\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90
$g'$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Fr [-]	3.47	3.91	3.95	3.67	3.83
Tipo de escurrimiento	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente



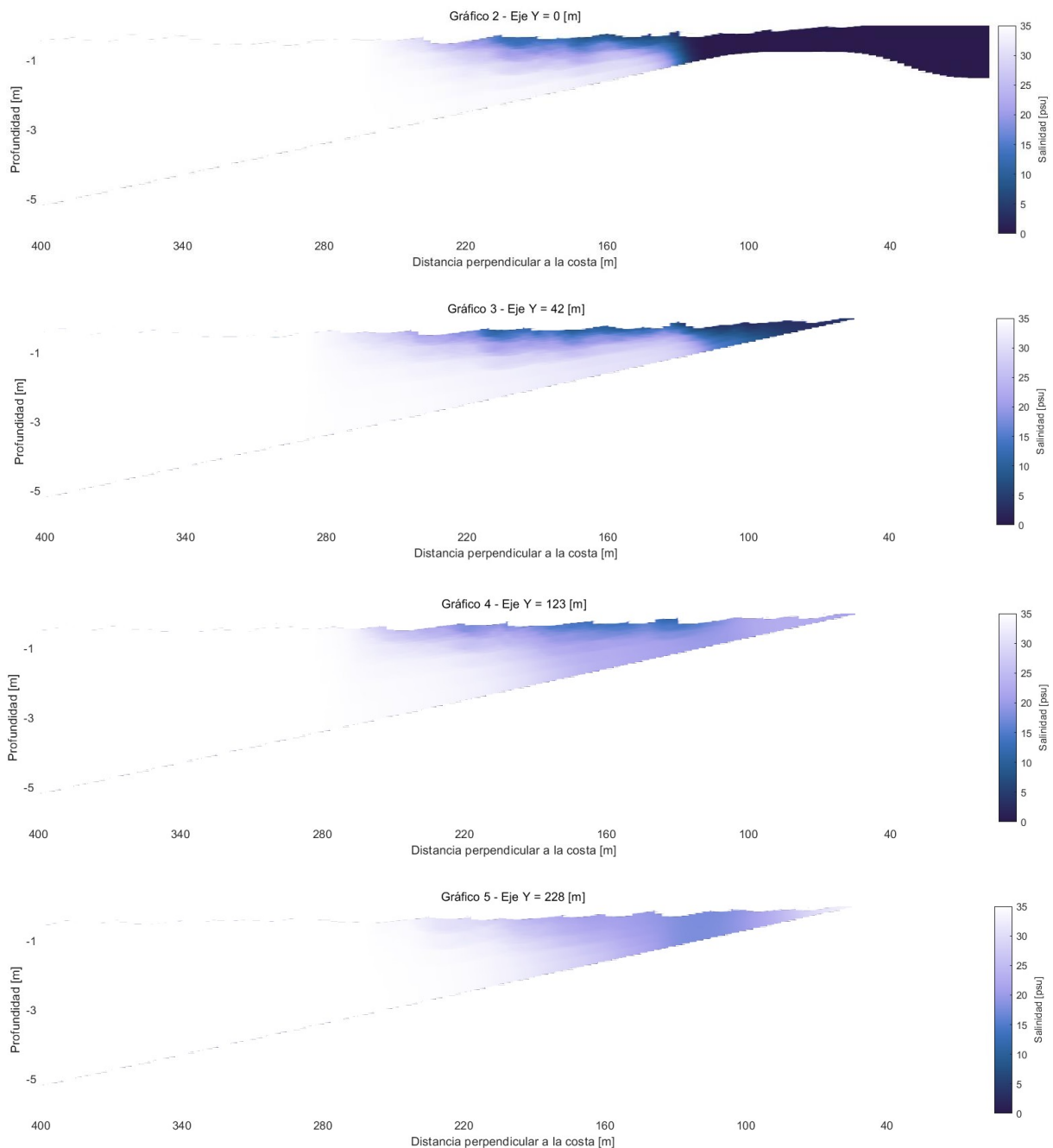


Figura 23: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 12 [s].

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3. Variación de Dirección del Oleaje

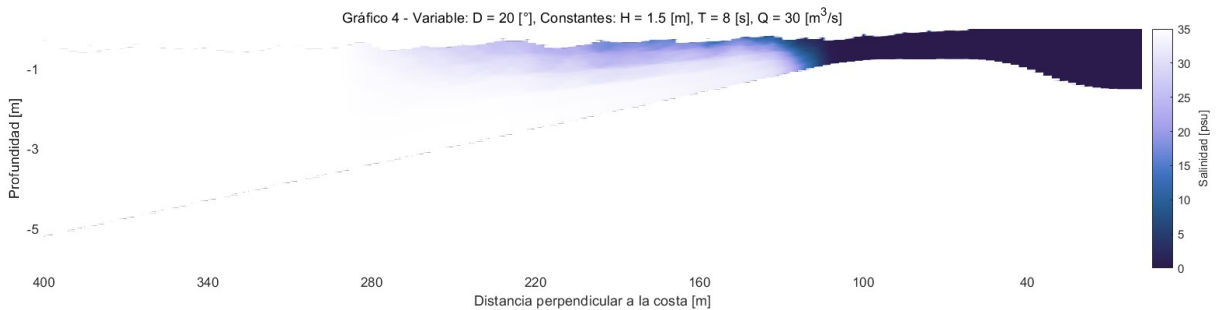
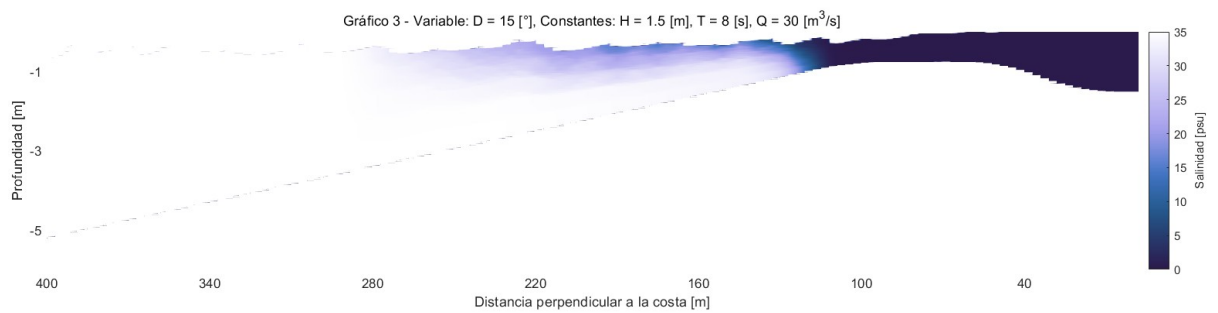
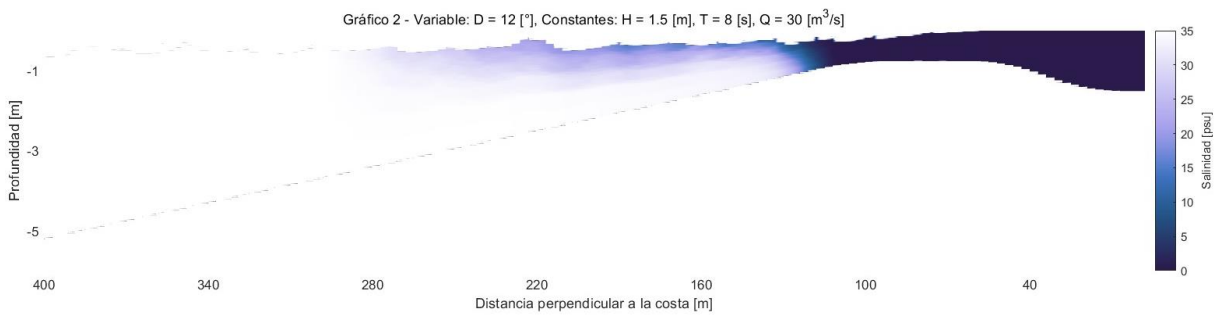
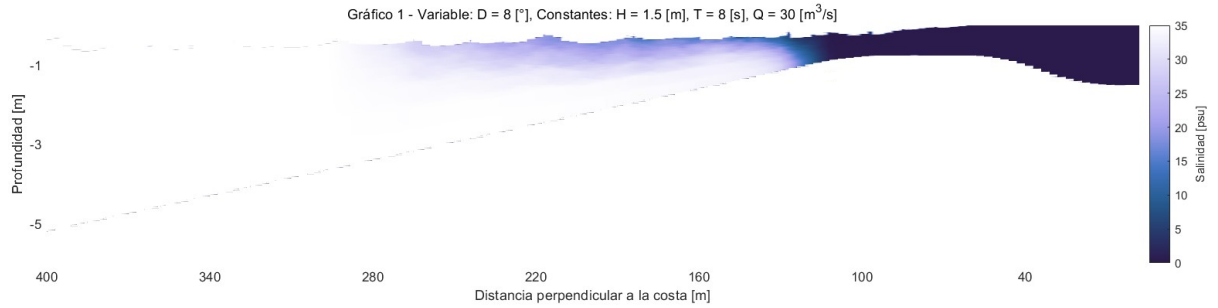
La Figura 24 ilustra gráficos de mezcla de la pluma a partir del promedio de salinidad de los resultados entre el tiempo de 36 [min] hasta 42 [min] para cada dirección del oleaje en posición de 0 [m] del eje Y, es decir, en el centro de la descarga.

Luego, la Tabla 14 muestra los resultados de la distancia perpendicular a la costa en donde se produce el punto de despegue o lift-off para cada simulación entre el tiempo de 36 [min] hasta 42 [min]. Y la Tabla 15 contiene los valores del número de Froude en el punto del inicio de la descarga en donde se determina el régimen de torrente del flujo en el mismo instante de tiempo mencionado anteriormente,

calculado a partir de las Ecuaciones ( 1 ), ( 2 ) y ( 3 ). Se destaca que toda la sección transversal del inicio de la desembocadura del río presenta una salinidad de 0 [psu], por lo tanto, arroja el mismo valor de número de Froude en la superficie, medio y fondo.

Además, la Figura 25 toma el valor de dirección de 12 [°] y se obtienen capturas de la mezcla de la pluma a medida que se desplaza a través del eje Y.

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 36 a 42 [min] en eje Y = 0 [m]



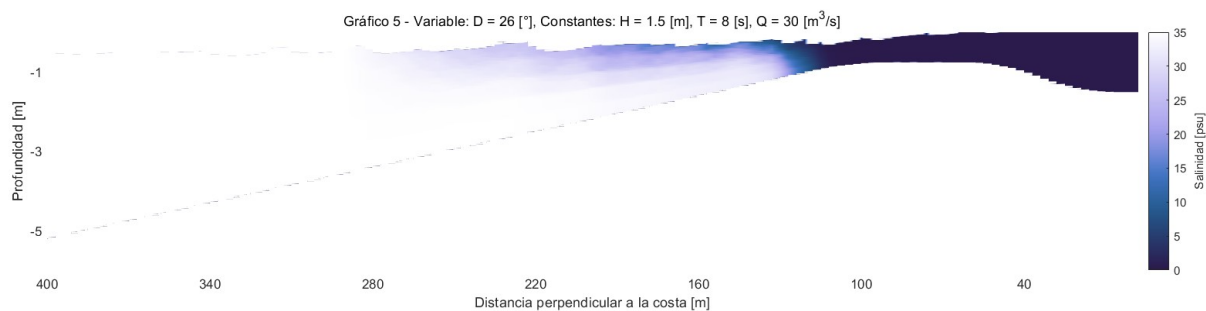


Figura 24: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de dirección de oleaje entre el tiempo de simulación de 36 a 42 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación de dirección del oleaje, según el sistema coordenado de la Figura 24.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
D [°]	8	12	15	20	26
Distancia del punto de despegue [m]	123	123	123	123	126

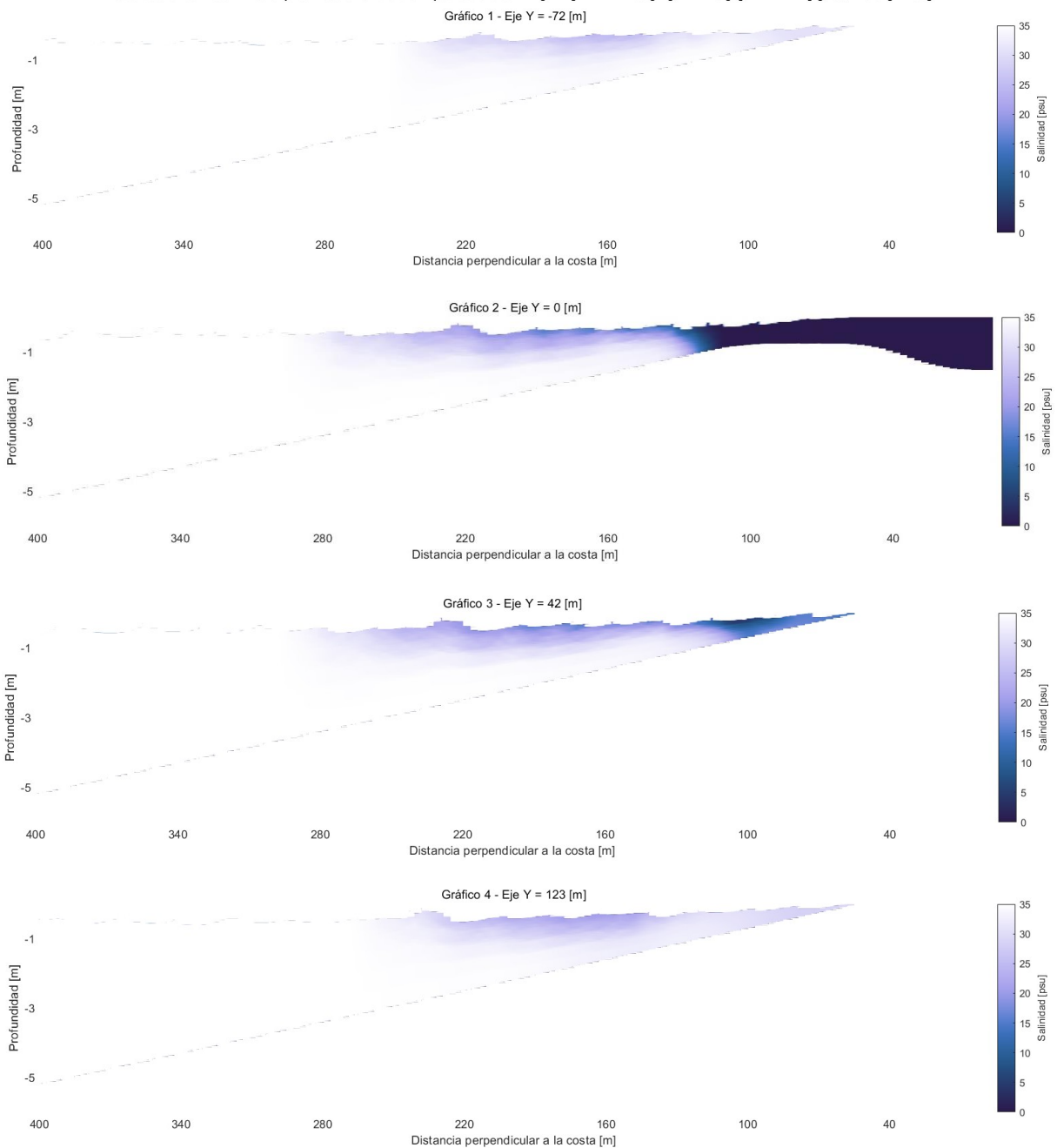
Tabla 15: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación de dirección del oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5
D [°]	8	12	15	20	26
hp [m]	0.83	0.83	0.80	0.82	0.82
v [m/s]	1.33	1.26	1.17	0.94	0.89
S [psu]	0	0	0	0	0
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12

$\Delta\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	25.90	25.90	25.90	25.90	25.90
$g'$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Fr [-]	2.92	2.78	2.63	2.10	1.97
Tipo de escurrimiento	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 36 a 42 [min] - H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 12 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



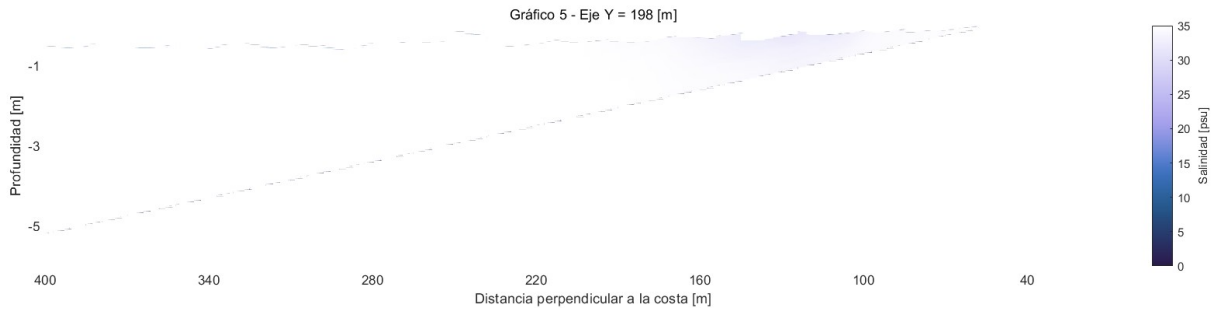


Figura 25: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de  $12 [^\circ]$ .

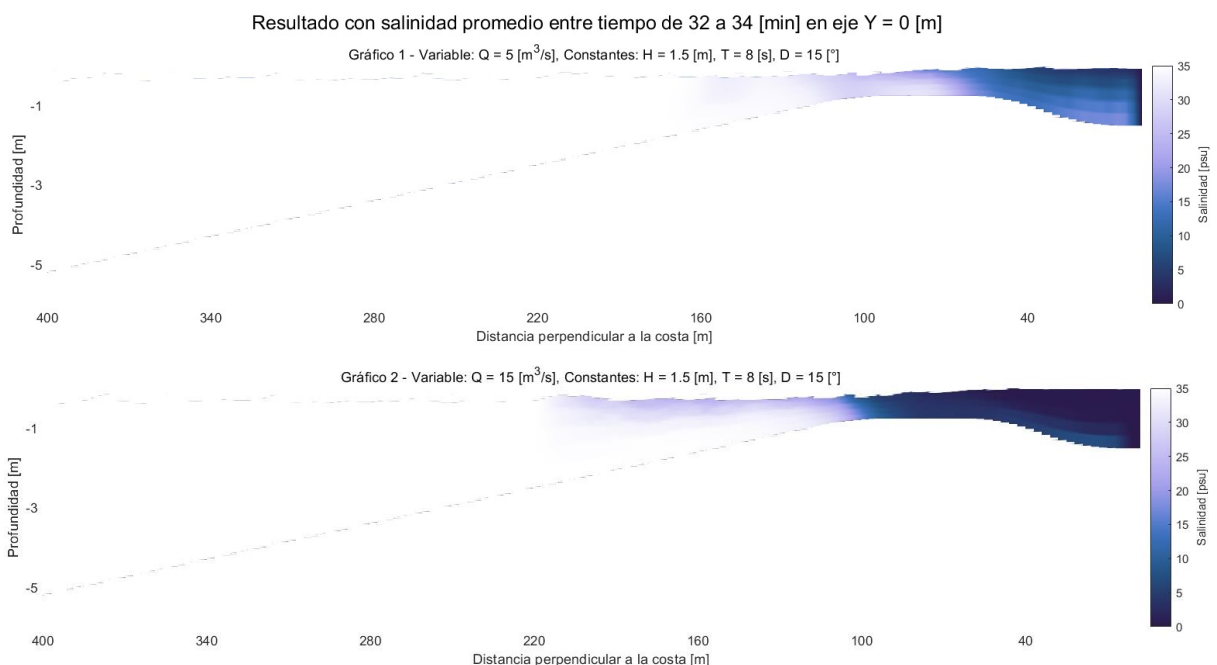
Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4. Variación de Caudal de Salida del Río

En la Figura 26 se muestran gráficos de mezcla de la pluma a partir del promedio de salinidad de los resultados entre el tiempo de 32 [min] hasta 34 [min] para cada caudal de salida del río al mar, ubicado en 0 [m] del eje Y.

Luego, la Tabla 16 muestra los resultados de la distancia perpendicular a la costa en donde se produce el punto de despegue o lift-off para cada simulación entre el tiempo de 32 [min] hasta 34 [min]. Y la Tabla 17 contiene los valores del número de Froude en el punto del inicio de la descarga en donde se determina el régimen de río para la primera simulación y de torrente para las otras cinco simulaciones que presentan un mayor caudal, calculado a partir de las Ecuaciones ( 1 ), ( 2 ) y ( 3 ) en el mismo instante de tiempo mencionado anteriormente. Se destaca que toda la sección transversal del inicio de la desembocadura presenta una salinidad variable para las primeras dos simulaciones de variación de caudal, por lo que se presentarán valores diferentes del número de Froude para la superficie, medio y fondo, en cambio, las últimas cuatro simulaciones de variación de caudal contienen una salinidad de 0 [psu] en toda la sección transversal en el punto inicial de la desembocadura del río al mar, lo cual arrojará el mismo valor del número de Froude en la superficie, medio y fondo, para cada simulación de manera respectiva.

Además, la Figura 27 toma el valor de caudal de salida de  $15 [m^3/s]$  y se obtienen capturas de la mezcla de la pluma a medida que se desplaza a través del eje Y.



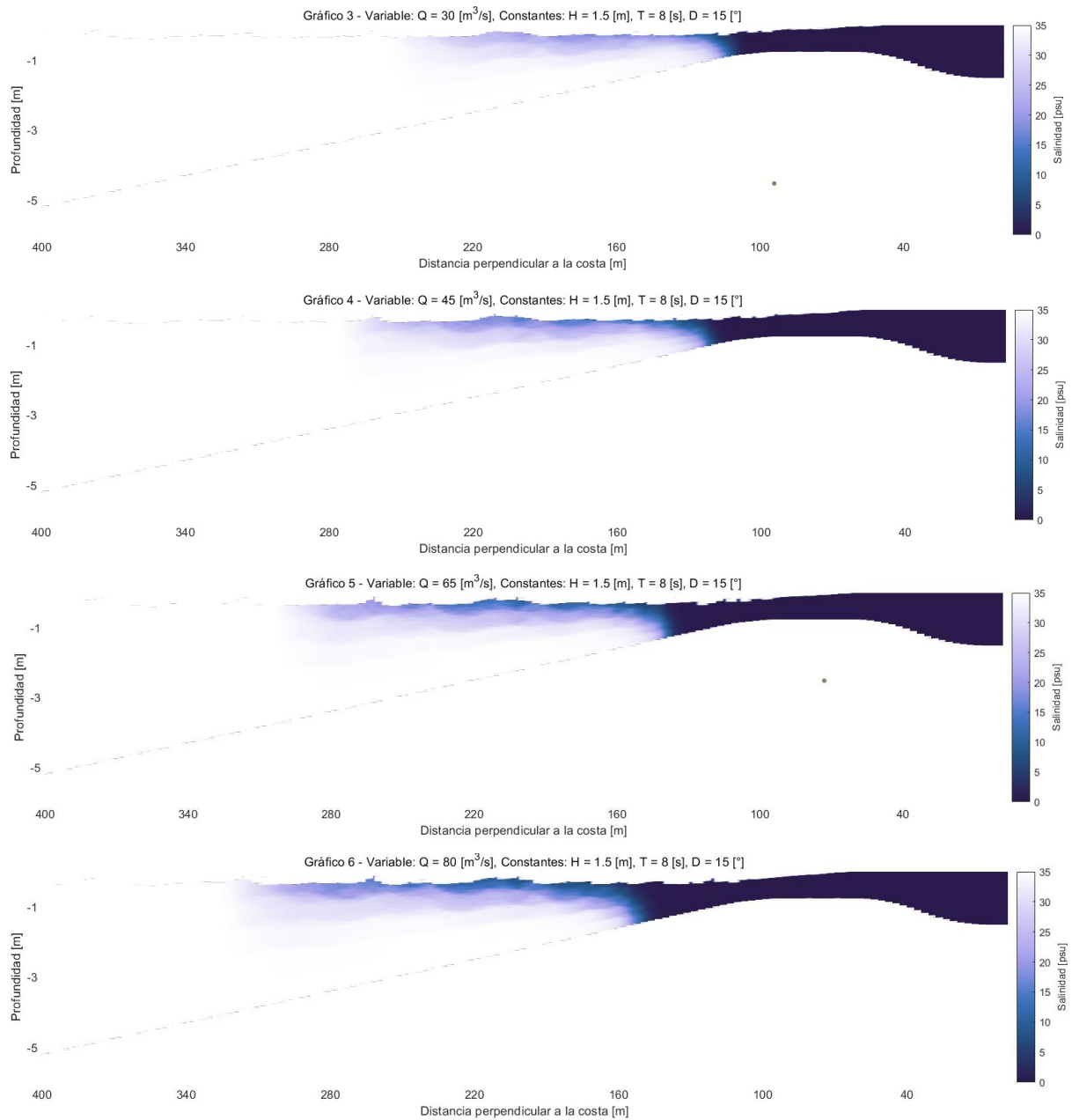


Figura 26: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de caudal de salida del río al mar entre el tiempo de simulación de 32 a 34 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Resultados de la distancia del punto de despegue o lift-off de las simulaciones con variación de caudal de salida del río, según el sistema coordenado de la Figura 26.

Fuente: Elaboración propia.

	Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5	Gráfico 6
$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	5	15	30	45	65	80

Distancia del punto de despegue [m]	63	102	117	126	141	153
-------------------------------------	----	-----	-----	-----	-----	-----

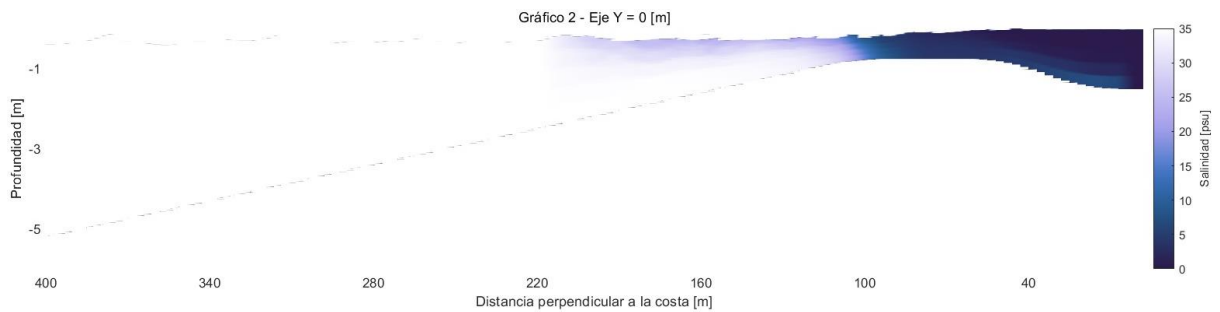
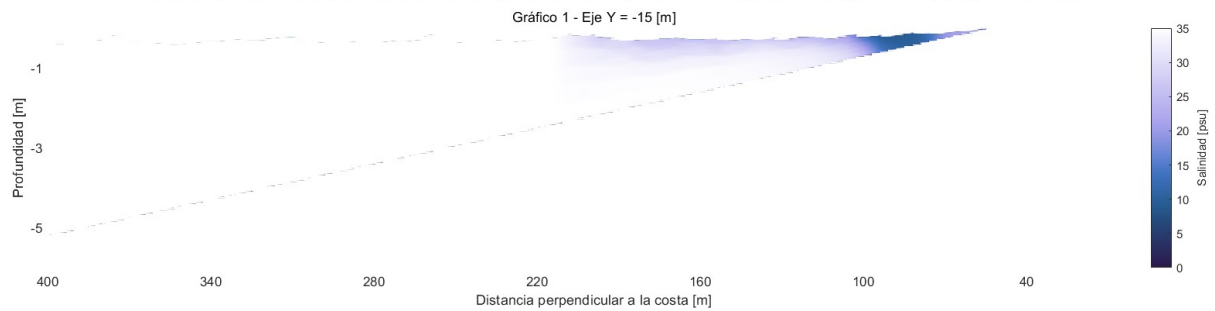
Tabla 17: Tipo de régimen del flujo en la descarga del río al mar a 51 [m] de distancia perpendicular a la costa de las simulaciones con variación de caudal de salida del río.

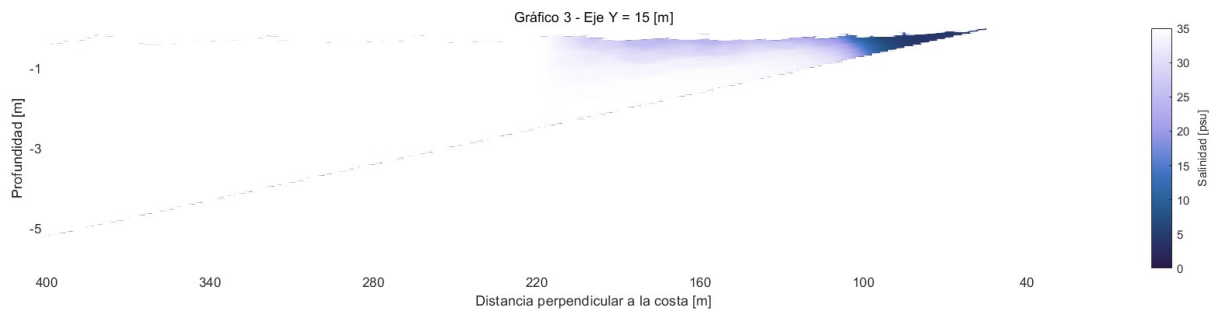
Fuente: Elaboración propia.

		Gráfico 1	Gráfico 2	Gráfico 3	Gráfico 4	Gráfico 5	Gráfico 6
Q [m <sup>3</sup> /s]		5	15	30	45	65	80
hp [m]		0.77	0.81	0.82	0.85	0.84	0.89
v [m/s]		0.13	0.78	1.34	1.72	2.41	2.68
Superficie	S [psu]	5.56	0.03	0	0	0	0
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1004.40	1000.14	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12
	$\Delta\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	21.62	25.88	25.90	25.90	25.90	25.90
	$g'$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.21	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	Fr [-]	0.34	1.73	2.97	3.75	5.28	5.70
	Tipo de escurrimiento	Río	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente
Medio	S [psu]	9.06	1.61	0	0	0	0
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1007.08	1001.36	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12
	$\Delta\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	18.93	24.65	25.90	25.90	25.90	25.90
	$g'$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.18	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25

	Fr [-]	0.36	1.77	2.97	3.75	5.28	5.70
	Tipo de escurrimiento	Río	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente
Fondo	S [psu]	10.29	2.76	0	0	0	0
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1008.02	1002.25	1000.12	1000.12	1000.12	1000.12
	$\Delta\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	18.00	23.77	25.90	25.90	25.90	25.90
	$g'$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.17	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25
	Fr [-]	0.37	1.81	2.97	3.75	5.28	5.70
	Tipo de escurrimiento	Río	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente	Torrente

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 32 a 34 [min] - H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 15 [m<sup>3</sup>/s]





*Figura 27: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un caudal de salida del río al mar de 15 [m<sup>3</sup>/s].*

*Fuente: Elaboración propia.*

## 6. Análisis de Resultados

### 6.1. Tiempo de Simulación

Este estudio considera la ejecución de simulaciones numéricas que contienen datos de salinidad y altura que fueron guardados cada 2 segundos, y poseen una duración total de 60 minutos. A partir de los resultados, se pudo notar que algunas simulaciones no llegaron al tiempo final indicado (ver Tabla 2, Tabla 4, Tabla 6 y Tabla 8) ya que el modelo luego de cierto instante de tiempo arrojó errores en la expulsión de datos que fueron reconocidos al momento de graficar los resultados de la dispersión y mezcla de la pluma del río en el mar. Luego se procedió a acotar los datos correctos para obtener resultados finales. Por ejemplo, la variación de altura del oleaje contiene la simulación número 4 con  $H = 2.5$  [m],  $T = 8$  [s],  $D = 15$  [°] y  $Q = 30$  [m<sup>3</sup>/s] que posee un tiempo máximo de simulación de 46 minutos, en cambio, el resto de las simulaciones de altura del oleaje contiene un tiempo máximo de simulación de 60 minutos, a modo de incluir la simulación 4 en la comparativa de alturas del oleaje, en este caso se realiza en el tiempo máximo permitido de 46 minutos. De la misma forma ocurre para la variación de periodo del oleaje, con la simulación número 3 con  $H = 1.5$  [m],  $T = 12$  [s],  $D = 15$  [°] y  $Q = 30$  [m<sup>3</sup>/s] que tiene un tiempo máximo de simulación de 51 minutos. La variación de dirección del oleaje, con la simulación número 1 con  $H = 1.5$  [m],  $T = 12$  [s],  $D = 8$  [°] y  $Q = 30$  [m<sup>3</sup>/s] que tiene un tiempo máximo de simulación de 42 minutos. Y por último, la variación de caudal de salida, con la simulación número 6 con  $H = 1.5$  [m],  $T = 8$  [s],  $D = 15$  [°] y  $Q = 80$  [m<sup>3</sup>/s] que tiene un tiempo máximo de simulación de 34 minutos.

Se definen estables los tiempos de simulación obtenidos ya que se puede cuantificar la dispersión de la pluma, evaluar perfiles de salinidad y mezcla de la pluma en la zona de rompiente, y establecer los parámetros de mayor influencia en la dispersión y mezcla de la pluma.

Los resultados de comparación entre simulaciones de la dispersión de la pluma fueron obtenidos en un instante de tiempo final determinado a partir de la capa superficial con sus respectivos datos de salinidad. Por otro lado, los resultados de mezcla de la pluma fueron extraídos a partir del promedio de datos de salinidad de los últimos 6 minutos de simulación para la variación de altura, periodo y dirección del oleaje, y para la variación de caudal de salida se tomó un promedio de datos de los últimos 2 minutos, con el fin de suavizar la transición entre capas al momento de graficar.

### 6.2. Caso sin Oleaje

Al realizar la comparación entre el caso sin oleaje de la Figura 6 y el caso con oleaje de la Figura 8, ambos con caudal de 30 [m<sup>3</sup>/s] y tiempo de simulación entre 20 y 60 [min]. El caso sin oleaje alcanza una mayor dispersión de la pluma, teniendo una distancia máxima perpendicular a la costa de 492 [m], en cambio, el caso con oleaje mencionado posee una distancia máxima perpendicular a la costa de 324 [m]. Además, el máximo de estas distancias indicadas para el caso sin oleaje se produce en el centro de la descarga, a diferencia del caso con oleaje señalado que el máximo de la distancia mencionada anteriormente se produce entre los 30 [m] y 75 [m] del eje Y. Por otro lado, el caso sin oleaje presenta simetría y se desarrolla de la misma proporción tanto horizontalmente como verticalmente, mientras que el caso con oleaje no se desarrolla de manera simétrica.

Al analizar la mezcla de la pluma del caso sin oleaje, la Figura 7 indica un punto de despegue o lift-off a 159 [m] de distancia perpendicular a la costa en un tiempo de simulación de 54 a 60 [min]. Además, a partir del número de Froude se determina un escurrimiento de torrente en el inicio de la descarga, en donde se obtuvo el valor de 3.74 [-] ( $Fr > 1$ ) con una altura de río ( $h_p$ ) de aproximadamente 0.84 [m] y velocidad de la capa superior de 1.71 [m/s].

### 6.3. Dispersión y Mezcla de la Pluma en Casos con Oleaje

Se aprecia a nivel general que la mayor concentración de agua dulce se da en la superficie y a la salida del cauce, por ende, ésta irá disminuyendo a medida que se toma distancia del punto señalado anteriormente.

Además, al hacer un análisis individual en el tiempo a partir de las diversas simulaciones presentes en este estudio, se observa que a medida que avanza el tiempo de simulación la pluma se irá desarrollando a lo largo del eje perpendicular y paralelo a la costa. Cada simulación posee un distinto desarrollo dependiendo de sus parámetros (altura, periodo y dirección del oleaje, y caudal de salida del río al mar).

Al hacer un análisis de la comparación entre simulaciones en un instante de tiempo de 20 minutos (ver Figura 36, Figura 40, Figura 44 y Figura 49 en Anexos) no se observan cambios significativos al realizar la variación de altura, periodo y dirección del oleaje, en cambio, sí se aprecian diferencias en intensidad de color al realizar la comparación entre las simulaciones de la variación de caudal de salida, a medida que aumenta el caudal se observa un crecimiento en la intensidad del color azul que indica una mayor concentración de agua dulce.

Los resultados obtenidos de la Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 que representan la batimetría idealizada y visualización de las cinco capas del modelo en SWASH que incluye espectro del oleaje (oleaje irregular) proyectan movimientos disminuyen en tamaño al descender debajo de la superficie. Además, que el movimiento presentado por las ondas irregulares es netamente dependiente de los valores de amplitud, periodo y dirección del oleaje. La Figura 16 contiene el espectro de las olas para una variación de altura del oleaje ( $H$ ) de 1 y 2.8 [m] en el tiempo de 46 [min], en donde se observa una mayor amplitud de la onda para cuando la altura del oleaje es más grande. La Figura 17 ilustra el espectro de las olas para una variación de periodo del oleaje ( $T$ ) de 5 y 20 [s] en el tiempo de 51 [min], allí se puede visualizar una mayor distancia horizontal entre crestas y valles de las ondas cuando el valor de  $T$  es mayor. La Figura 18 presenta el espectro de las olas para una variación de dirección del oleaje ( $D$ ) de 8 y 26 [°] en el tiempo de 42 [min], en el cual se puede ver una diferencia tanto en la amplitud como en la longitud de onda, esto se debe a la proyección ya que la imagen fue obtenida en el eje X-Z de manera perpendicular a la costa en la descarga de la pluma. Por último, la Figura 19 presenta el espectro del oleaje ante cambios en el caudal de salida ( $Q$ ) de 5 y 80 [m<sup>3</sup>/s] en el tiempo de 34 [min], en donde se aprecia una misma onda irregular en la zona donde no hay influencia del caudal y una leve variación en la zona donde sí influye el caudal de salida (el movimiento de la onda se desplaza a la izquierda a medida que aumenta el caudal de salida).

#### 6.3.1. Altura del Oleaje

Analizando la Figura 8 se tiene que en los primeros 40 minutos de simulación ocurre el desarrollo de la distancia perpendicular y paralelo a la costa de manera ovalada, siendo mayor el primero mencionado. Luego, desde el tiempo de 40 minutos hasta los 60 minutos el desarrollo de la dispersión vertical en el eje Y (paralelo a la costa) toma fuerza.

A medida que se aumenta la altura del oleaje, la dispersión de la pluma disminuye de manera respectiva. Esto se demuestra con los resultados de la Figura 9 y Tabla 3, los cuales indican una distancia máxima perpendicular a la costa de dispersión de la pluma de 366 [m] en la simulación 1 con una altura del oleaje de 1 [m], de manera posterior en la simulación 5 con una altura del oleaje de 2.8 [m] se tiene una distancia máxima perpendicular a la costa de dispersión de la pluma de 240 [m]. Se aprecia una reducción de la pluma en el eje X de 126 [m].

Por otra parte, la Tabla 3 muestra el inicio en el eje Y del valor máximo de la dispersión de la pluma perpendicular a la costa, el cual se va desplazando en sentido positivo a medida que se aumenta la altura del oleaje. En la simulación 1 el valor máximo indicado da inicio en la ubicación -3 [m] del eje Y, y en la simulación 5 inicia a los 102 [m] del eje Y, ambos con respecto a la salida del cauce. Además, se observa que la distancia máxima paralela a la costa también se desplaza en positivo del eje Y.

Posteriormente, al analizar la mezcla (ver Figura 20 y Figura 21) se deduce que, al aumentar la altura del oleaje disminuye la dispersión en el eje X, y el agua dulce va a tender a alcanzar de mayor manera la capa del fondo.

En la Tabla 10 se observa que el despegue de la pluma o lift-off no se ve afectado por la variación de altura del oleaje, este fenómeno se produce a 132 [m] de distancia perpendicular a la costa en la descarga de la pluma para la primera simulación y a 129 [m] en las simulaciones restantes, por lo que se desprecia su influencia.

Por último, en la Tabla 11 se determina un escurrimiento de torrente en el inicio de la descarga del río a partir del número de Froude, en donde se llegaron a valores desde 3.42 [-] hasta 4.08 [-] ( $Fr > 1$ ) con una altura de río (hp) de aproximadamente 0.87 [m] y velocidades de la capa superior que fluctúan entre 1.56 [m/s] a 1.94 [m/s].

### **6.3.2. Periodo del Oleaje**

Examinando la Figura 10 en los primeros 35 minutos de simulación se desarrolla la distancia perpendicular y paralela a la costa de forma ovalada, siendo mayor el primero mencionado. Después, desde el tiempo de 35 minutos hasta los 60 minutos el desarrollo de la dispersión vertical en el eje Y (paralelo a la costa) toma fuerza.

Al ver la Figura 11 y Tabla 5 no se distingue una relación directa entre el aumento o disminución del periodo con la distancia máxima del eje X e Y. La dispersión perpendicular a la costa decrece desde el periodo de 5 [s] con una distancia de 390 [m] hasta los 12 [s] con una distancia de 300 [m], y luego aumenta la dispersión hasta los 20 [s] de periodo del oleaje con una distancia de 312 [m].

Analizando la mezcla (ver Figura 22 y Figura 23) se observa que la intensidad del color de la mezcla entre agua dulce y salado depende de cuan extenso esté la distancia de la dispersión perpendicular a la costa, mientras más pequeño se tendrá un mayor alcance de concentración de agua dulce con el fondo.

En la Tabla 12 se observa que el despegue de la pluma o lift-off no se ve afectado por la variación de periodo del oleaje, este fenómeno se produce a 144 [m] de distancia perpendicular a la costa en la descarga de la pluma en la primera simulación, en 132 [m] en la segunda y tercera simulación, 126 [m] en la cuarta simulación y 129 [m] en la quinta simulación, por lo que no se ve una dependencia directa entre el despegue con el valor del periodo del oleaje, por lo que se desprecia su influencia.

Por último, en la Tabla 13 se determina un escurrimiento de torrente en el inicio de la descarga del río a partir del número de Froude, en donde se llegaron a valores desde 3.47 [-] hasta 3.95 [-] ( $Fr > 1$ ) con una altura de río (hp) de aproximadamente 0.85 [m] y velocidades de la capa superior que fluctúan entre 1.60 [m/s] a 1.80 [m/s].

### **6.3.3. Dirección del Oleaje**

Observando la Figura 12 se tiene que en los primeros 40 minutos de simulación ocurre el desarrollo de la distancia perpendicular y paralela a la costa de manera ovalada, siendo mayor el primero mencionado. Luego, desde el tiempo de 40 minutos hasta los 60 minutos el desarrollo de la dispersión vertical en el eje Y (paralelo a la costa) toma fuerza.

Según la Figura 13 y Tabla 7, la dirección del oleaje no influye significativamente en la distancia máxima perpendicular a la costa, pero si influye en la coordenada vertical de la distancia máxima perpendicular a la costa, a medida que aumenta la dirección del oleaje, el inicio de la distancia máxima del eje X se va desplazando en sentido positivo del eje Y, además va enlazado con el aumento de la distancia en el eje Y mientras se aumenta la dirección del oleaje.

A nivel comparativo en los resultados de mezcla (ver Figura 24 y Figura 25), estos indican que no hay cambios a nivel vertical.

En la Tabla 14 se observa que el despegue de la pluma o lift-off no se ve afectado por la variación de dirección del oleaje, este fenómeno se produce a 126 [m] de distancia perpendicular a la costa en la descarga de la pluma para la última simulación y a 123 [m] en las primeras simulaciones, por lo que se desprecia su influencia.

Por último, en la Tabla 15 se determina un escurrimiento de torrente en el inicio de la descarga del río a partir del número de Froude, en donde se llegaron a valores desde 1.97 [-] hasta 2.92 [-] ( $Fr > 1$ ) con una altura de río (hp) de aproximadamente 0.82 [m] y velocidades de la capa superior que fluctúan entre 0.89 [m/s] a 1.33 [m/s].

#### **6.3.4. Caudal de Salida**

Analizando la Figura 14 se tiene que en los primeros 40 minutos de simulación ocurre el desarrollo de la distancia perpendicular y paralelo a la costa de manera ovalada, siendo mayor el primero mencionado. Luego, desde el tiempo de 40 minutos hasta los 60 minutos el desarrollo de la dispersión vertical en el eje Y (paralelo a la costa) toma fuerza.

Según la Figura 15, si aumenta el caudal de salida del río al mar se logra un aumento en la dispersión a nivel paralelo y perpendicular de la costa, junto al incremento del color azul que indica la existencia de agua dulce. La distancia máxima del eje X recorre desde los 180 [m] hasta 333 [m] desde la simulación 1 a la 6, respectivamente. Esta variable no influye en la ubicación del máximo desplazamiento del eje X a lo largo del eje Y. Además, se identifica una relación entre la dispersión del eje X e Y, mientras más disperso sea en el eje X menos va a ser en el eje Y, y viceversa.

Posteriormente, al analizar la mezcla (ver Figura 26 y Figura 27) se deduce que al aumentar el caudal de salida aumenta la dispersión de la pluma y disminuye la concentración de agua dulce en el fondo ya que la intensidad del color de la mezcla entre agua dulce y salado depende de cuan extensa esté la distancia perpendicular a la costa de la pluma.

En la Tabla 16 se observa que el despegue de la pluma o lift-off se ve afectado significativamente por la variación de caudal de salida del río, desde la primera simulación hasta la sexta simulación que va desde un caudal de 5 [m<sup>3</sup>/s] hasta 80 [m<sup>3</sup>/s] se tiene un despegue de la pluma a 63 [m], 102 [m<sup>3</sup>/s], 117 [m<sup>3</sup>/s], 126 [m<sup>3</sup>/s], 141 [m<sup>3</sup>/s] y 153 [m<sup>3</sup>/s] de distancia perpendicular a la costa, respectivamente. Por ende, a medida que aumenta el caudal el punto de despegue ocurrirá a una mayor distancia perpendicular a la costa.

Por último, en la Tabla 17 a partir del número de Froude se determina un escurrimiento de río para la primera simulación de 5 [m<sup>3</sup>/s] en el inicio de la descarga con una altura del río (hp) de 0.77 [m] y velocidad de la superficie de 0.13 [m/s]. Se calculó el valor de 0.34 [-] ( $Fr < 1$ ) del número de Froude en la superficie, luego se tiene 0.36 [-] ( $Fr < 1$ ) en el nivel medio de la sección transversal del río, y un valor de 0.37 [-] ( $Fr < 1$ ) en el fondo del lecho. Además, se define un escurrimiento de torrente desde la simulación dos hasta la seis en el inicio de la descarga del río a partir del número de Froude ) con una altura de río (hp) de aproximadamente 0.84 [m] y velocidades de la capa superior que fluctúan entre 0.78 [m/s] a 2.68 [m/s], en donde se llegaron a valores de la superficie que rondan desde 1.73 [-] hasta 5.70 [-] ( $Fr > 1$ ), los valores del nivel medio van desde 1.77 [-] hasta 5.70 [-] ( $Fr > 1$ ), y se llegan a valores del fondo del lecho desde 1.81 [-] hasta 5.70 [-] ( $Fr > 1$ ).

Finalmente, según lo presentado en este estudio, se destaca que los parámetros de mayor influencia en la dispersión y mezcla de la pluma son la variación de altura del oleaje y el caudal de salida del río al mar.

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

Se analiza la hidrodinámica y la estructura de flujos costeros de pequeña escala mediante parámetros representativos del proceso de interacción entre el río y el oleaje. El análisis se ejecuta mediante un enfoque de simulación numérica en el cual utiliza un sistema costero simplificado con variadas condiciones de oleaje y caudal de descarga, que permitieron generar una base de datos para su estudio y análisis.

En base a los resultados de las simulaciones numéricas con el modelo SWASH que incorporan datos de salinidad de este trabajo, se crearon códigos en Matlab para llevar la información numérica a gráficos para obtener una mejor visualización de lo que está ocurriendo entre la interacción río-oleaje a partir de los parámetros definidos.

La altura del oleaje y caudal de salida se identifican como los parámetros de mayor influencia en la dispersión y mezcla de la pluma debido a que su magnitud influye directamente con el valor de la distancia máxima perpendicular a la costa de la pluma. Además, se concluye que a menor dispersión de la pluma en el eje perpendicular a la costa habrá una mayor concentración de agua dulce en el fondo, y viceversa, es decir, a mayor altura del oleaje menor será la dispersión de la pluma y la mezcla presentará mayor concentración de agua dulce en la profundidad, y a mayor caudal de salida mayor será la dispersión de la pluma y la mezcla tendrá menor concentración de agua dulce en la profundidad.

También se determina que el caudal de salida es el que influye en la distancia del punto de despegue o lift-off en el inicio de la desembocadura, en otras palabras, a mayor caudal aumentará la distancia perpendicular a la costa del punto de despegue.

Se pueden obtener resultados del tipo de escurrimiento (río o torrente) en el inicio de la desembocadura a partir del número de Froude, en donde la mayoría de las simulaciones ejecutadas presentaron un escurrimiento de torrente, menos la primera simulación de caudal más bajo ( $Q = 5 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ) que resultó presentar escurrimiento de río.

Por otro lado, se concluye con respecto a las dificultades que el fenómeno de la dispersión de una pluma de río pequeña en el mar contiene una baja cantidad de bibliografía, y que la ejecución del modelo SWASH es muy lenta. Por otra parte, las ventajas se basan en que el modelo SWASH es sencillo de implementar, se trata de un modelo robusto que entrega resultados coherentes y acertados.

En base a lo anterior, se recomienda la utilización de un computador potente que pueda estar encendido en todo momento, también se sugiere ajustar las condiciones de borde del modelo para ampliar el tiempo de simulación, e incorporar otros parámetros para tener una mayor cercanía a lo que ocurre en la realidad, por ejemplo, añadir batimetría realista, variación en ancho o profundidad de descarga. Estas recomendaciones pueden ser llevadas a cabo en alguna memoria futura.

## 8. Referencias

- Flores, R., Williams, M., Horner-Devine, A. (2022). *River Plume Modulation by Infragravity Wave Forcing*. Geophysical Research Letters, AGU.
- Fredes, J. (2022). *Modelación Numérica de Descarga de Río en Zona de Rompiente del Oleaje*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/53732>
- G.I.O.C. (2020). *Dinámicas, Volumen 1*. [https://marejadas.uv.cl/educacion/glosario#:~:text=Periodo%20peak%20\(Tp\),a%20un%20estado%20de%20mar](https://marejadas.uv.cl/educacion/glosario#:~:text=Periodo%20peak%20(Tp),a%20un%20estado%20de%20mar)
- Horner-Devine, AR., Kumar, N., & Poggioli, AR., (2020). *River plume liftoff dynamics and surface expressions*. AGU.
- Ingeniería Civil Oceánica, UV. (2022). *Atlas de oleaje de Chile*. <https://oleaje.uv.cl/atlas.html>
- Ingeniería Civil Oceánica, UV. (2022). *Glosario del oleaje*. [https://marejadas.uv.cl/educacion/glosario#:~:text=Periodo%20peak%20\(Tp\),a%20un%20estado%20de%20mar](https://marejadas.uv.cl/educacion/glosario#:~:text=Periodo%20peak%20(Tp),a%20un%20estado%20de%20mar)
- Kastner, S., Horner-Devine, A., Thomson, J. (2019). *A Conceptual Model of a River Plume in the Surf Zone*. JGR Oceans, AGU.
- Millero, F., & Poisson, A. (1981). *International one-atmosphere equation of state of seawater*. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. Vol 28, Issue 6, Pages 625–629.
- Olabarrieta, M., Medina, R., & Lomónaco, P. (2005). *Efecto de la interacción ola-corriente en la propagación de la marea en estuarios*. Ingeniería del Agua. [https://www.researchgate.net/publication/39425740\\_Efecto\\_de\\_la\\_interaccion\\_ola-corriente\\_en\\_la\\_propagacion\\_de\\_la\\_marea\\_en\\_estuarios](https://www.researchgate.net/publication/39425740_Efecto_de_la_interaccion_ola-corriente_en_la_propagacion_de_la_marea_en_estuarios)
- Osorio, F., Miranda, O., Hernández, R., Vidal, J., Guerra, S., Pichuntru, C., Oliveros, D., Malhue, N., Díaz, D., & Suazao, K. (2019). *Caracterización de la avifauna en cinco humedales costeros de la provincia de San Antonio*. Ciencias Naturales, 3(2).
- Rodriguez, A., Giddings, S., Kumar, N. (2018). *Impacts of Nearshore Wave-Current Interaction on Transport and Mixing of Small-Scale Buoyant Plumes*. Geophysical Research Letters, AGU.
- Ruano, D., (2017). *Análisis de la variación espacio-temporal de la pluma de sedimentos del río magdalena*. [Tesis de posgrado, Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería.
- Severdrup, H., & Munk, W., (1947). *Wind, sea, and swell: theory of relations for forecasting*. United States Navy Department.
- The SWASH team. (2022). *INDEX SWASH*. [https://swash.sourceforge.io/online\\_doc/swashuse/node75.html](https://swash.sourceforge.io/online_doc/swashuse/node75.html)
- Wong, S. H. C., Monismith, S. G., & Boehm, A. B. (2013). *Simple estimate of entrainment rate of pollutants from a coastal discharge into the surf zone*. Environmental Science and Technology, 47(20), 11554–11561. <https://doi.org/10.1021/es402492f>



```

01_Code: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$*****HEADING*****
$
PROJ 'H15_T08_D15_Q030' '01'
$ Hs=1.5 T=8 Dir=15 Q=30
$
$*****MODEL INPUT*****
$
MODE NONStationary TWOD
COORDinates CARTesian
$
CGRID 0. 0. 0. 999 1200 333 400 REP Y → Grilla
VERT 5
$
INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 333 400 3.0 3.0 → Llama a archivo de batimetría
READINP BOTTOM 1. '02_Bathy.bot' 1 0 FREE
$
INITial ZERO
$
INPTRANS SALINITY 0. 0. 0. 333 400 3.0 3.0 → Llama a archivo de salinidad
READTRANS SALINITY 1. '03_Sali.sal' 1 0 FREE
$
BOU SHAP JON 1.42 SIG PEAK DSPR DEGR
BOU SIDE W BTYPE WEAK SMOO 10 MIN CON SPECT 1.5 8 15 0 1 HR
BOU SEGM XY 999 303 999 321 BTYPE DISCH SMOO 10 MIN CON FOUR -1.42857 = - Q/21
$
VISC H CON 0.001
VISC V KEPS 0.07 0.16
SET BACKVISC 0.0001
TRANSP 0.001
FRIC MANN 0.019
BREAK 0.6 0.3
NONHYDROSTATIC STAndard 1
$
DISCRET UPW MOM
DISCRET UPW WMOM
DISCRET CORRDEP
$
TIMEI METH EXPL 0.01 0.5
$

$***** OUTPUT REQUESTS *****
$

QUANTITY XP YP HEXP 10.

QUANTITY WATL

QUANTITY BOTLEV DUR 60 MIN

QUANTITY VKSIK

QUANTITY VETAK

QUANTITY NHPRESSK

QUANTITY SETUP DUR 60 MIN

QUANTITY HSIG DUR 60 MIN

QUANTITY SALK → Solicita calcular salinidad

QUANTITY TKE

QUANTITY EPS

QUANTITY BRKP

QUANTIYY ZK

```

Figura 30: Parte 1 de Código con ejemplo  $H = 1.5 [m]$ ,  $T = 8 [s]$ ,  $D = 15 [^\circ]$  y  $Q = 30 [m^3/s]$ .

*Fuente: Elaboración propia.*

```
$
GROUP 'OUTPUT' SUBGRID 1 334 1 401|
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '001_X.mat' LAY-OUT 4 XP
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '002_Y.mat' LAY-OUT 4 YP
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '003_ETA.mat' LAY-OUT 4 WATL OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '004_BOTLEV.mat' LAY-OUT 4 BOTLEV
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '005_U.mat' LAY-OUT 4 VKSIK OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '006_V.mat' LAY-OUT 4 VETAK OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '007_NHP.mat' LAY-OUT 4 NHPRESSK OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '008_SETUP.mat' LAY-OUT 4 SETUP OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '009_HS.mat' LAY-OUT 4 HSIG
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '010_SAL.mat' LAY-OUT 4 SALK OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '011_TKE.mat' LAY-OUT 4 TKE OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '012_DIS.mat' LAY-OUT 4 EPS OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '013_BRKP.mat' LAY-OUT 4 BRKP OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '014_ZK.mat' LAY-OUT 4 ZK OUTPUT 002000 2 SEC
BLOCK 'OUTPUT' NOHEAD '015_HK.mat' LAY-OUT 4 HK OUTPUT 002000 2 SEC

$
TEST 1,0
COMPUTE 000000.0 0.05 SEC 010000.0
STOP
```

Output: Archivo  
Matlab con datos  
de salinidad por

*Figura 31: Parte 2 de Código con ejemplo  $H = 1.5 [m]$ ,  $T = 8 [s]$ ,  $D = 15 [^\circ]$  y  $Q = 30 [m^3/s]$ .*

*Fuente: Elaboración propia.*

## 9.2. Resultados Adicionales de Dispersión de la Pluma

### 9.2.1. Variación de Altura del Oleaje

$H = 1.0$  [m],  $T = 8$  [s],  $D = 15$  [°],  $Q = 30$  [m<sup>3</sup>/s]

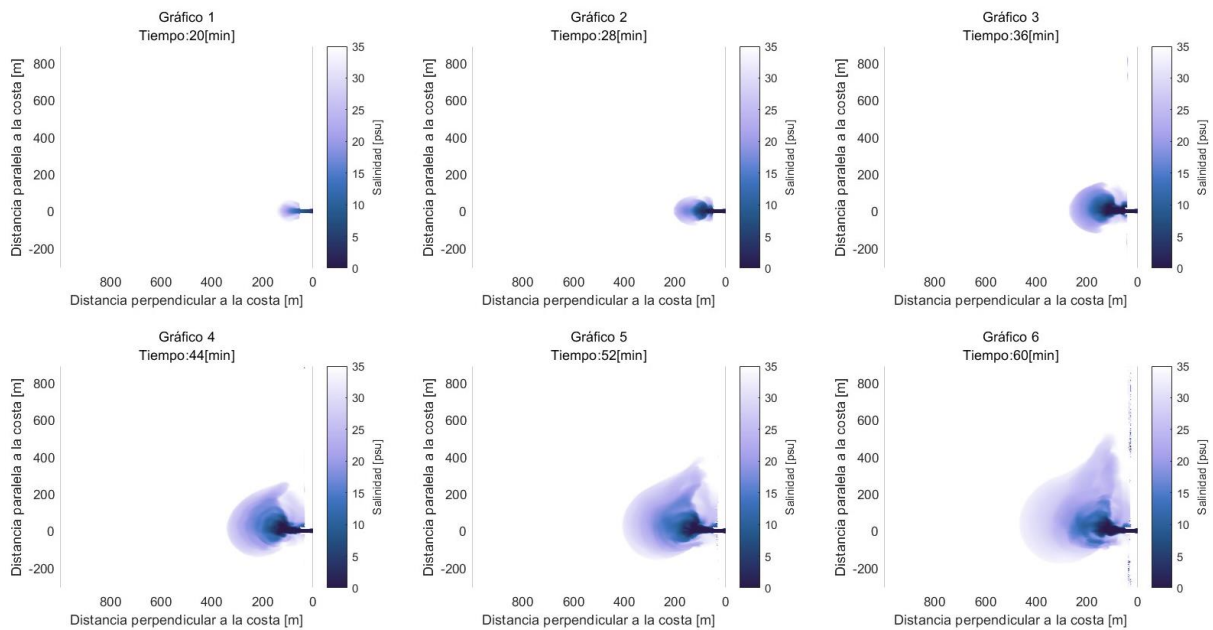


Figura 32: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 1 [m] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

$H = 2.0$  [m],  $T = 8$  [s],  $D = 15$  [°],  $Q = 30$  [m<sup>3</sup>/s]

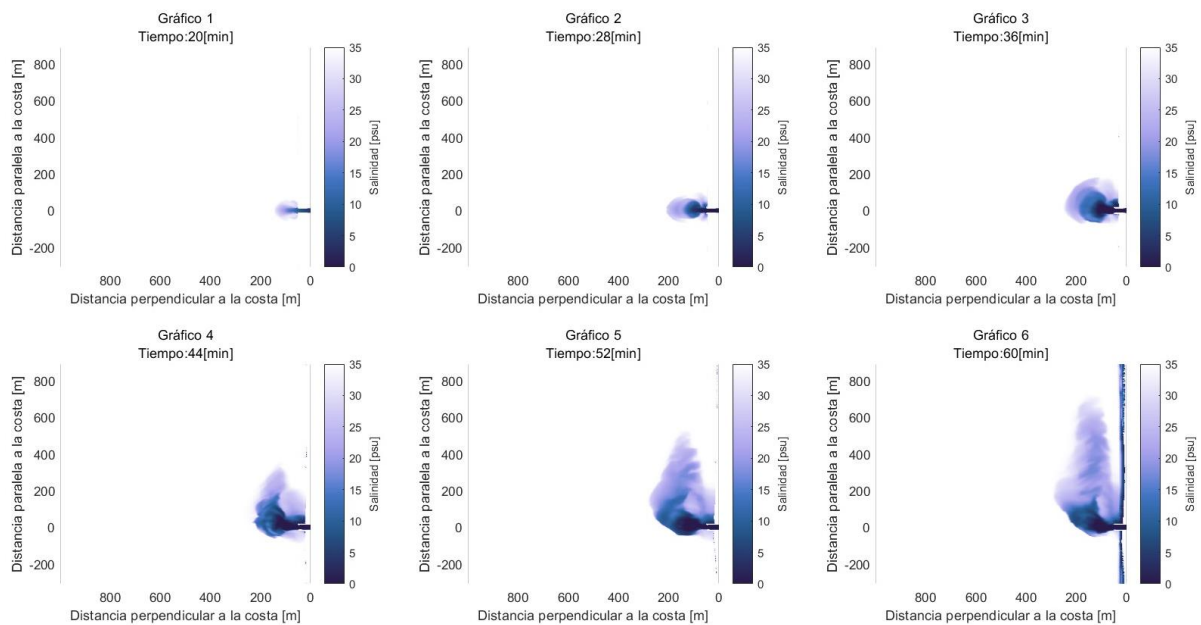


Figura 33: Resultados de la dispersión de la pluma con altura el oleaje de 2 [m] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

H = 2.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]

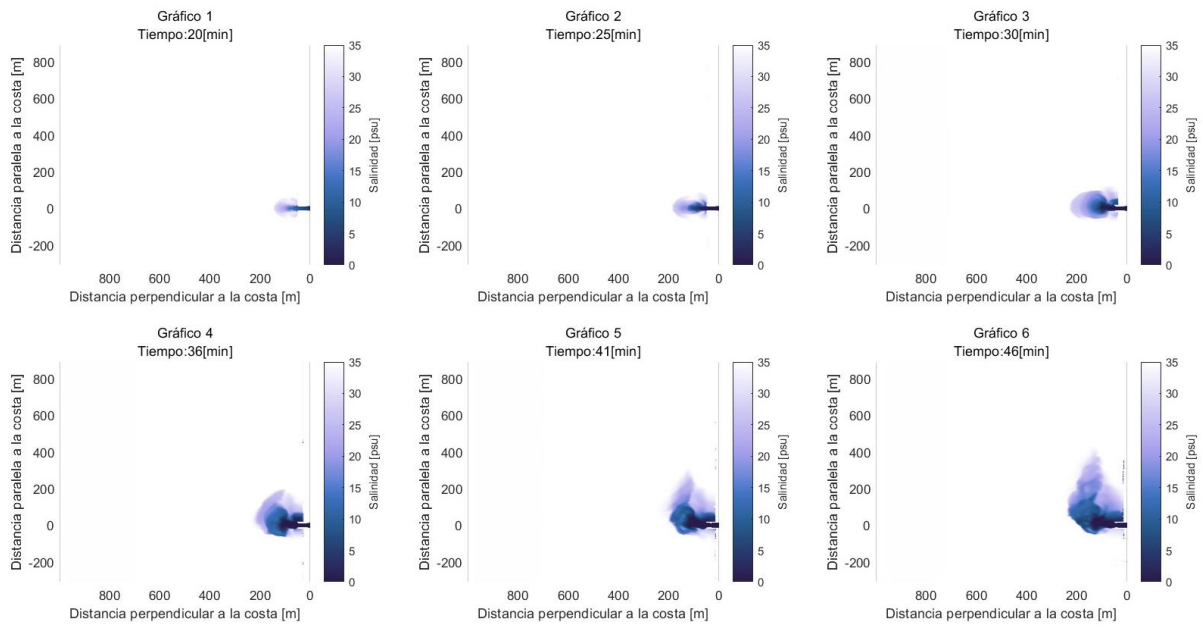


Figura 34: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 2.5 [m] entre 20 y 46 [min].

Fuente: Elaboración propia.

H = 2.8 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]

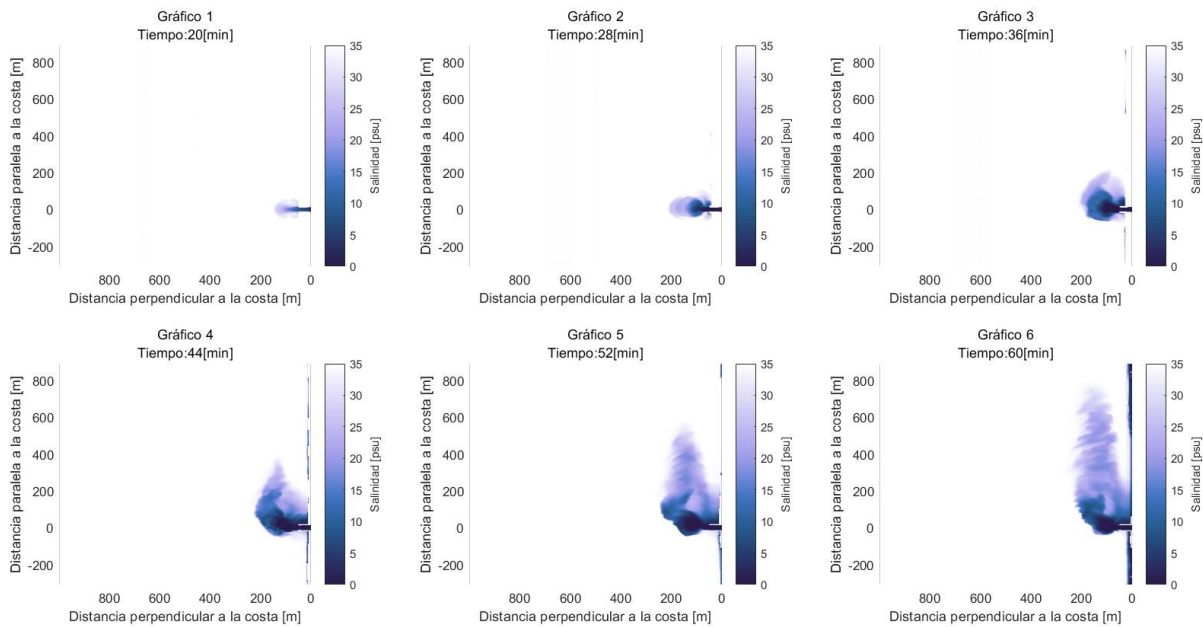


Figura 35: Resultados de dispersión de la pluma con altura de oleaje de 2.8 [m] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

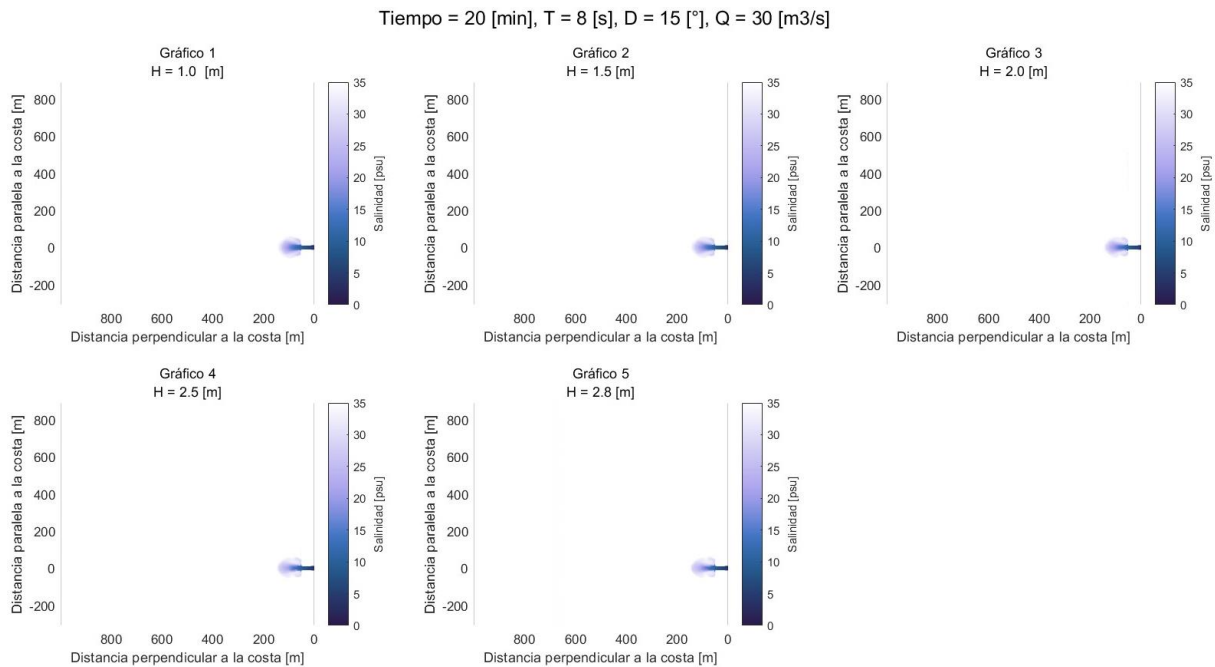


Figura 36: Esquema de comparación de gráficos con variación de altura del oleaje en el tiempo inicial de simulación de 20 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

### 9.2.2. Variación de Periodo del Oleaje

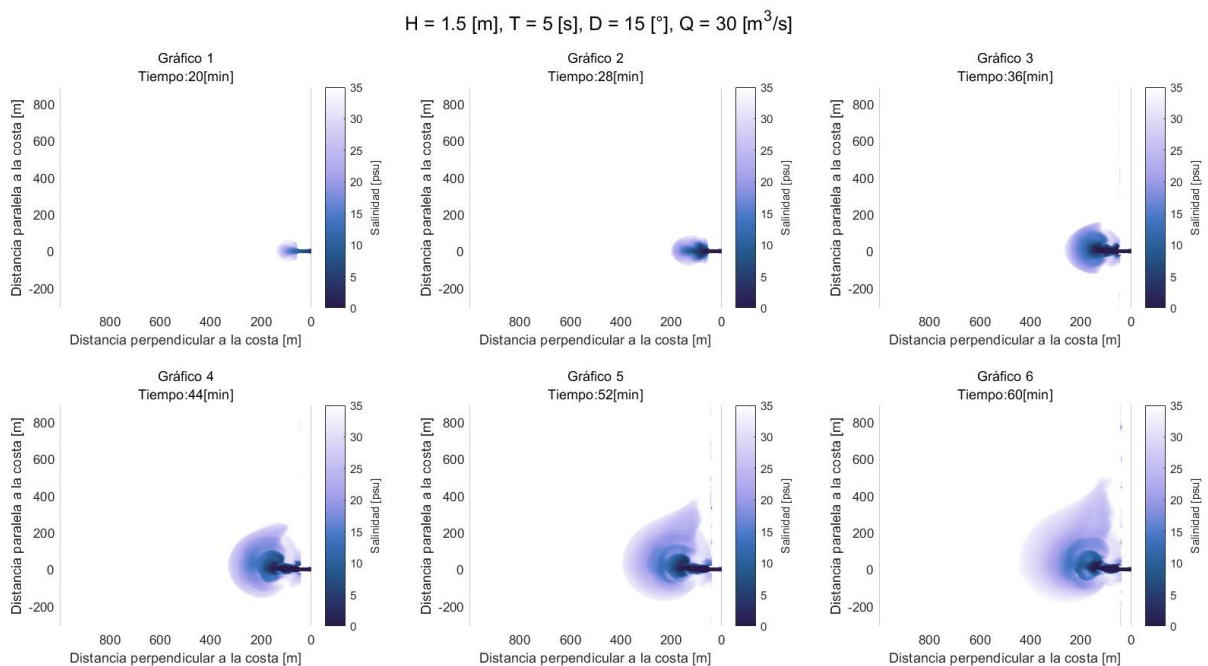


Figura 37: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 5 [s] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

H = 1.5 [m], T = 16 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]

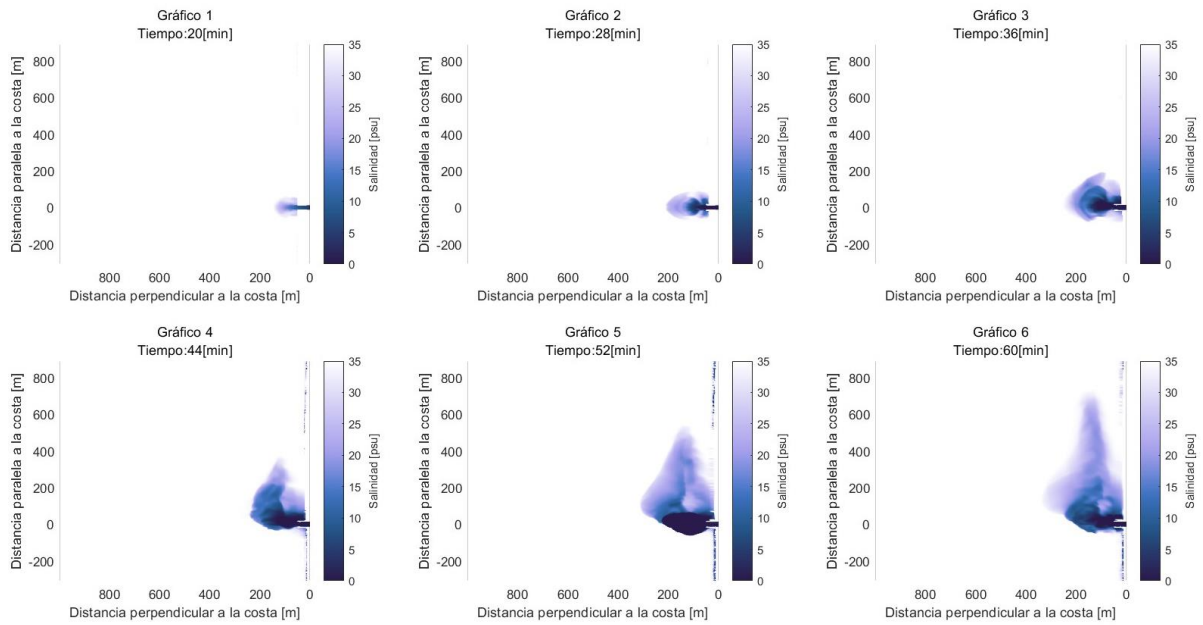


Figura 38: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 16 [s] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

H = 1.5 [m], T = 20 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]

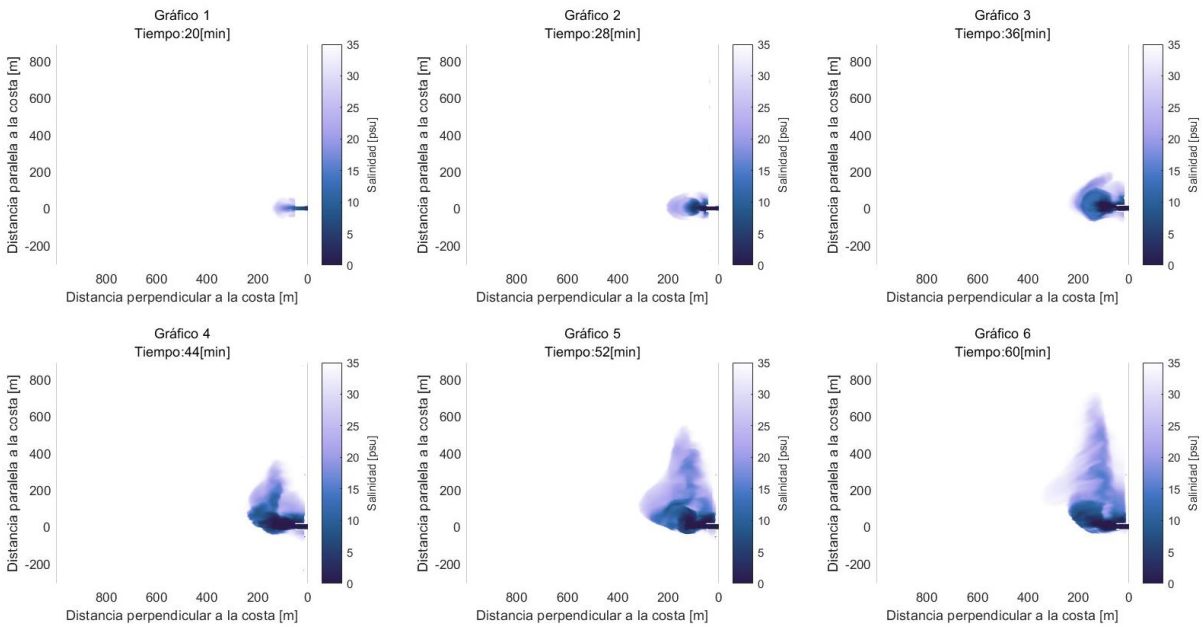


Figura 39: Resultados de dispersión de la pluma con periodo de oleaje de 20 [s] entre 20 y 60 [min].

Fuente: Elaboración propia.

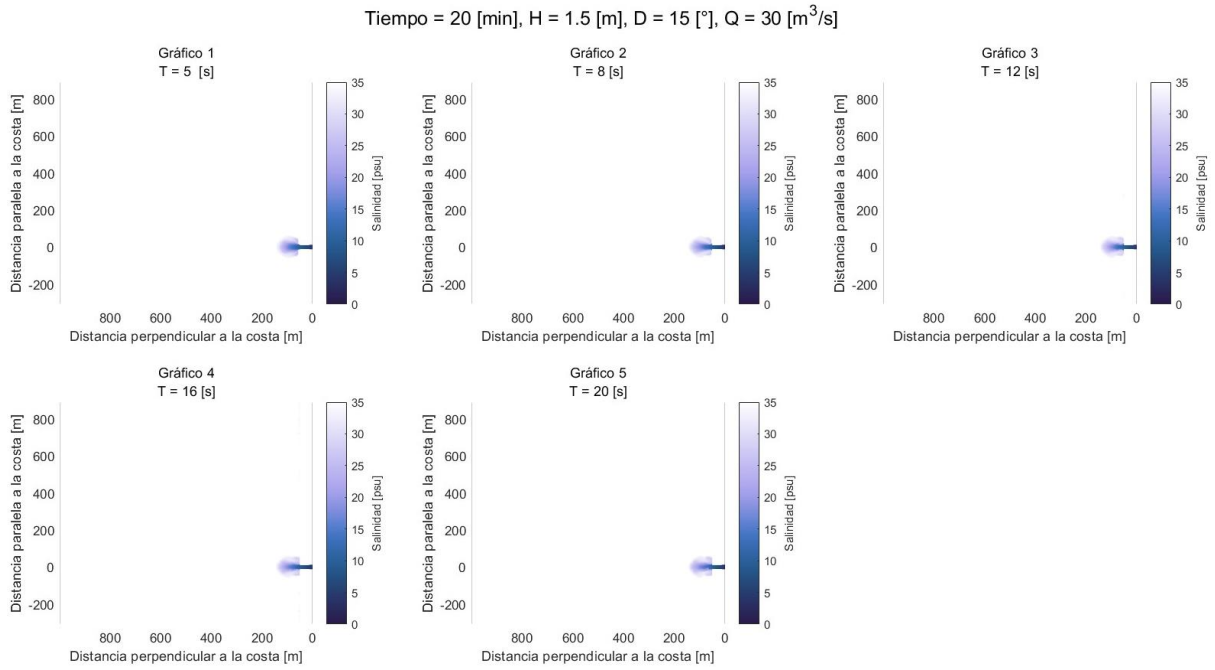


Figura 40: Esquema de comparación de gráficos con variación de periodo del oleaje en el tiempo inicial de simulación de 20 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

### 9.2.3. Variación de Dirección del Oleaje

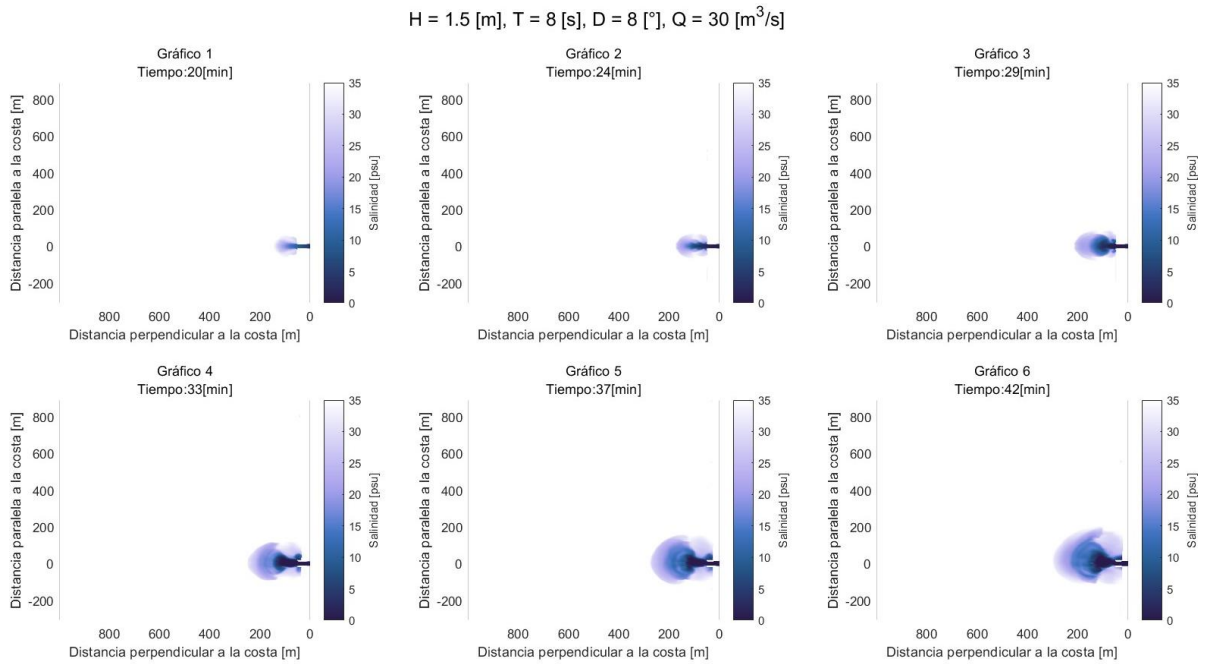
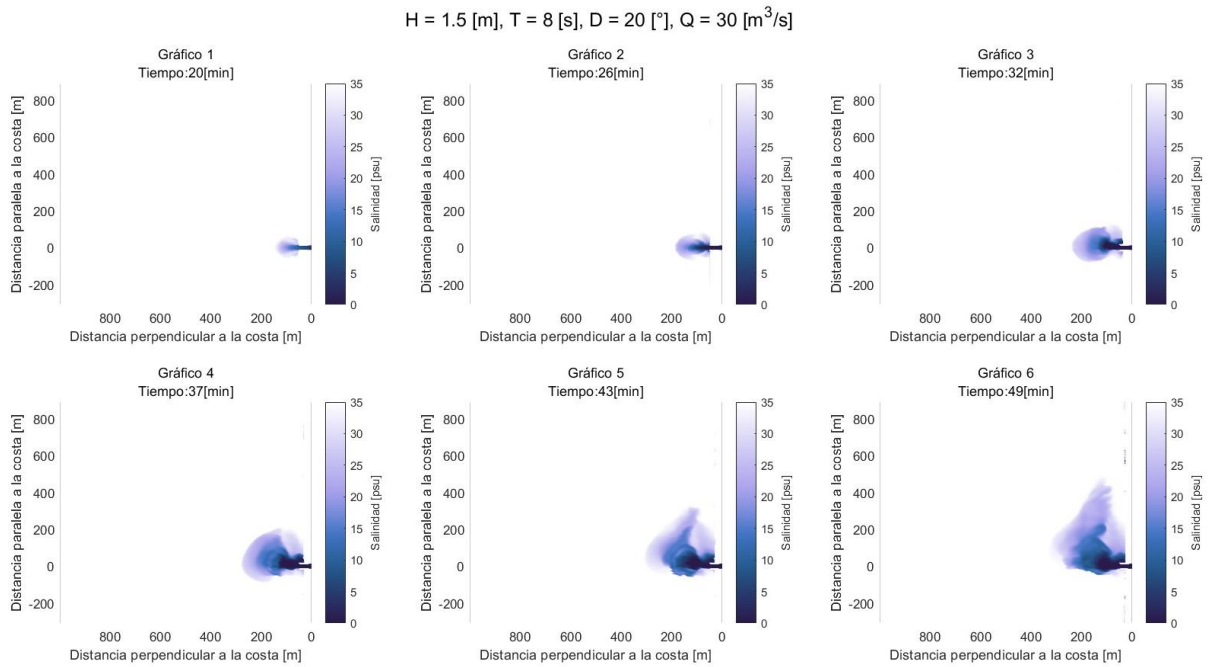


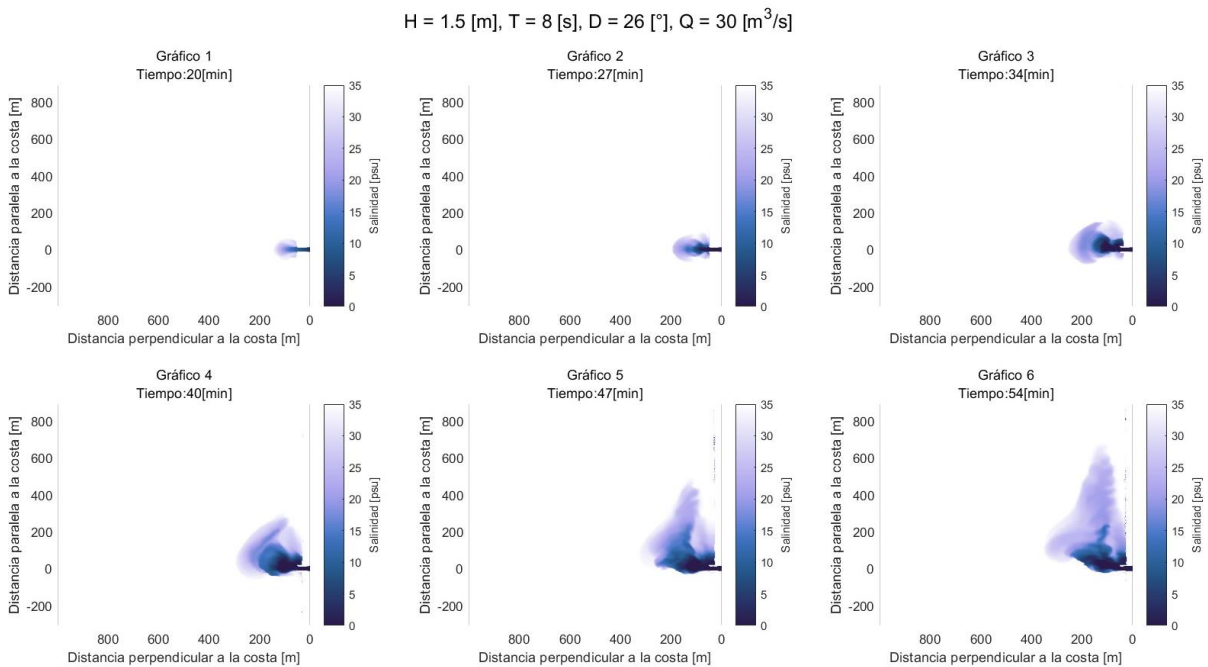
Figura 41: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de 8 [°] entre 20 y 42 [min].

Fuente: Elaboración propia.



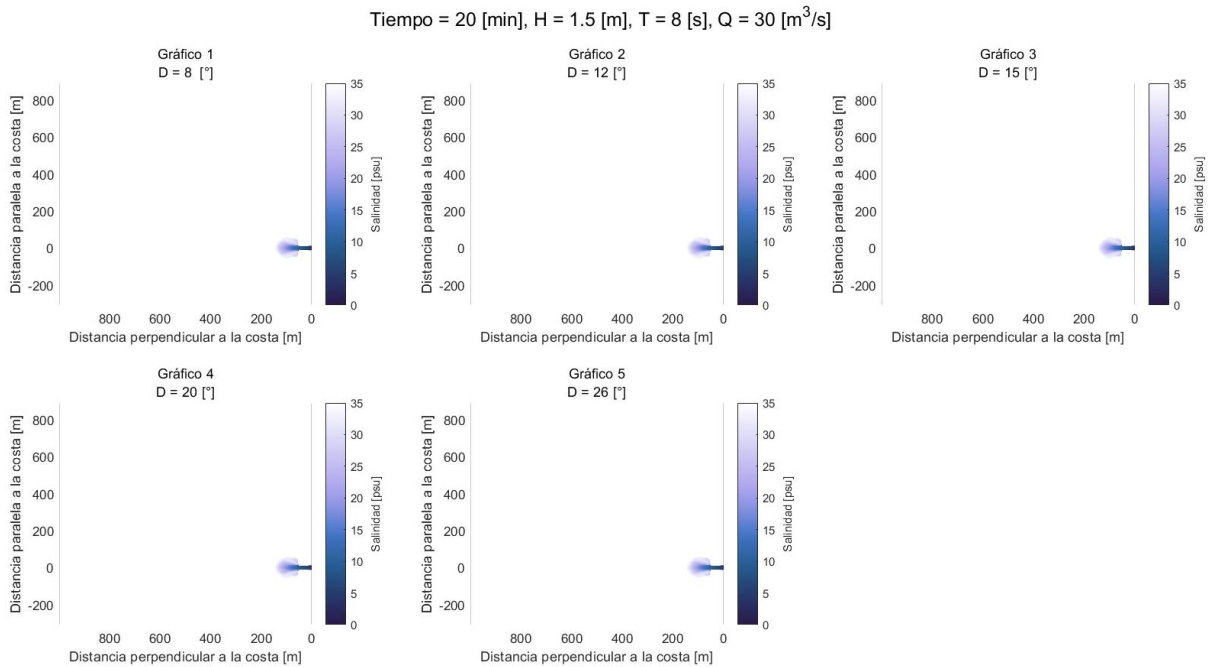
*Figura 42: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de  $20 [^\circ]$  entre 20 y 49 [min].*

*Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 43: Resultados de dispersión de la pluma con dirección de oleaje de  $26 [^\circ]$  entre 20 y 54 [min].*

*Fuente: Elaboración propia.*

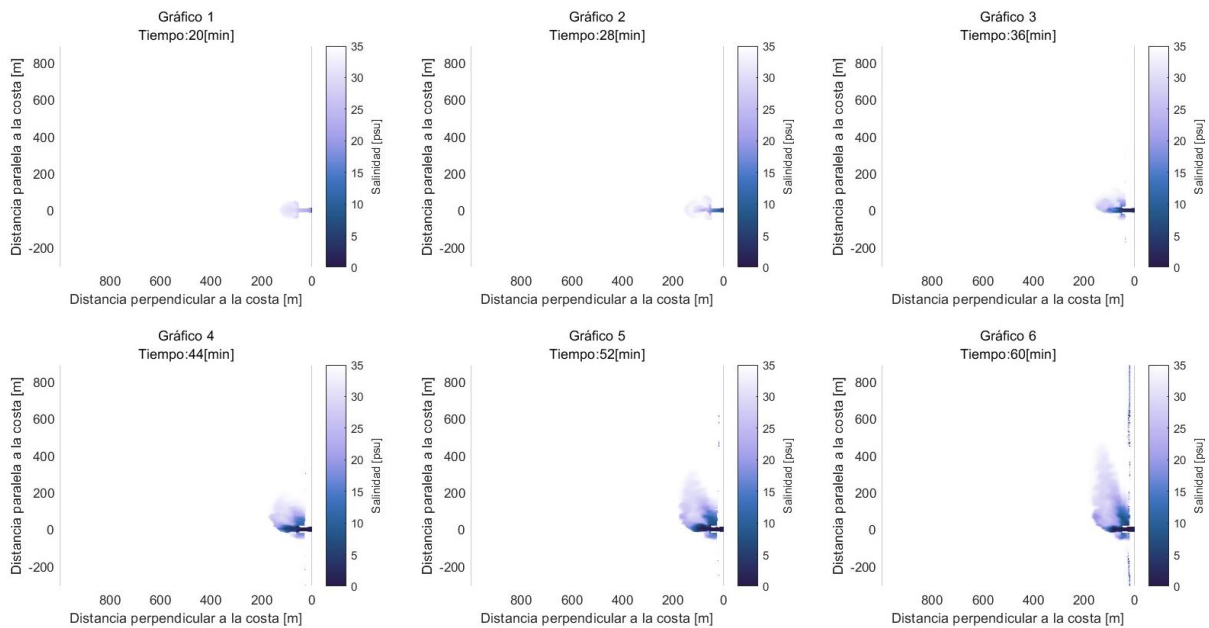


*Figura 44: Esquema de comparación de gráficos con variación de dirección del oleaje en el tiempo inicial de simulación de 20 minutos.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 9.2.4. Variación de Caudal de Salida del Río

**H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 5 [m<sup>3</sup>/s]**



*Figura 45: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de 5 [m<sup>3</sup>/s] entre 20 y 60 [min].*

*Fuente: Elaboración propia.*

$H = 1.5 \text{ [m]}, T = 8 \text{ [s]}, D = 15 \text{ [}^\circ\text{]}, Q = 45 \text{ [m}^3\text{/s]}$

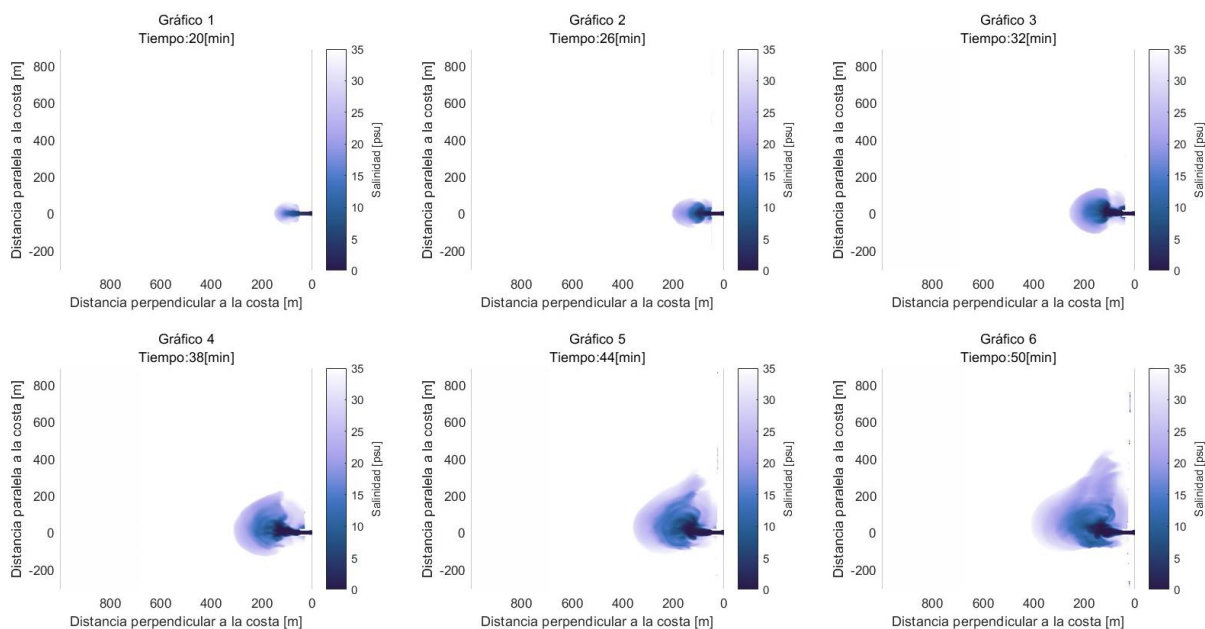


Figura 46: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de  $45 \text{ [m}^3\text{/s]}$  entre 20 y 50 [min].

Fuente: Elaboración propia.

$H = 1.5 \text{ [m]}, T = 8 \text{ [s]}, D = 15 \text{ [}^\circ\text{]}, Q = 65 \text{ [m}^3\text{/s]}$

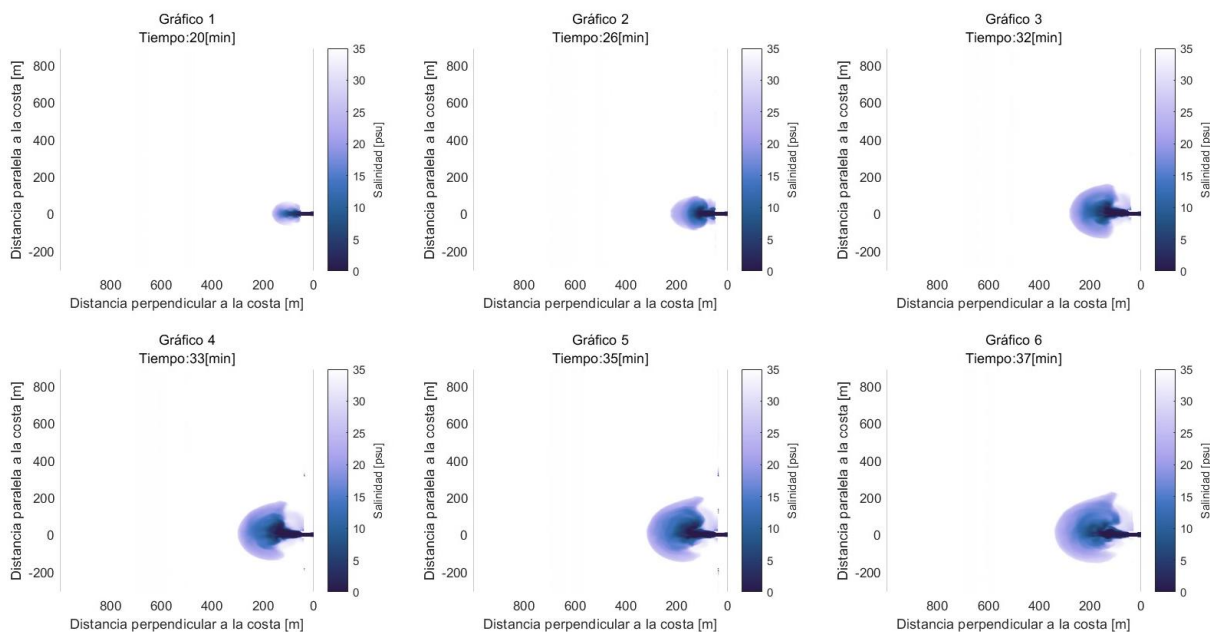


Figura 47: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de  $65 \text{ [m}^3\text{/s]}$  entre 20 y 37 [min].

Fuente: Elaboración propia.

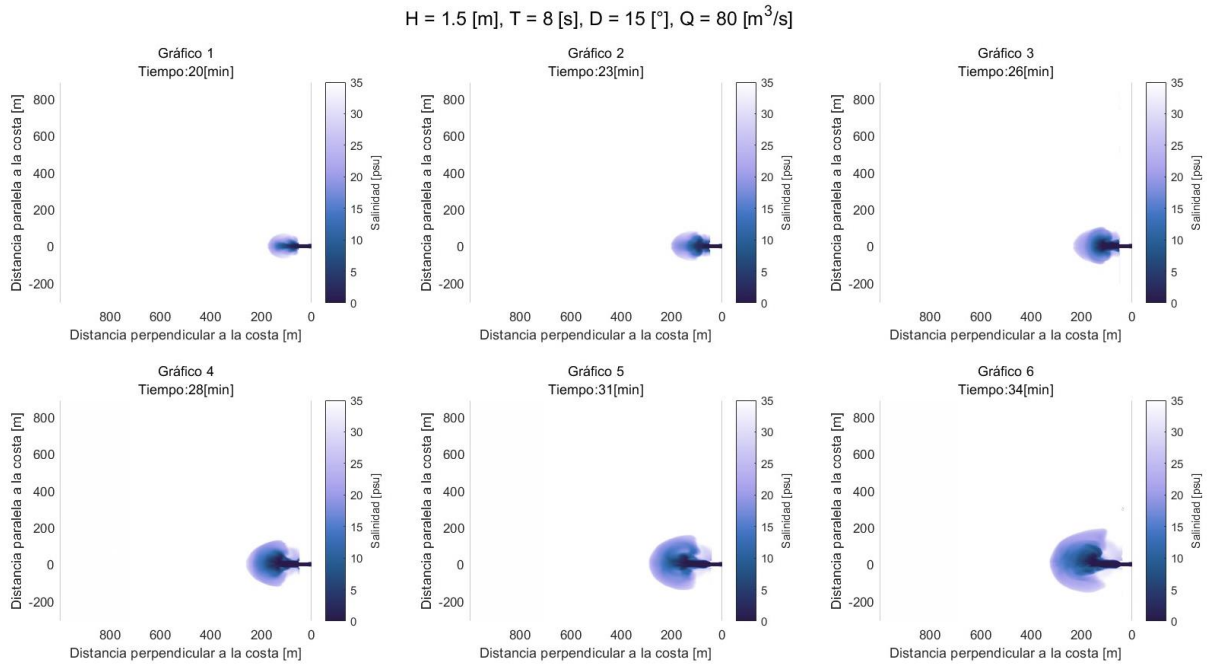


Figura 48: Resultados de dispersión de la pluma con caudal de  $80 [m^3/s]$  entre 20 y 34 [min].

*Fuente: Elaboración propia.*

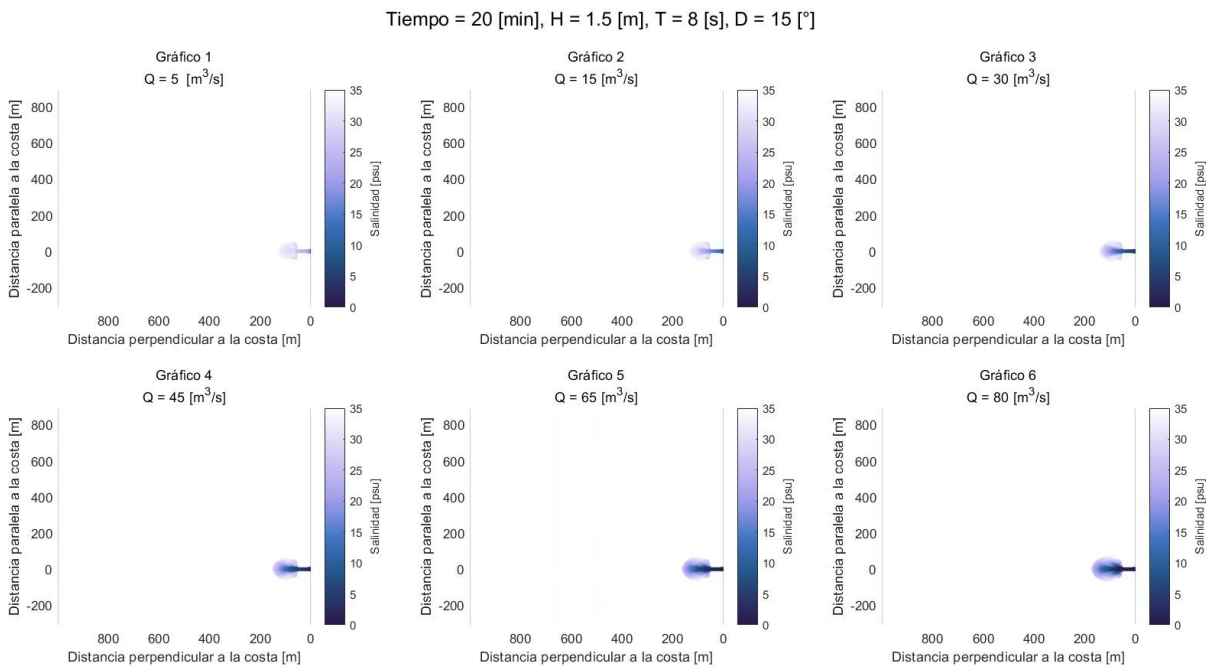


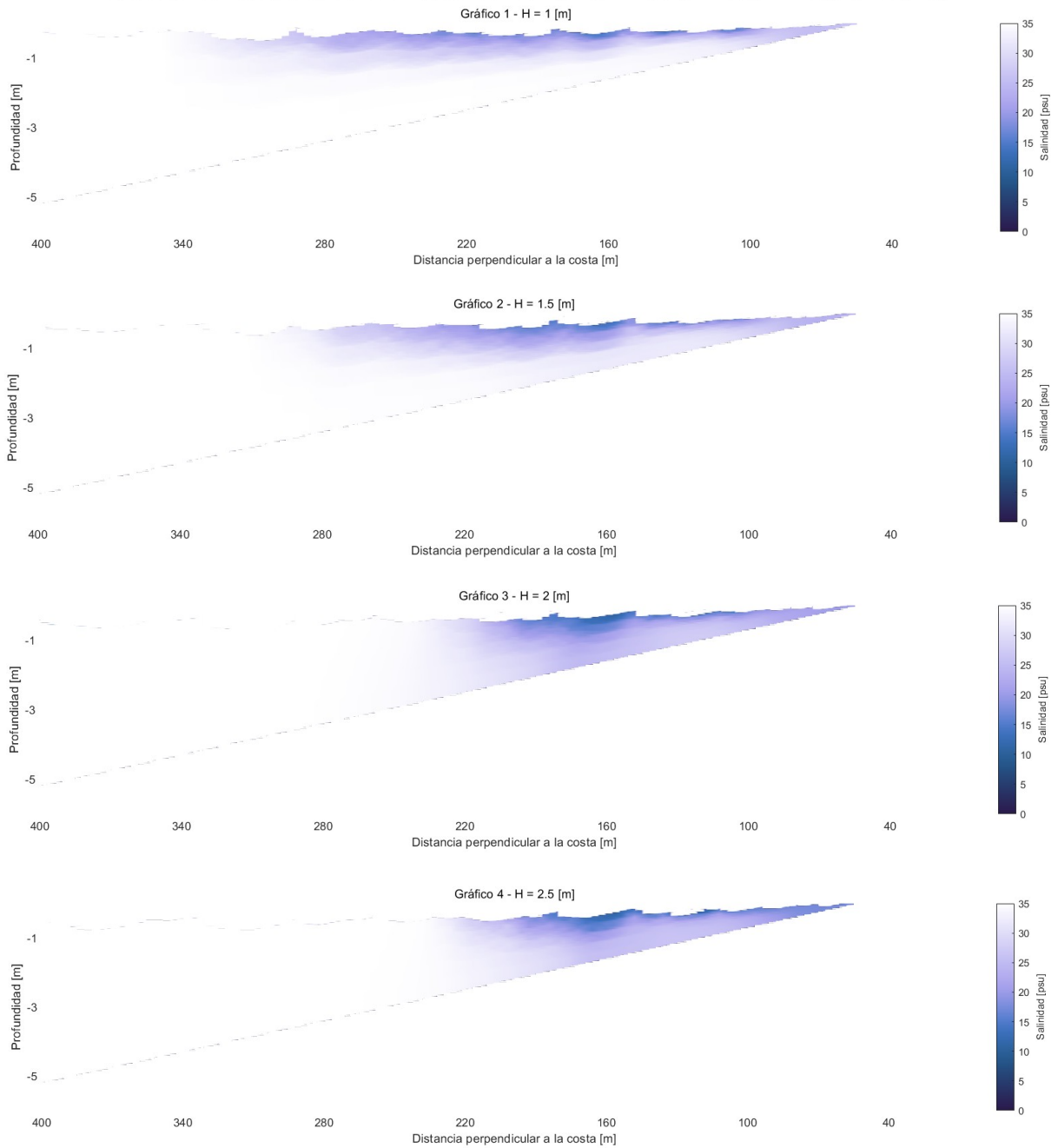
Figura 49: Esquema de comparación de gráficos con variación de caudal en el tiempo de simulación de 20 minutos.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 9.3. Resultados Adicionales de Mezcla de Pluma

#### 9.3.1. Variación de Altura del Oleaje

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 40 a 46 [min] - Eje Y = 78 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



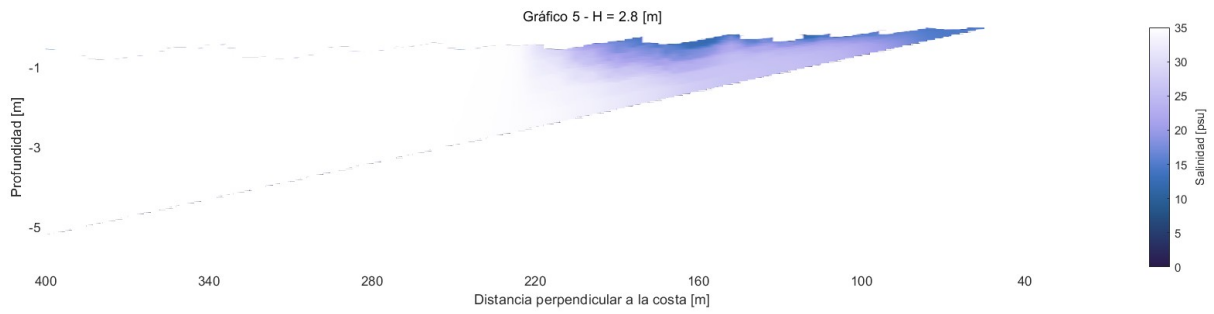
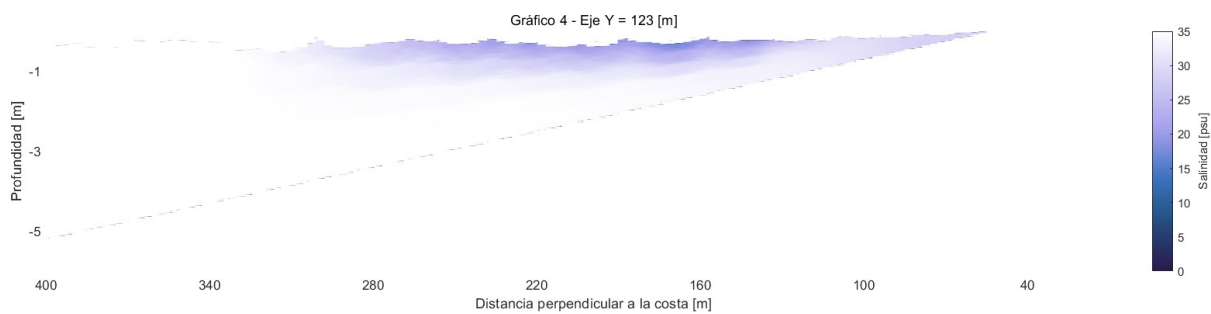
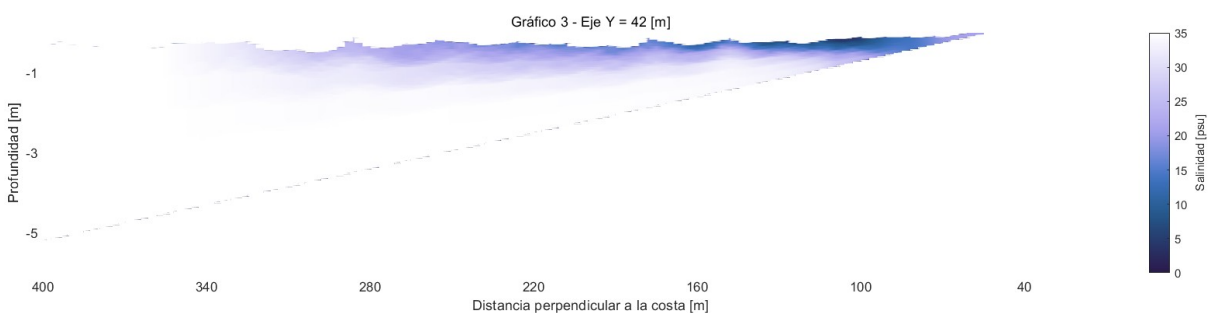
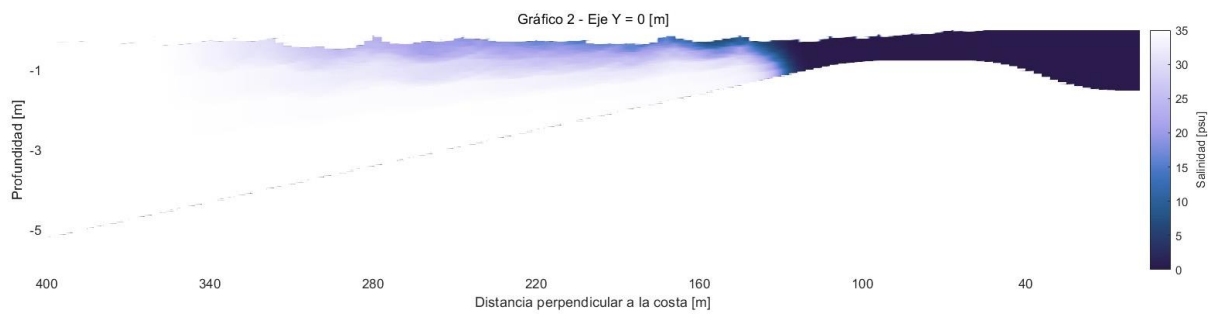
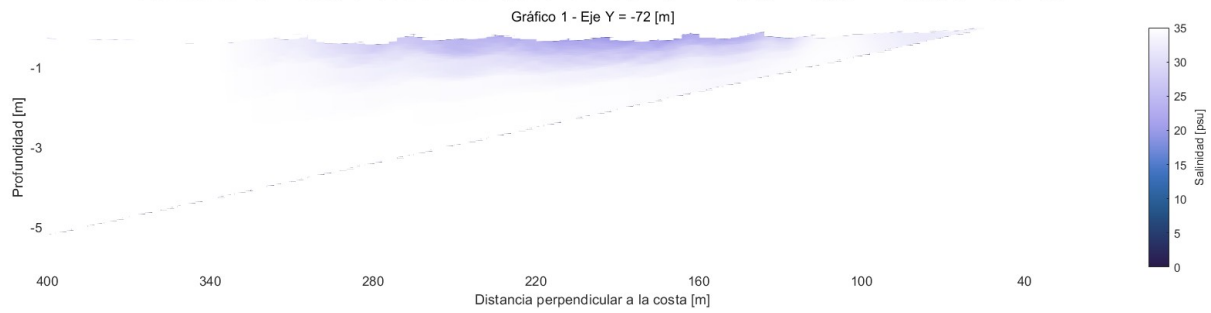


Figura 50: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de altura del oleaje ubicado en 78 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 40 a 46 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 40 a 46 [min] - H = 1 [m], T = 8 [s], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



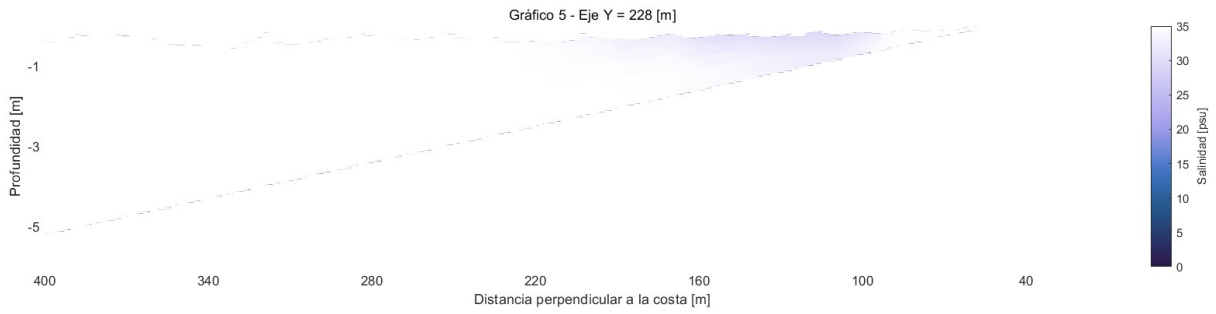
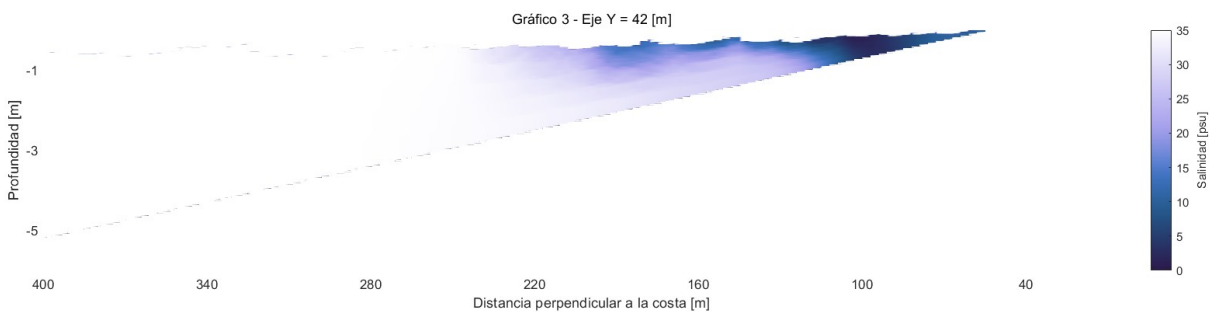
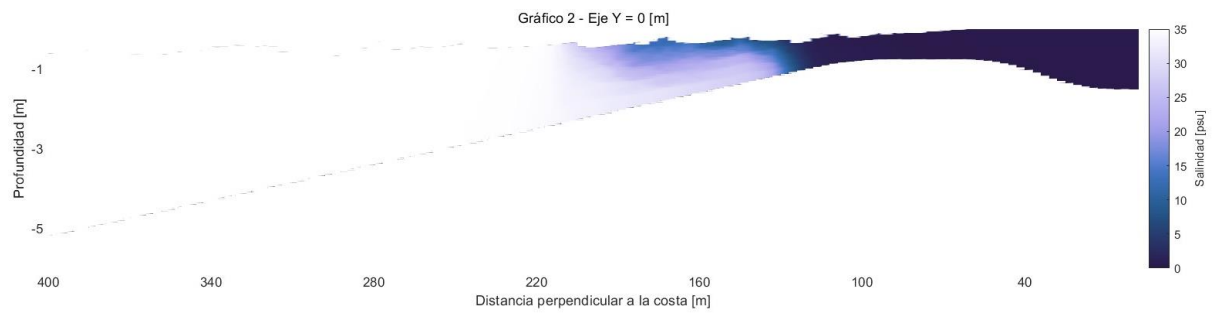
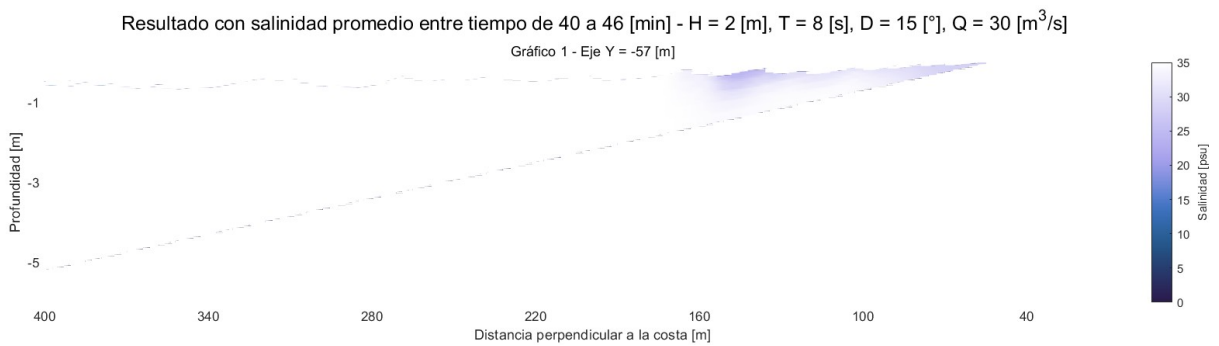


Figura 51: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 1 [m].

Fuente: Elaboración propia.



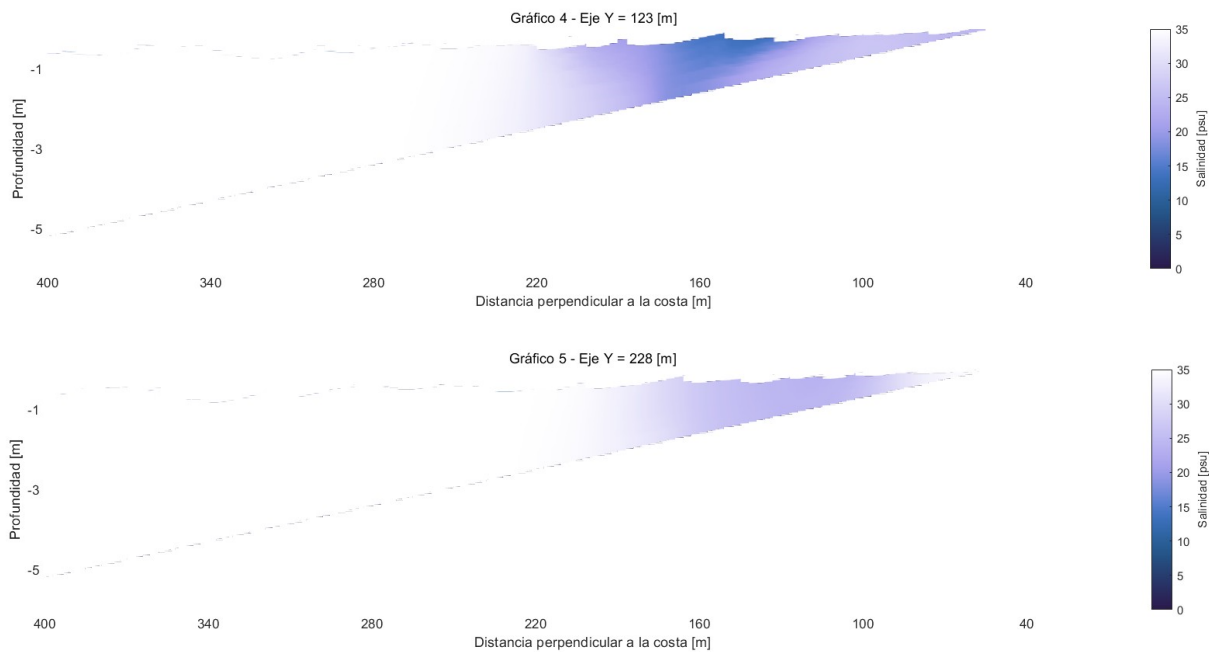
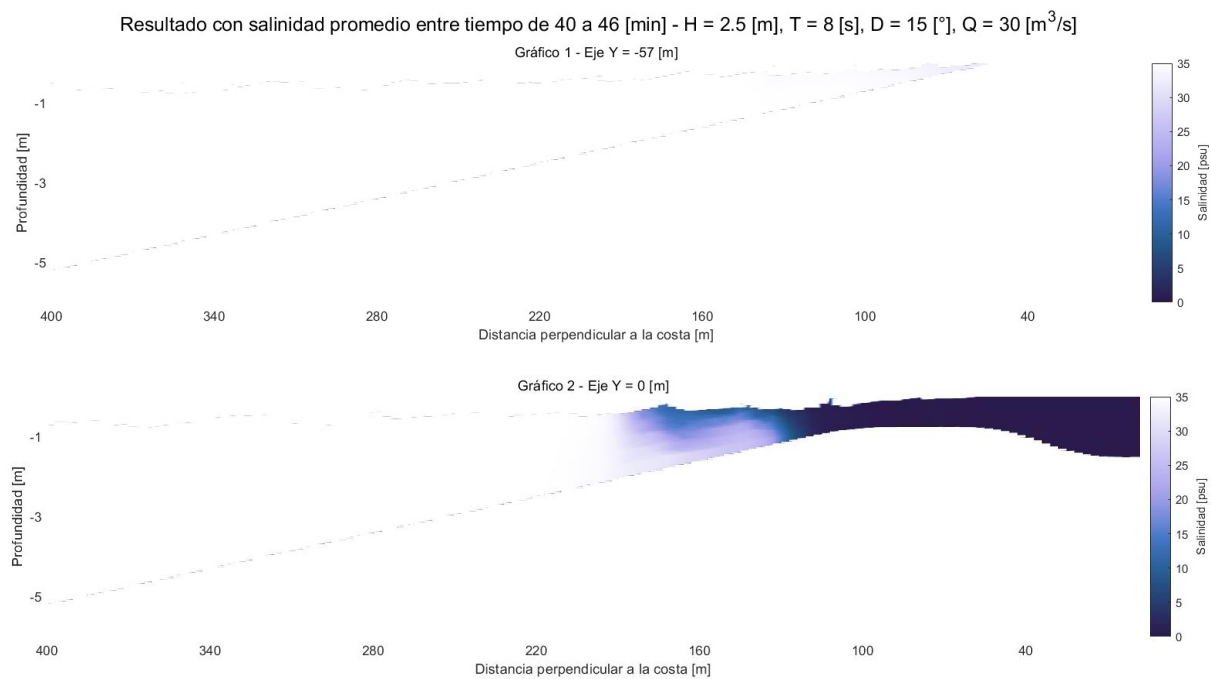


Figura 52: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 2 [m].

Fuente: Elaboración propia.



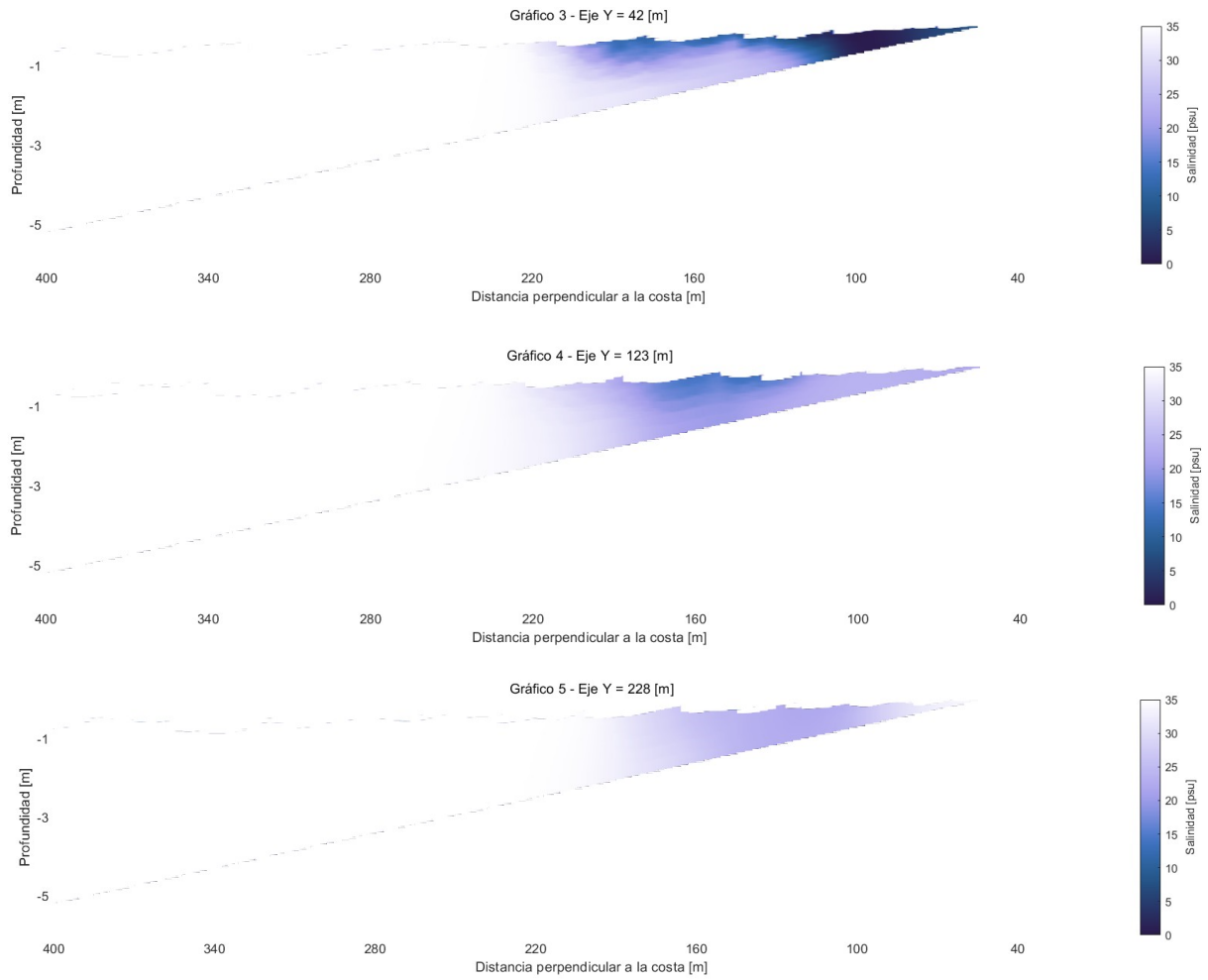
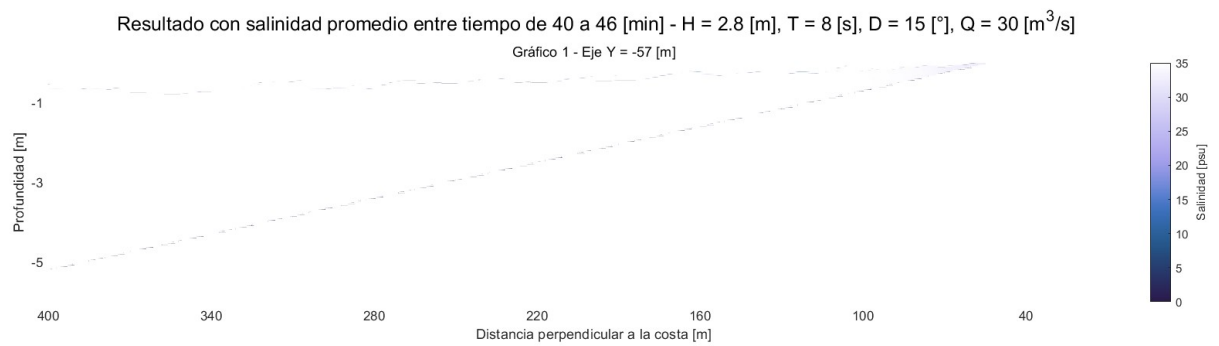
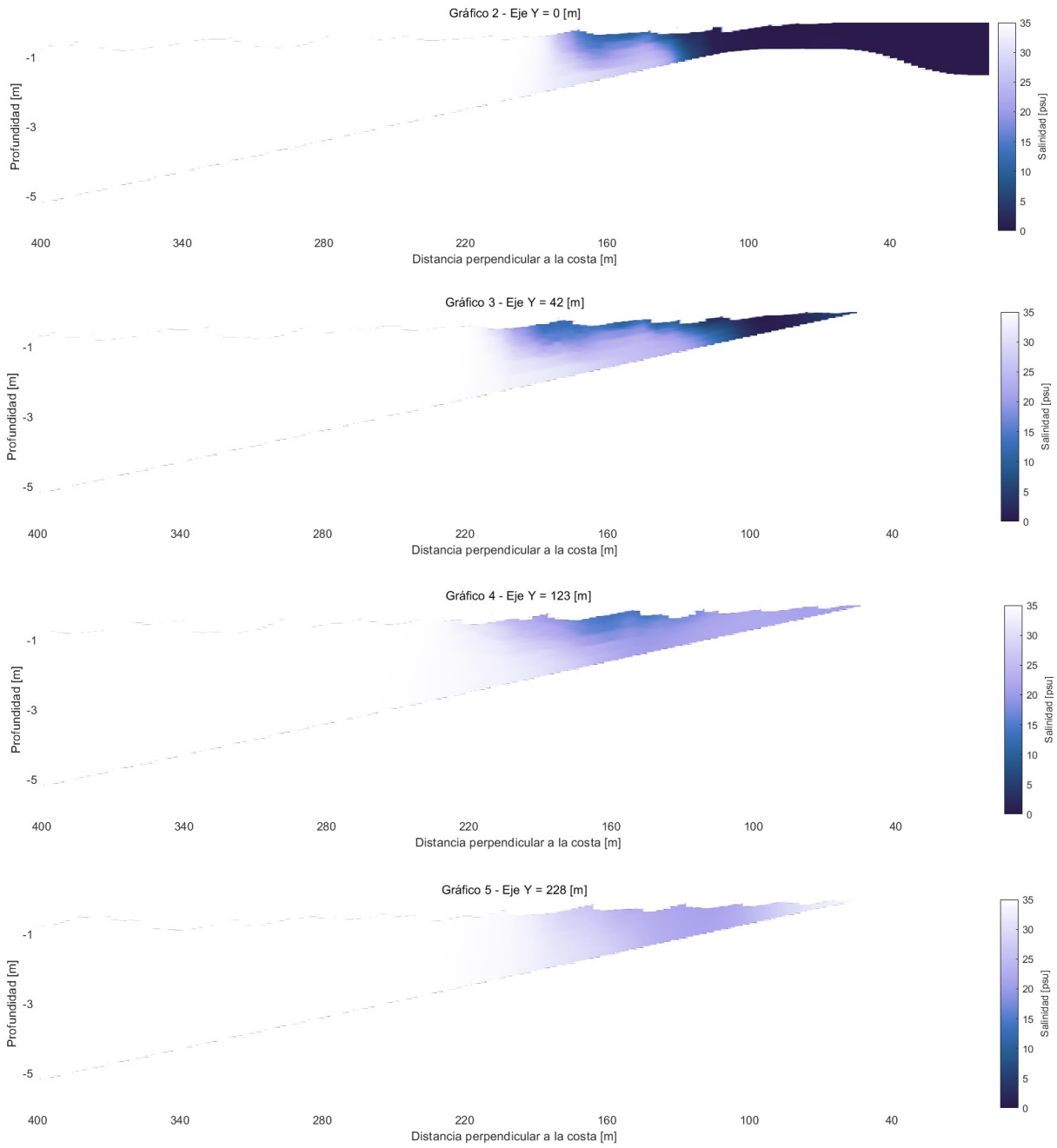


Figura 53: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 2.5 [m].

Fuente: Elaboración propia.



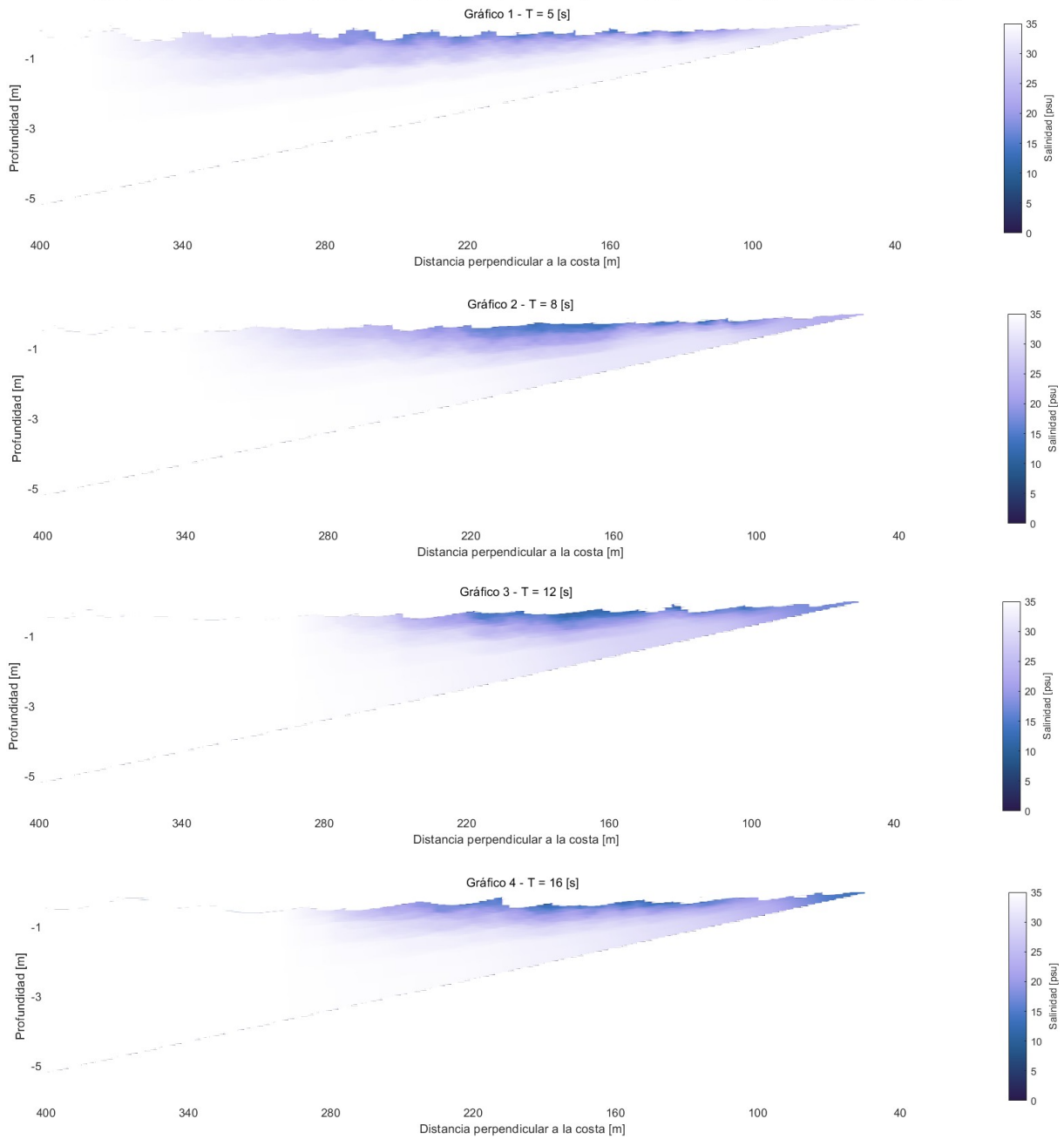


*Figura 54: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una altura del oleaje de 2.8 [m].*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 9.3.2. Variación de Periodo del Oleaje

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 45 a 51 [min] - Eje Y = 78 [m], H = 1.5 [m], D = 15 [°], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



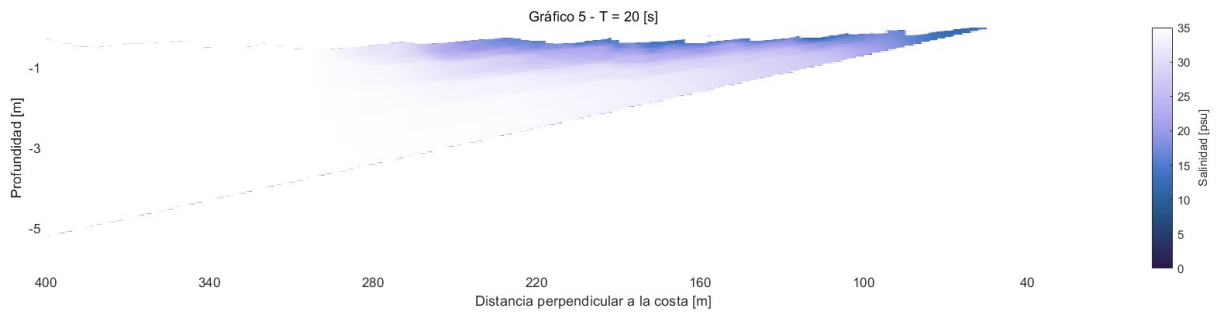
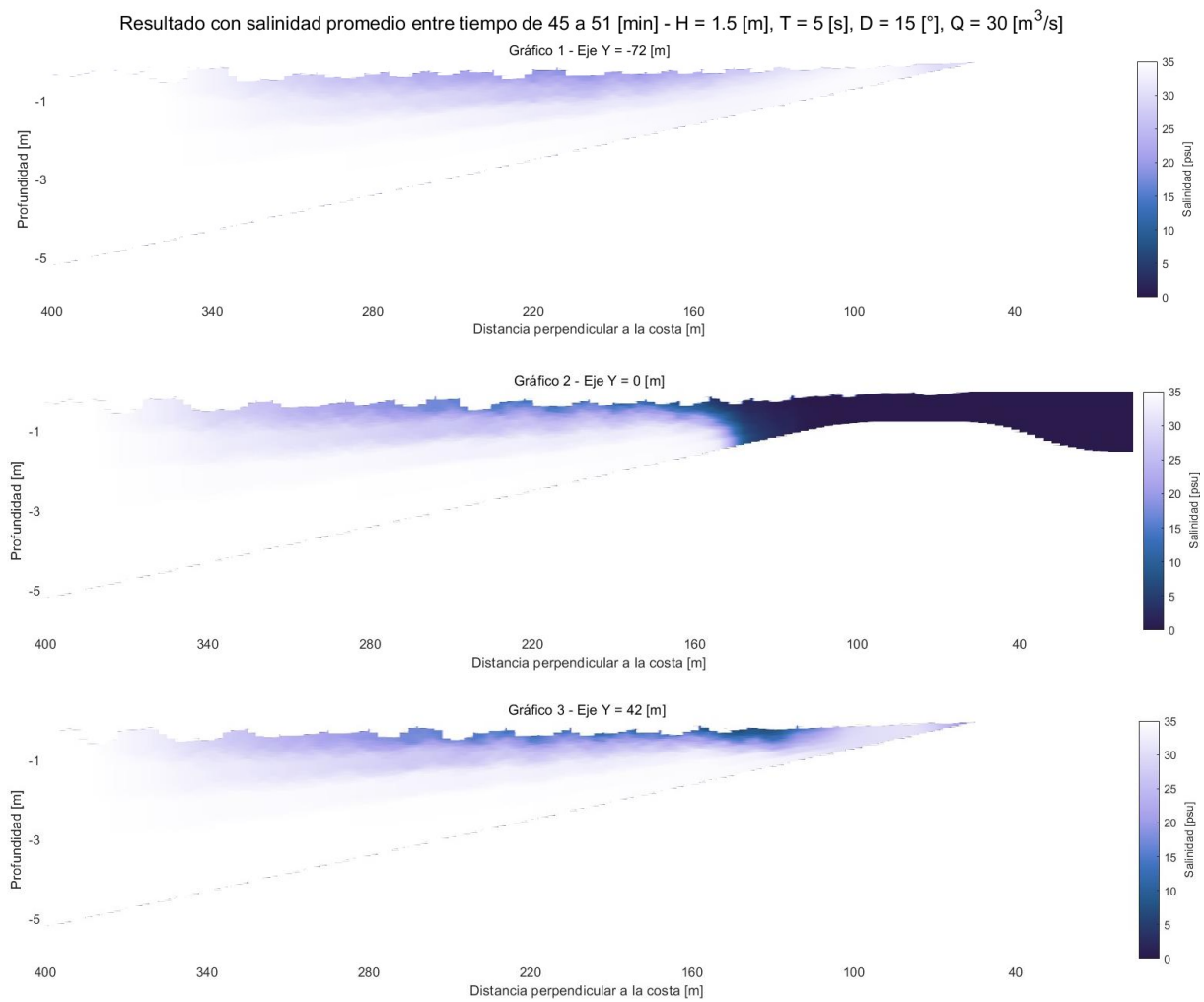


Figura 55: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de periodo del oleaje ubicado en 78 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 45 a 51 minutos.

Fuente: Elaboración propia.



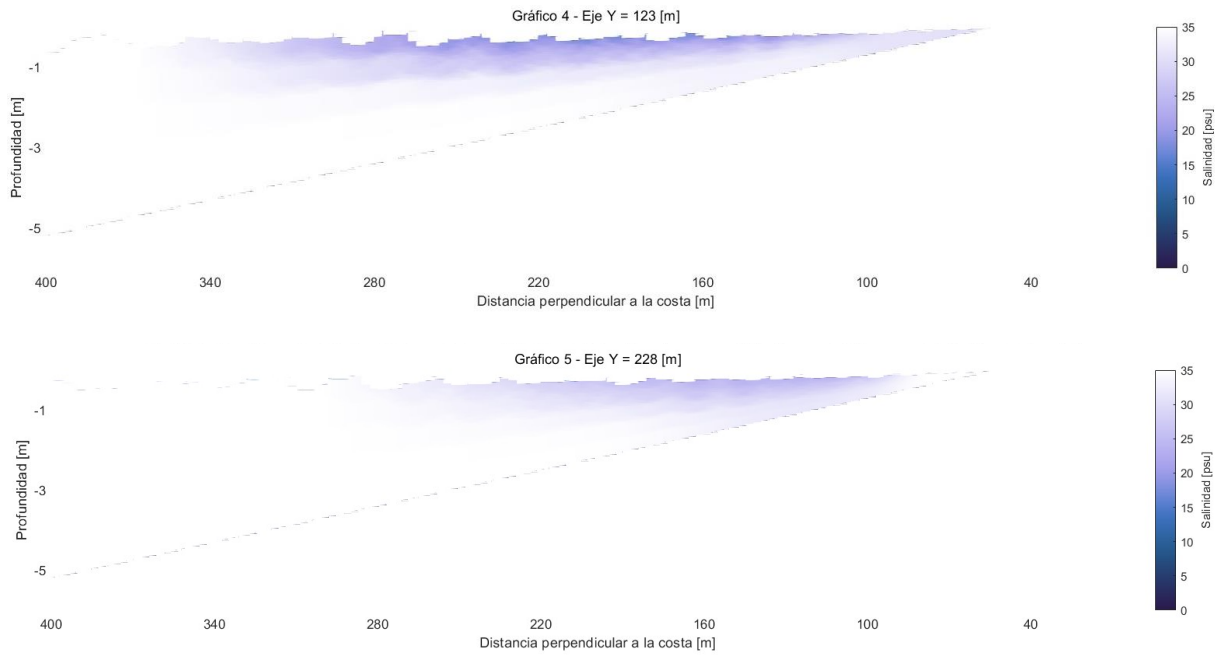
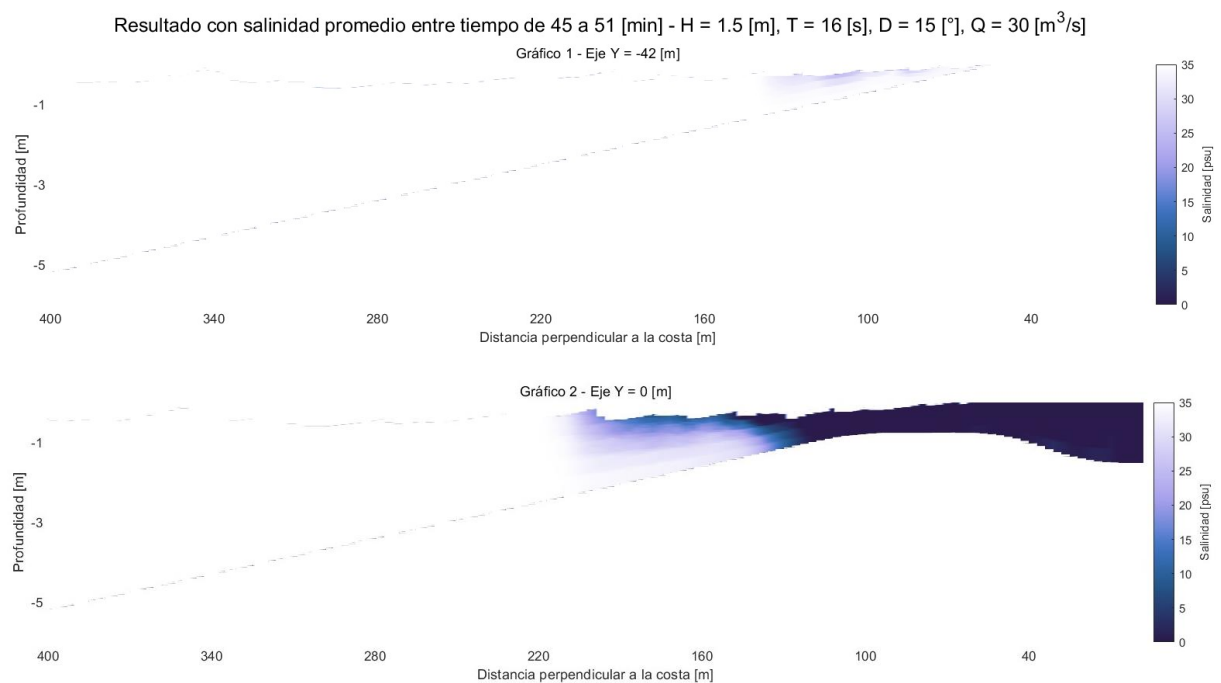
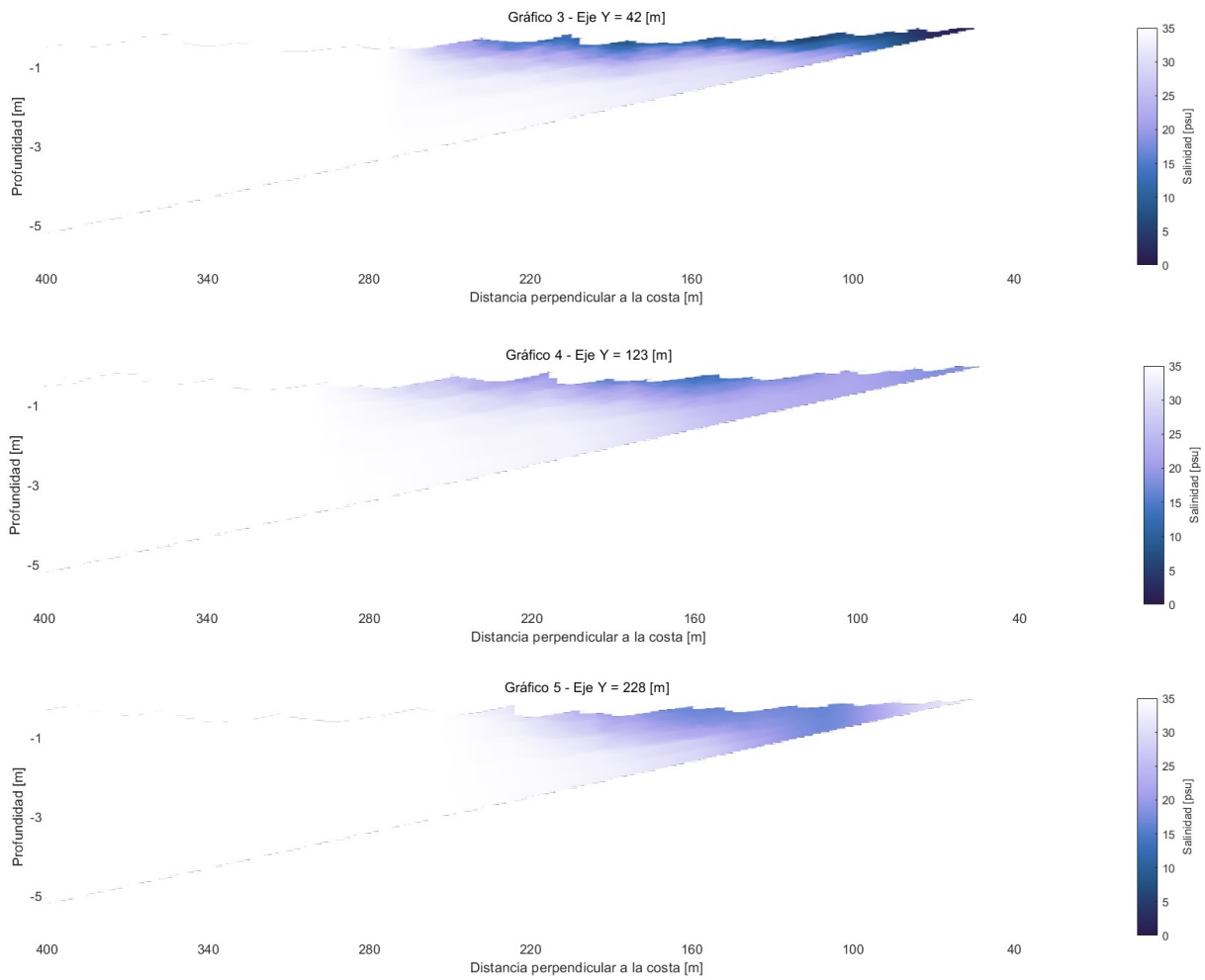


Figura 56: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 5 [s].

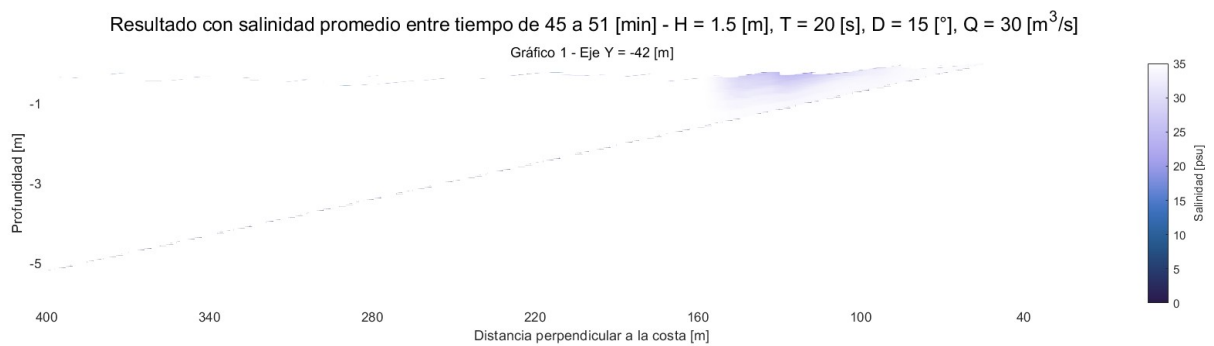
Fuente: Elaboración propia.

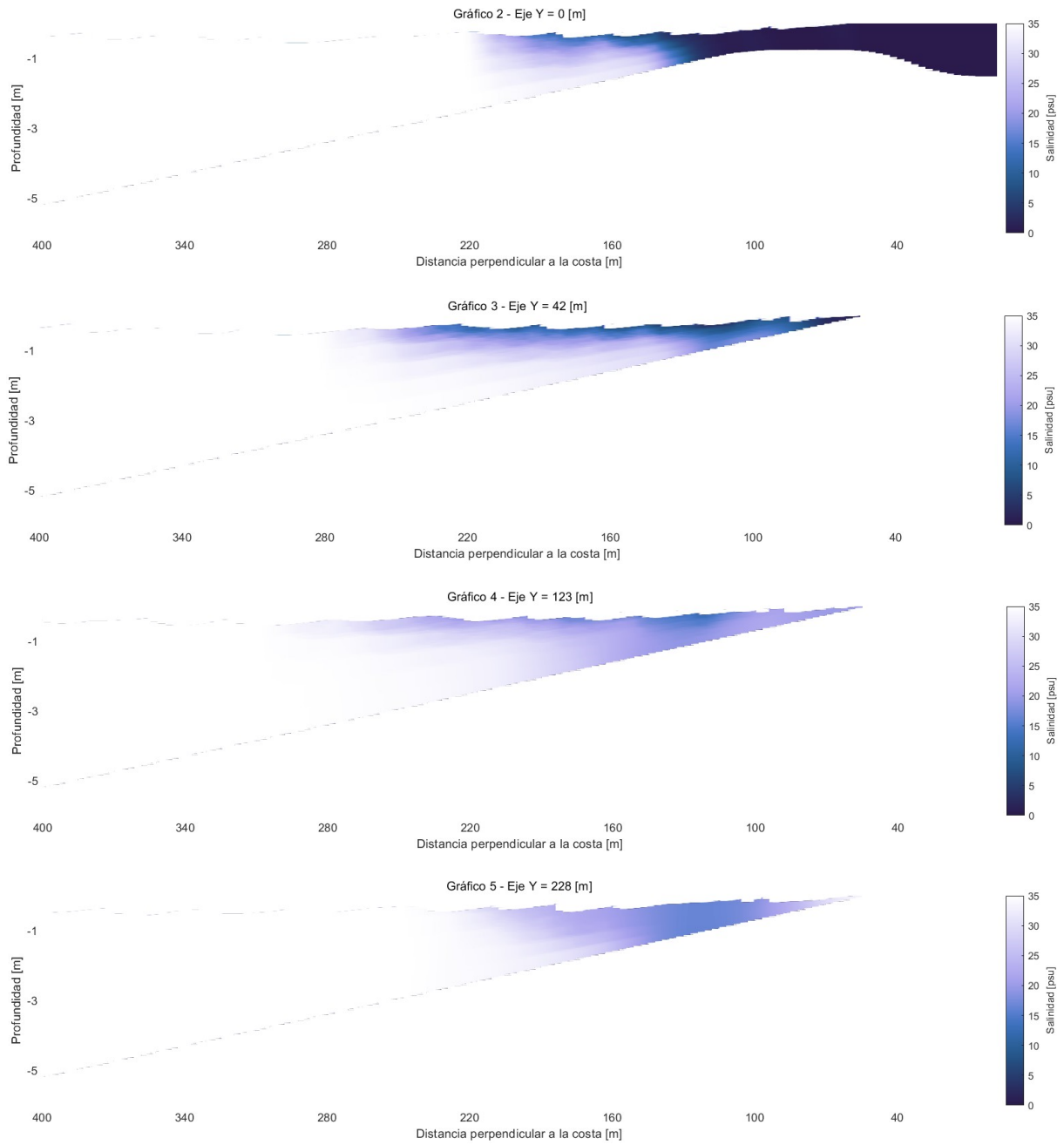




*Figura 57: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 16 [s].*

*Fuente: Elaboración propia.*



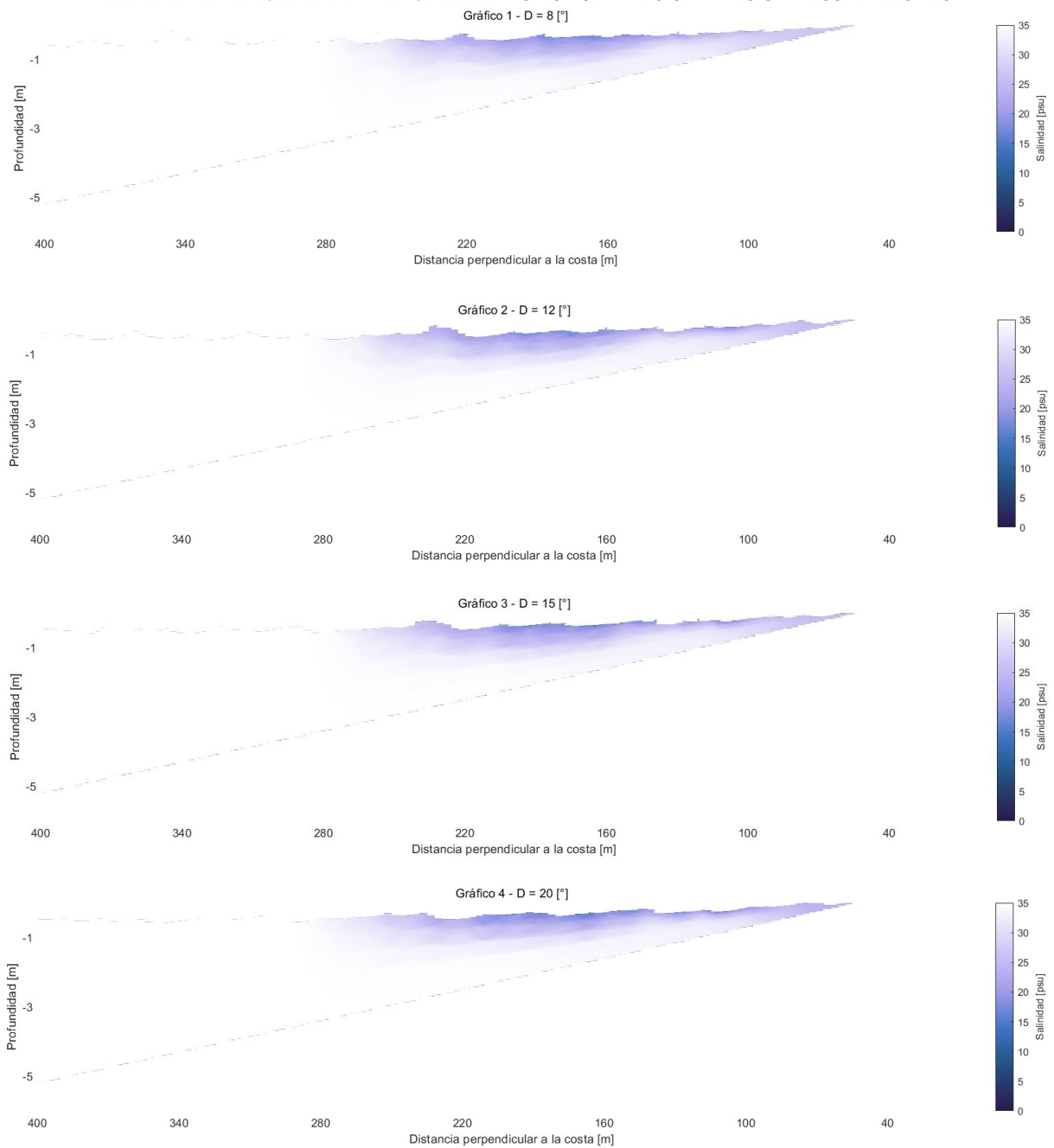


*Figura 58: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para un periodo del oleaje de 20 [s].*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 9.3.3. Variación de Dirección del Oleaje

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 36 a 42 [min] - Eje Y = 78 [m], H = 1.5 [m], T = 8 [s], Q = 30 [m<sup>3</sup>/s]



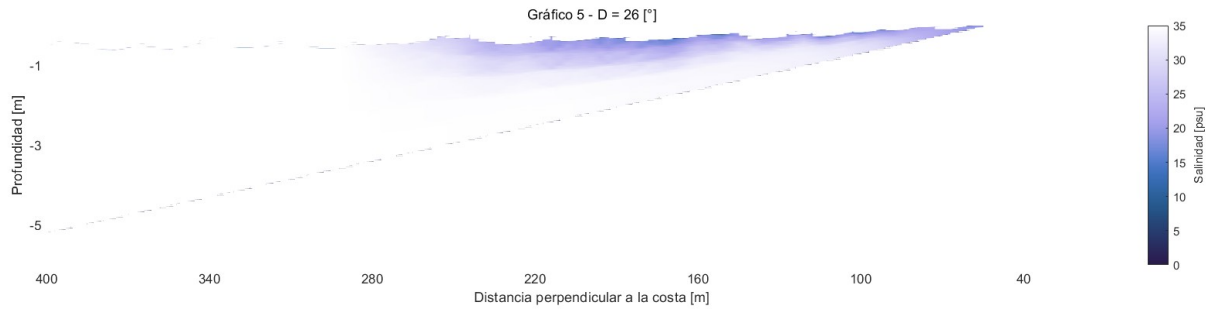
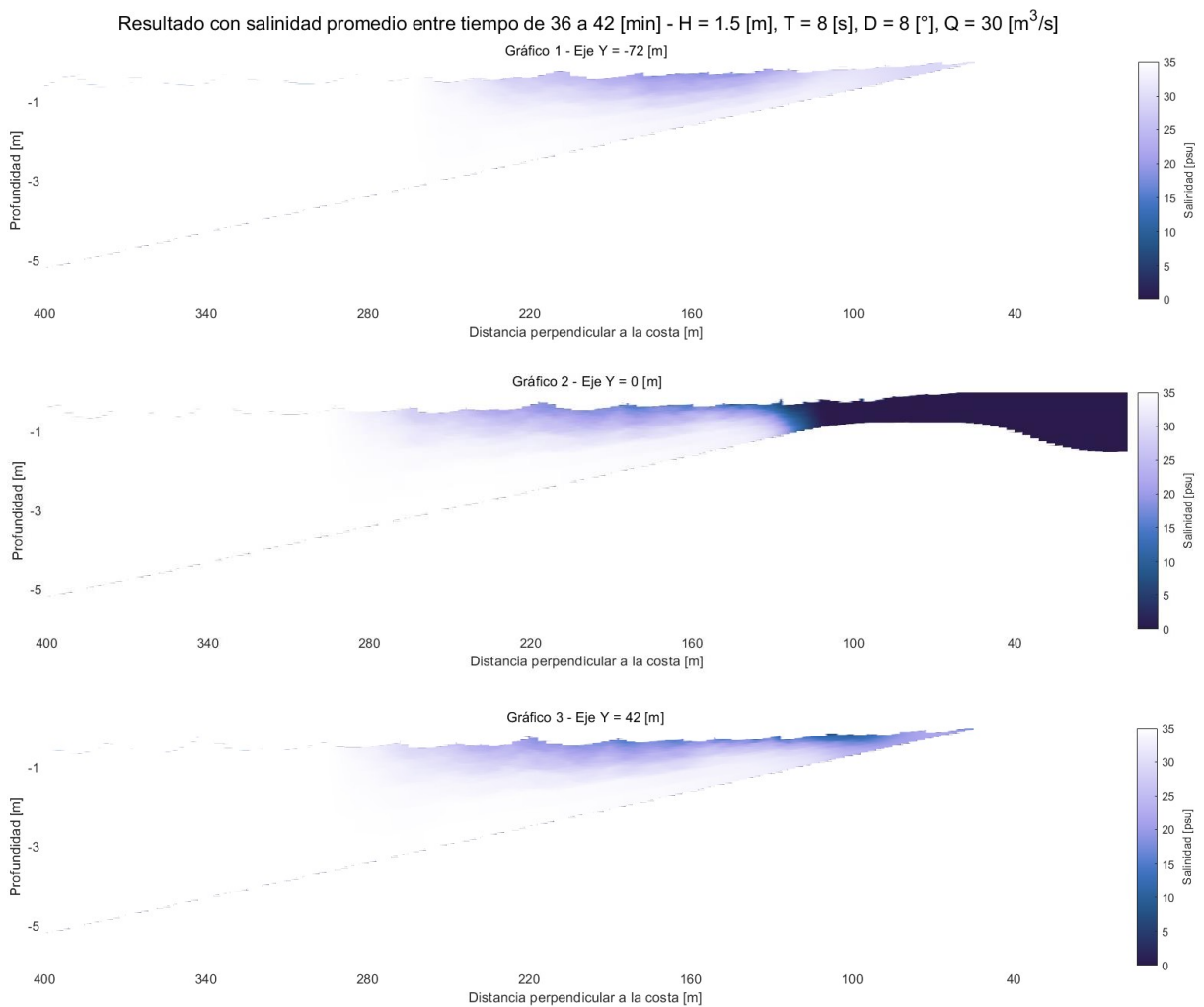


Figura 59: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de dirección del oleaje ubicado en 78 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 36 a 42 minutos.

Fuente: Elaboración propia.



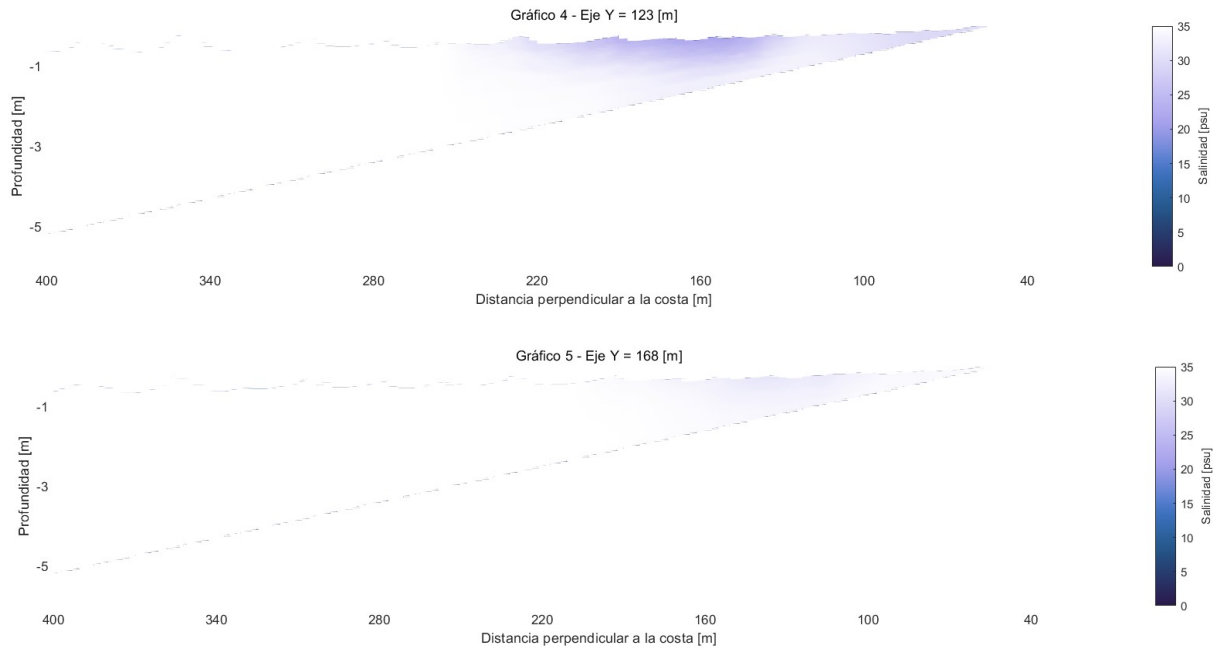
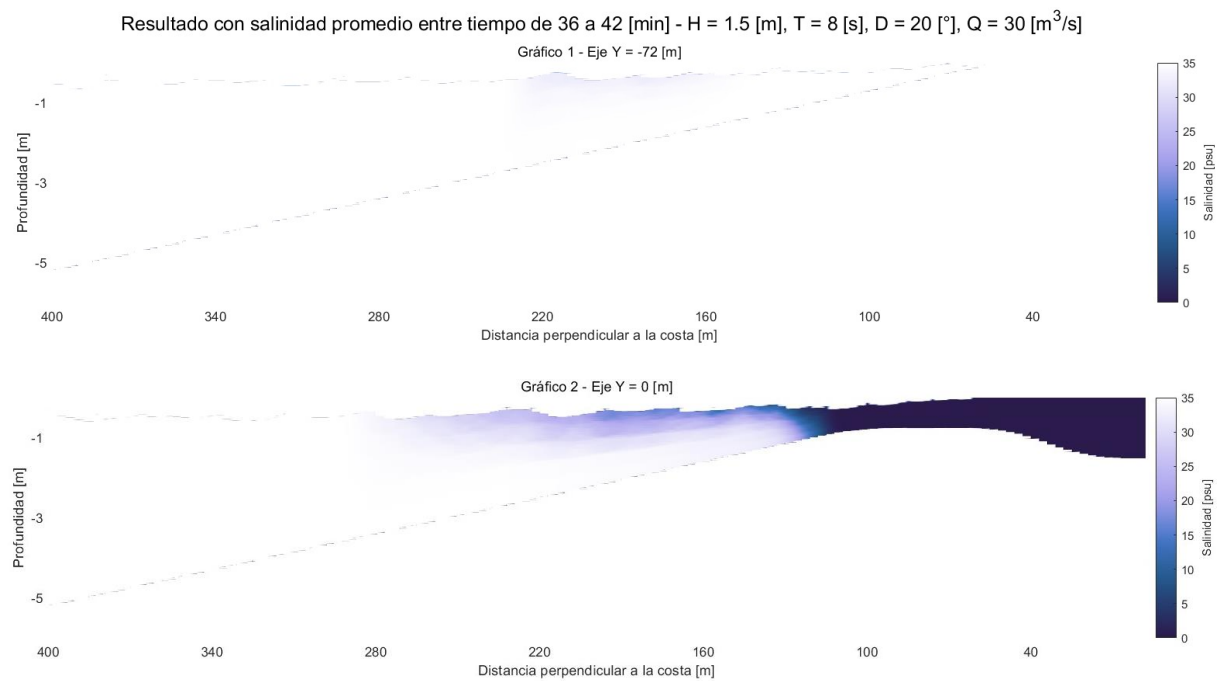


Figura 60: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de  $8 [^\circ]$ .

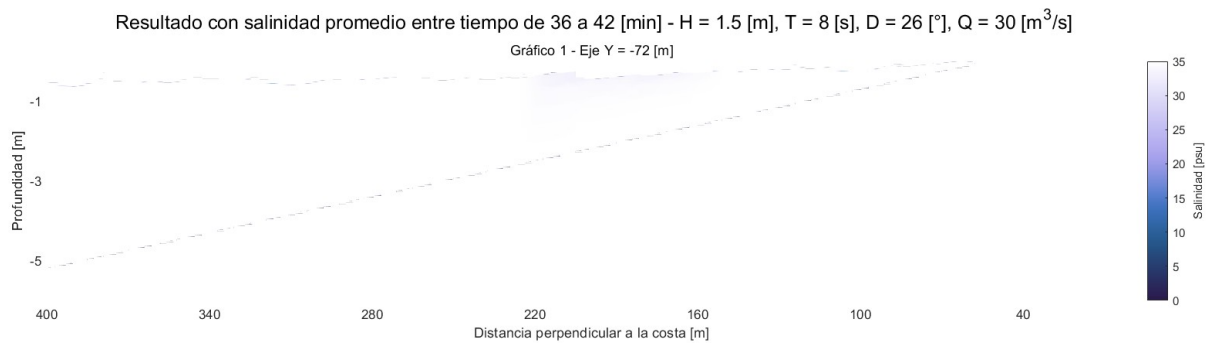
Fuente: Elaboración propia.

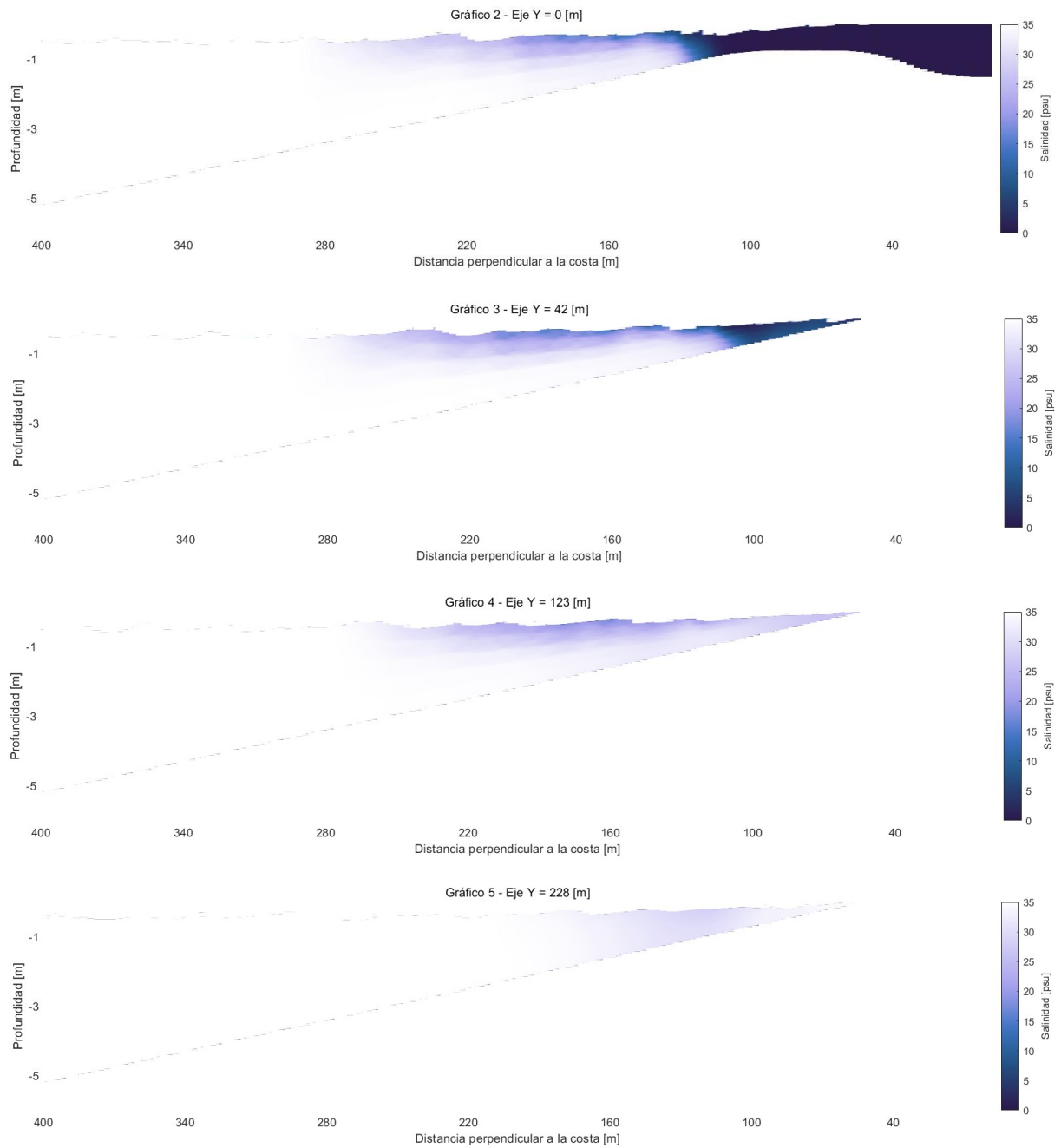




*Figura 61: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de 20 [°].*

*Fuente: Elaboración propia.*



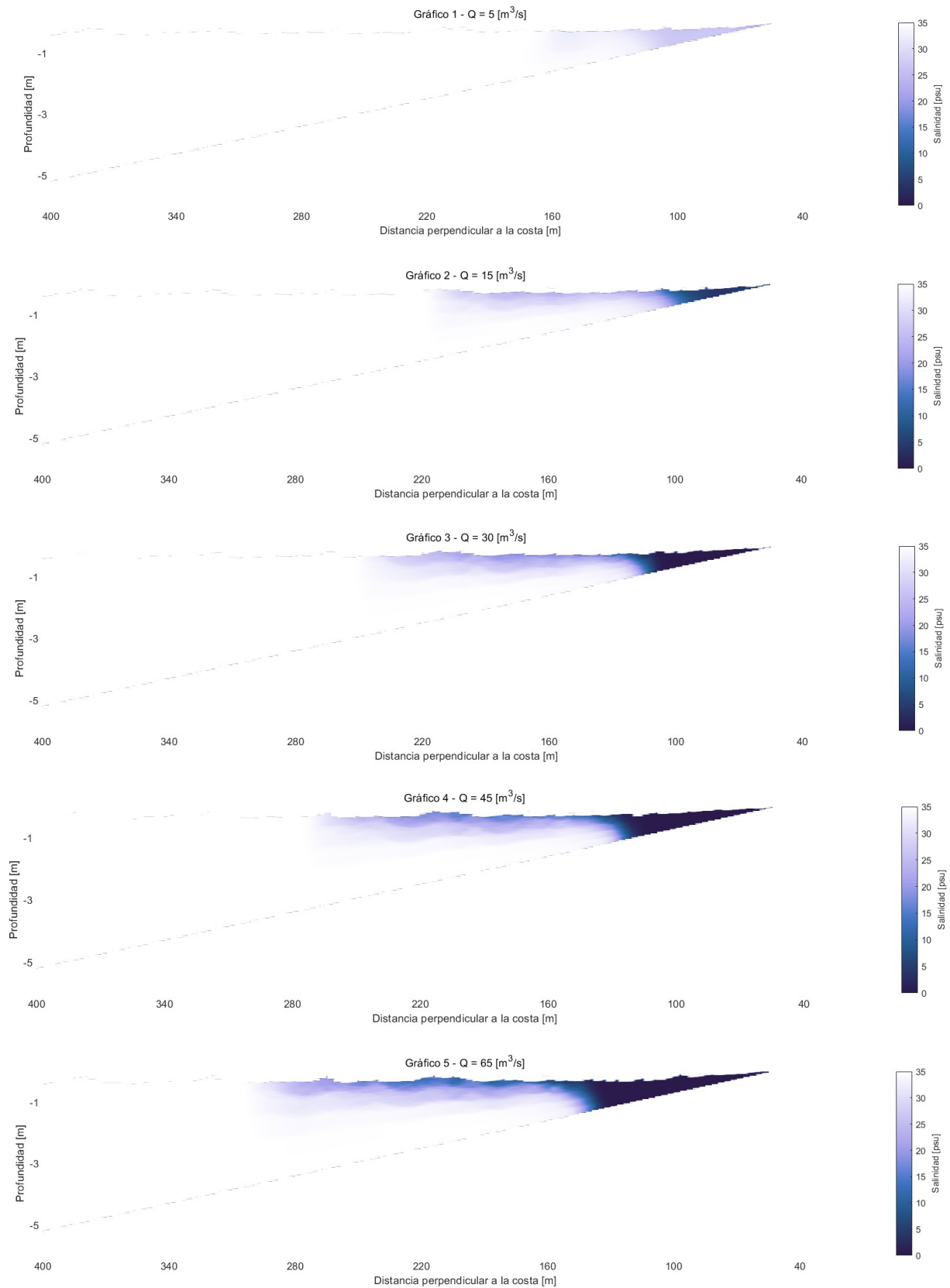


*Figura 62: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para una dirección del oleaje de 26 [°].*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 9.3.4. Variación de Caudal de Salida del Río

Resultado con salinidad promedio entre tiempo de 32 a 34 [min] - Eje Y = 15 [m], H = 1.5 [m], T = 8 [s], D = 15 [°]



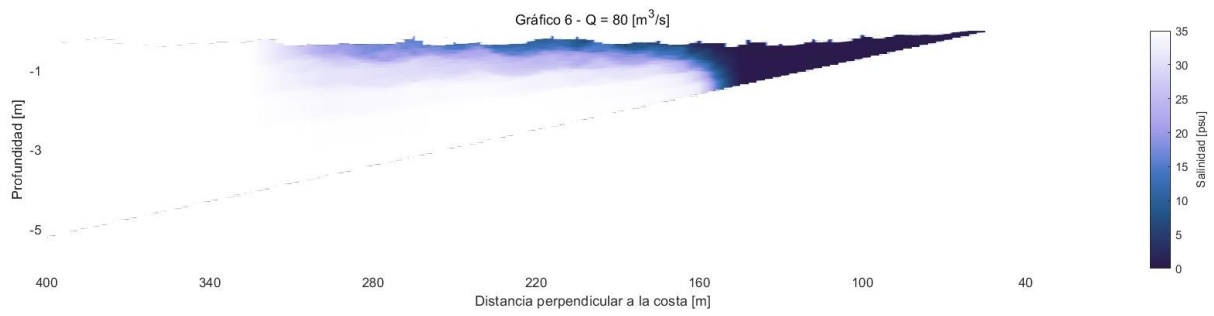
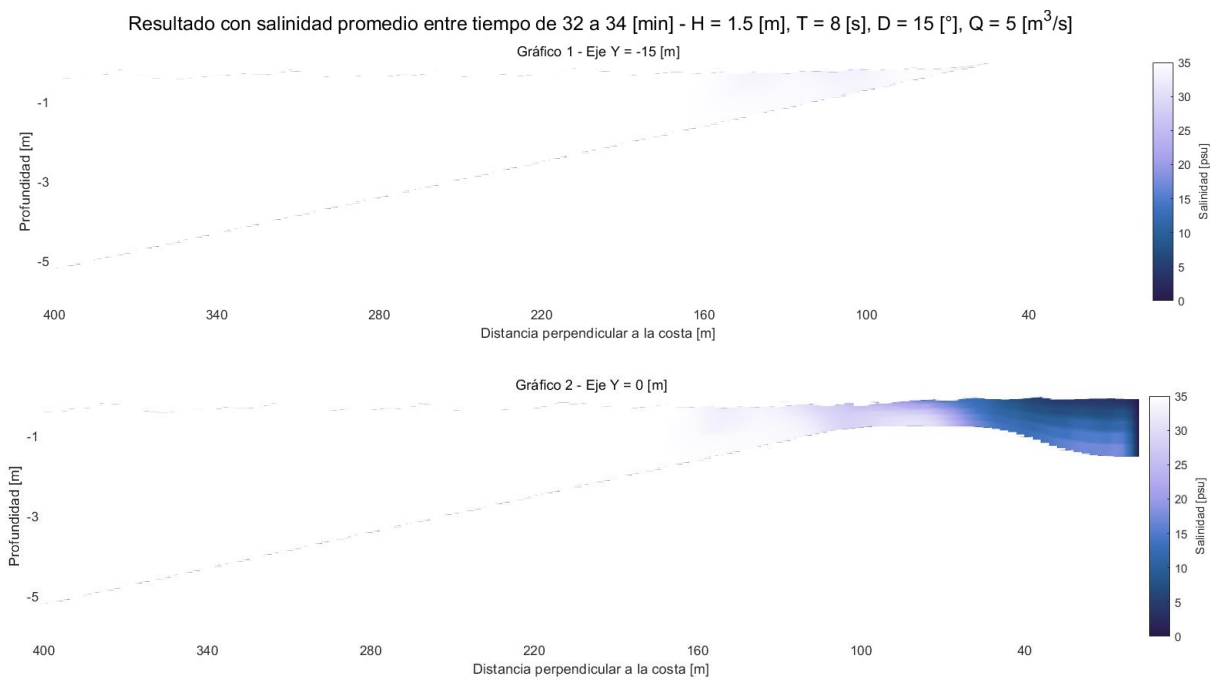


Figura 63: Esquema de comparación de gráficos de mezcla de la pluma con variación de caudal de salida del río ubicado en 15 [m] del eje Y entre el tiempo de simulación de 32 a 34 minutos.

Fuente: Elaboración propia.



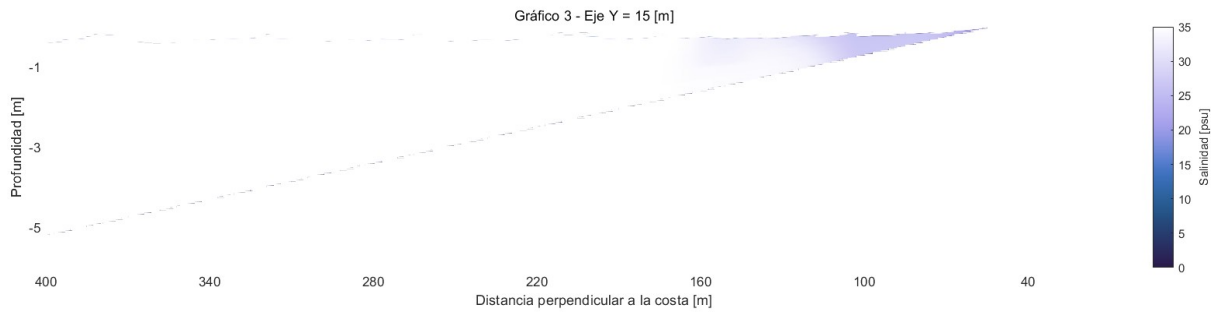


Figura 64: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 5 [m<sup>3</sup>/s].

Fuente: Elaboración propia.

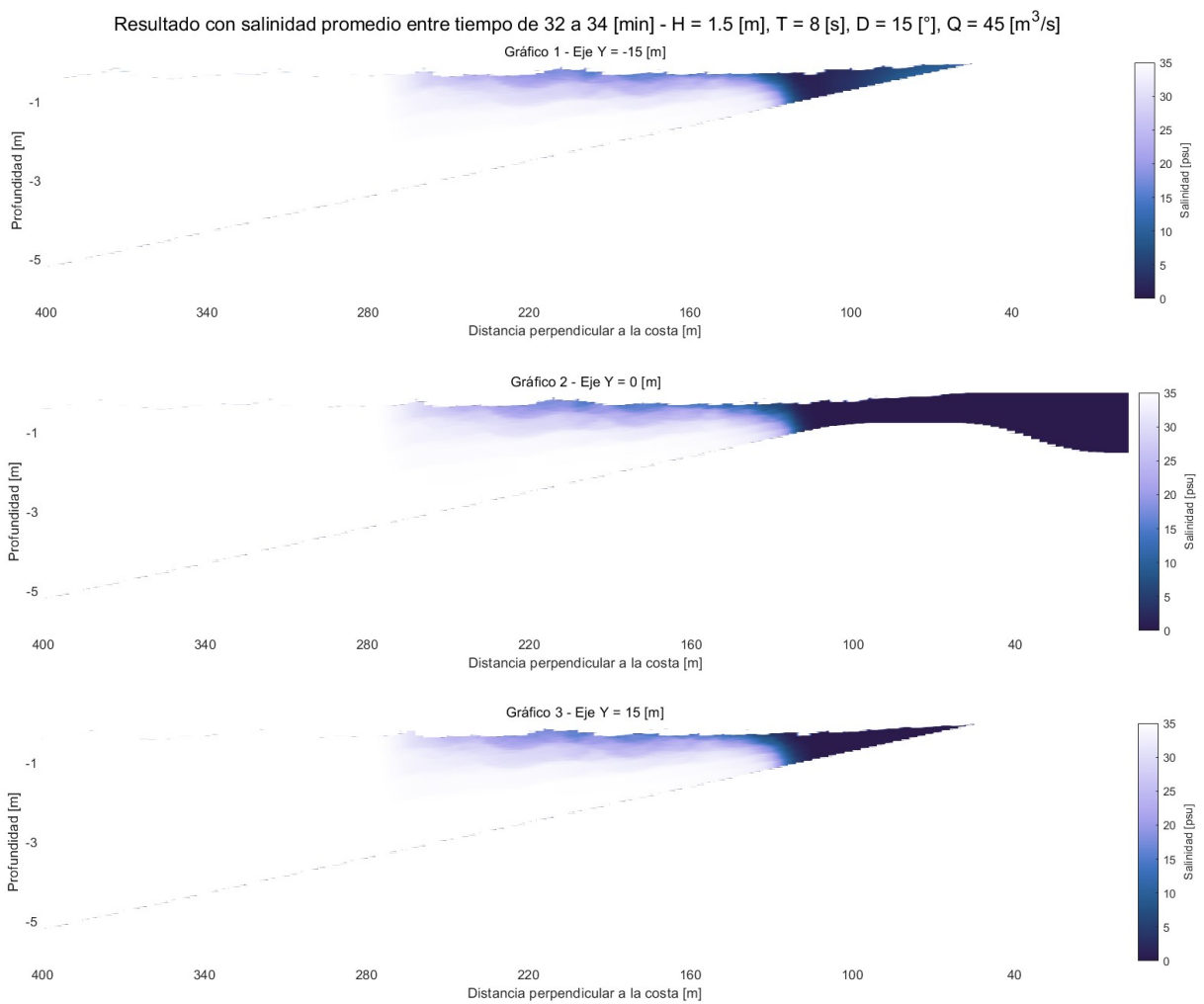


Figura 65: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 45 [m<sup>3</sup>/s].

Fuente: Elaboración propia.

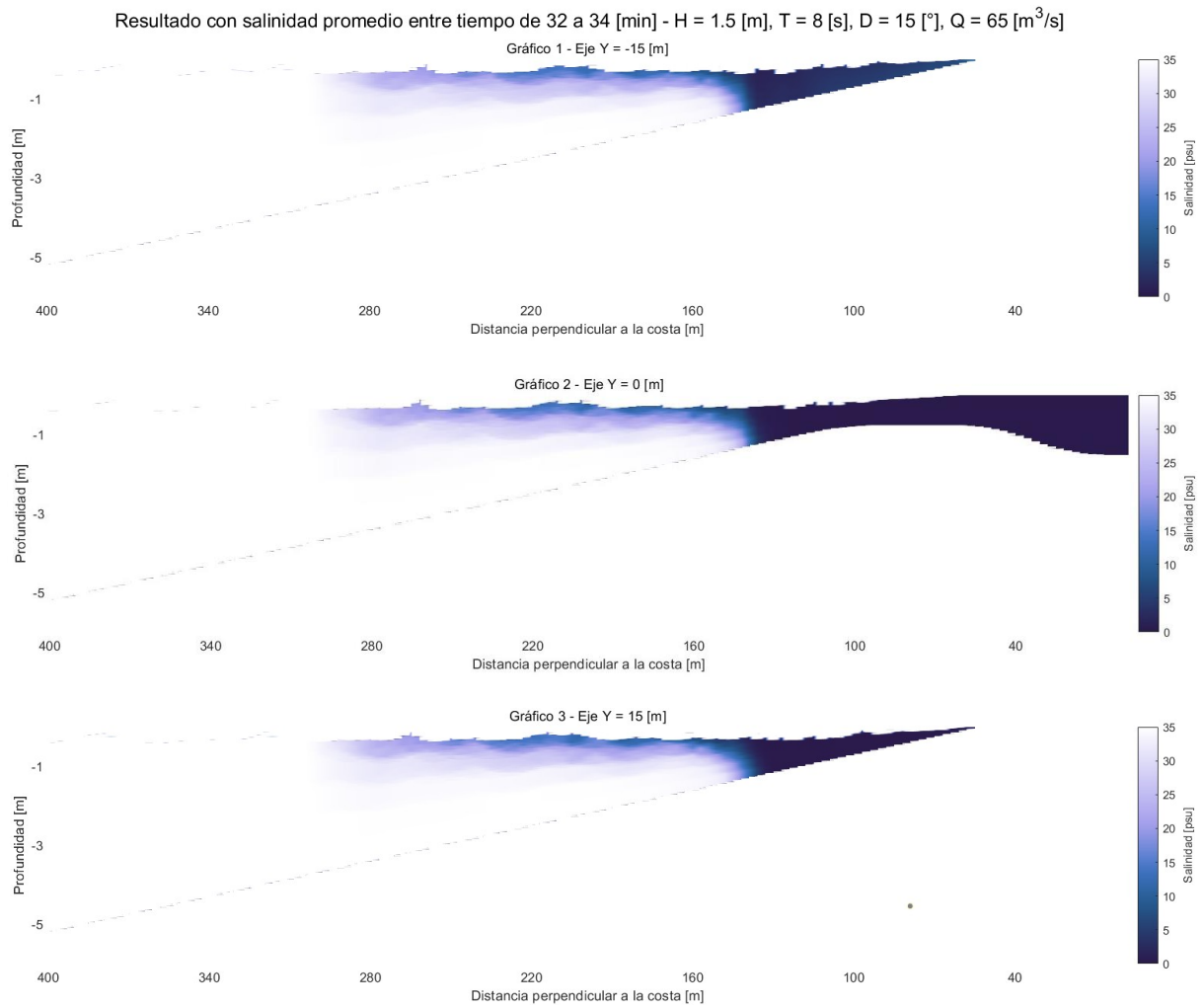
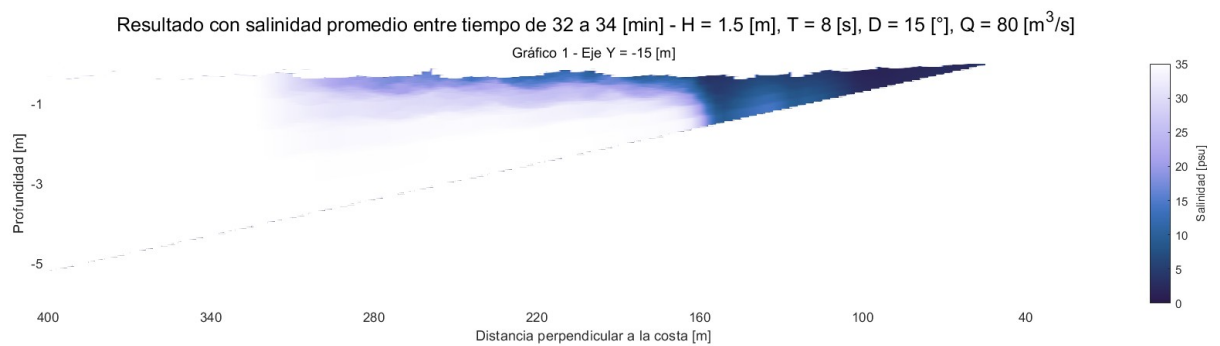


Figura 66: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de 65 [m<sup>3</sup>/s].

Fuente: Elaboración propia.



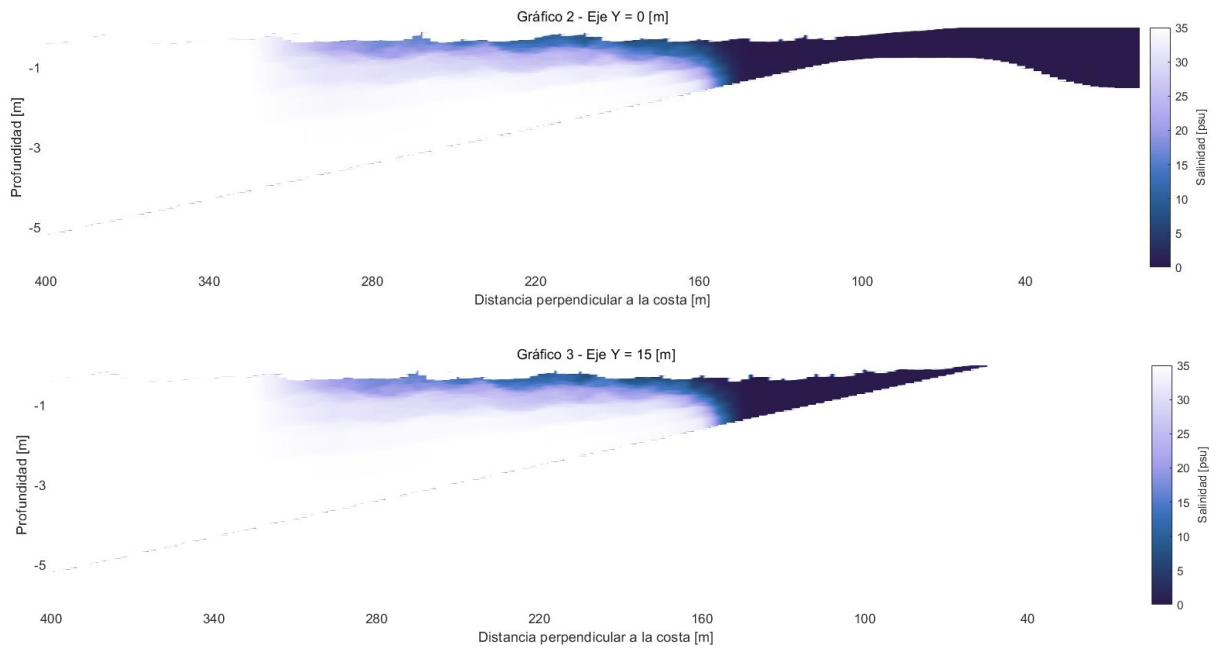


Figura 67: Esquema de capturas de la mezcla de la pluma a través del eje Y para caudal de salida de  $80 \text{ [m}^3/\text{s]}$ .

Fuente: Elaboración propia.