

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

DINÁMICA Y MEZCLA TURBULENTO DE PLUMAS DE RÍO EN SISTEMAS DE PEQUEÑA ESCALA

CRISTIÁN ESCAURIAZA.¹
MEGAN E. WILLIAMS.²

RESUMEN

Las plumas de río generan advección de agua dulce y mezcla vertical en zonas costeras, afectando la distribución de salinidad, nutrientes y sedimentos. Sin embargo, las interacciones turbulentas y mecanismos de mezcla en la zonas cercanas a la desembocaduras aún no se comprenden completamente. Para estudiar estos procesos, realizamos simulaciones numéricas directas (DNS) de los experimentos de Yuan y Horner-Devine (2013, 2017), resolviendo estructuras turbulentas bajo condiciones subcríticas y supercríticas, definidas a partir del número de Froude densimétrico.

El modelo incluye transporte de sal y sedimentos en suspensión, permitiendo analizar su efecto sobre la mezcla y la formación de estructuras coherentes. Los resultados muestran que, en condiciones supercríticas ($Fr = 2.14$), la mezcla se intensifica por inestabilidades de Kelvin-Helmholtz, mientras que en flujos subcríticos ($Fr = 0.5$) predomina la propagación horizontal. Un análisis energético global evalúa la producción de energía potencial de fondo. Además, se observa que los sedimentos se acoplan con vórtices, lo que sugiere mecanismos preferenciales de transporte. Estos resultados mejoran la comprensión del transporte y mezcla en plumas fluviales, incorporando efectos de sedimentos que son relevantes para sistemas costeros.

¹ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: cescauri@uc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Facultad de Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: megan.williams@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La descarga de plumas fluviales pequeñas en el océano genera advección horizontal de agua dulce a lo largo de la costa y promueve el intercambio vertical de agua de distinta densidad, y mezcla superficial. Estos procesos influyen directamente en la distribución de salinidad, nutrientes y sedimentos en zonas costeras, afectando tanto la dinámica física como los ecosistemas locales. Sin embargo, las complejas interacciones del flujo turbulento que gobiernan la dinámica la zona adyacente a la desembocadura del río, que se conoce como el campo cercano, y su dinámica a lo largo de la columna de agua que tiene influencia en múltiples escalas espaciales y temporales no han sido completamente caracterizadas desde el punto de vista físico.

Para entender los mecanismos que controlan el transporte y la mezcla en esta región crítica, en esta investigación realizamos simulaciones numéricas directas (DNS) de los experimentos de Yuan y Horner-Devine (2017). Estas simulaciones permiten resolver con detalle las estructuras turbulentas bajo condiciones subcríticas y supercríticas, enfocándonos específicamente en las características del frente de la pluma y las estructuras internas que se desarrollan cerca de la salida.

Además de estudiar la dinámica que se genera por la cantidad de movimiento de la pluma y los efectos de salinidad, también estudiamos los efectos del transporte de sedimentos desde el río. Sedimentos en suspensión en la pluma pueden incrementar la turbidez del agua costera y afectar procesos ecológicos, como la disponibilidad de luz o la dinámica de nutrientes en la columna de agua. Utilizando el modelo, incorporamos su efecto para entender las interacciones del transporte con las estructuras coherentes turbulentas generadas por la pluma. Nuestro objetivo principal es comprender los mecanismos de transporte y mezcla en estos sistemas complejos y evaluar los efectos de la cantidad de movimiento y de la diferencia de densidad generada por la salinidad y los sedimentos.

2. METODOLOGÍA

Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes bajo la aproximación de Boussinesq, ecuaciones (1) y (2), utilizando discretizaciones de segundo orden en espacio, mediante un esquema de volúmenes finitos. Las simulaciones se realizan mediante un código numérico que emplea un esquema de compresibilidad artificial de segundo orden en tiempo y en el espacio (Barros et al. 2025), lo que permite capturar con alta precisión la evolución de las estructuras del flujo.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\rho g}{\rho_0} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

Los experimentos de Yuan y Horner-Devine (2013, 2017) incluyen múltiples casos con diferentes condiciones características de la pluma respecto a su velocidad y diferencia de densidad con respecto al estanque de agua salada en reposo. Cada caso simulado se caracteriza por el número de Reynolds de la pluma, y por el número de Froude densimétrico Fr , que considera la gravedad reducida por la diferencia de densidad.

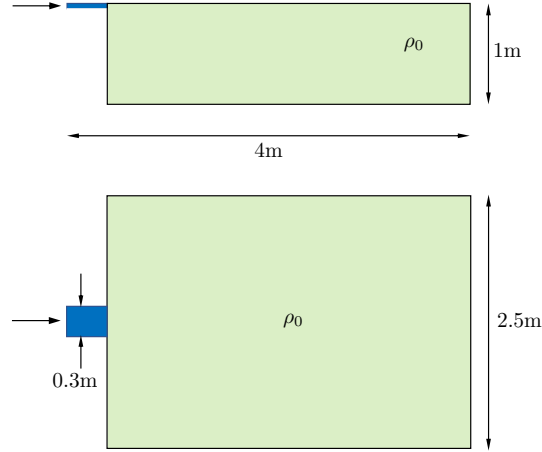


Figura 1: El dominio computacional y los parámetros que definen al flujo están basados en los experimentos de Yuan y Horner-Devine (2013, 2017), cuyas dimensiones se muestran en las vistas lateral y superior del flujo.

El dominio computacional incluye aproximadamente 40 millones de nodos distribuidos en una malla tridimensional. La condición de entrada corresponde a un flujo desarrollado completamente en el canal de entrada, lo que permite representar adecuadamente la zona de descarga del río. Además de la ecuación de advección-difusión para la sal, ecuación (3), el modelo también incluye una ecuación de transporte adicional para la concentración de sedimentos en suspensión, ecuación (4), acoplada a la dinámica del flujo. Esta ecuación permite representar la dinámica del sedimento y sus efectos sobre la mezcla e interacción con vórtices y capas de corte que se generan en el flujo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + (u_j - w_s \delta_{j3}) \frac{\partial C_s}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

donde w_s es la velocidad de sedimentación de las partículas.

La densidad del fluido en cada instante de tiempo, y cada punto del espacio, se calcula a partir de la concentración de agua del río C , de la concentración de sedimentos C_s :

$$\rho = (1 - C - C_s)\rho_0 + C\rho_1 + C_s\rho_s \quad (5)$$

donde ρ_0 , ρ_1 y ρ_s corresponden a la densidad del océano, el agua de la pluma, y del sedimento, respectivamente.

3. RESULTADOS

El modelo captura de forma precisa la dinámica del transporte y la mezcla dentro de la pluma. En particular, se observan diferencias marcadas en la estructura vertical y la dispersión horizontal bajo condiciones de Froude subcríticas y supercríticas, como se muestra en la Figura 2.

En el caso supercrítico simulado ($Fr=2.14$), el flujo desarrolla inestabilidades de Kelvin-Helmholtz en la interfaz, así como estructuras secundarias alineadas con la dirección del flujo que se generan de forma continua cerca de la superficie. Estas estructuras inducen una mayor mezcla vertical y controlan el transporte de masa en la zona de máximos gradientes de densidad, intensificando el crecimiento de la pluma.

Por otro parte, en el régimen subcrítico ($Fr=0.5$), la dinámica es más suave y el frente de la pluma se desplaza con menor energía, lo que reduce la mezcla vertical y favorece una mayor propagación horizontal de la pluma superficial.

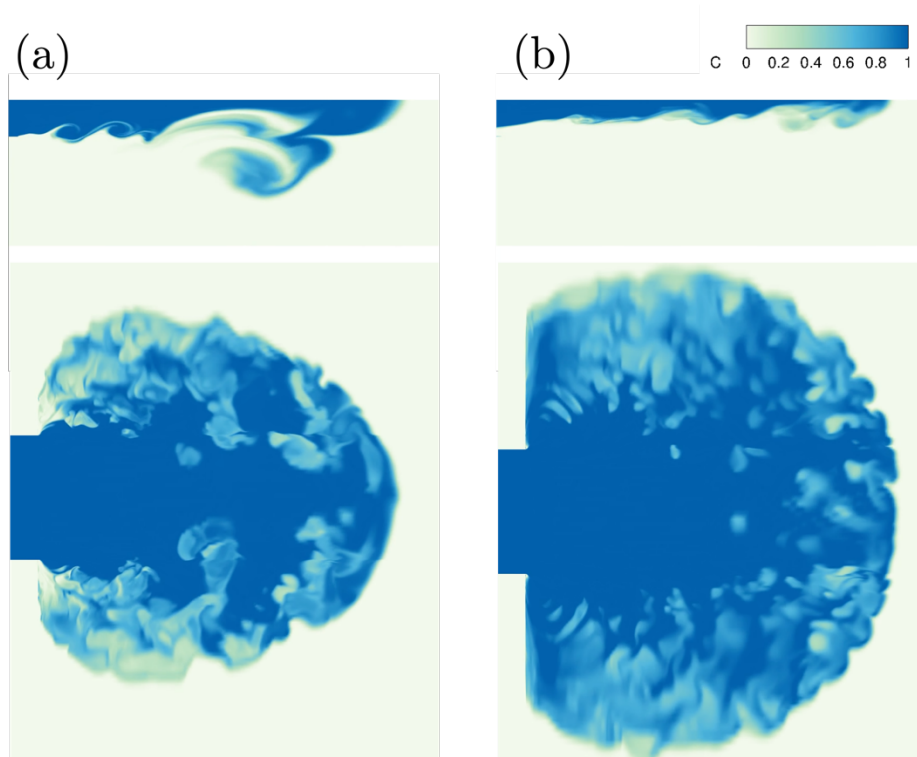


Figura 2: Concentración volumétrica instantánea vertical y en la superficie libre de agua dulce. (a) $Fr = 2.14$; (b) $Fr = 0.50$.

También se realiza un análisis energético global (Winters et al., 1995), evaluando la evolución de la disipación turbulenta y de la energía potencial de fondo (BPE), como métricas del grado de mezcla alcanzado en cada caso. En la Figura 3 se muestra la evolución de la producción de energía potencial de fondo, cuya tasa relativa muestra que se mantiene con valores aproximadamente constantes, con un leve incremento en caso subcrítico.

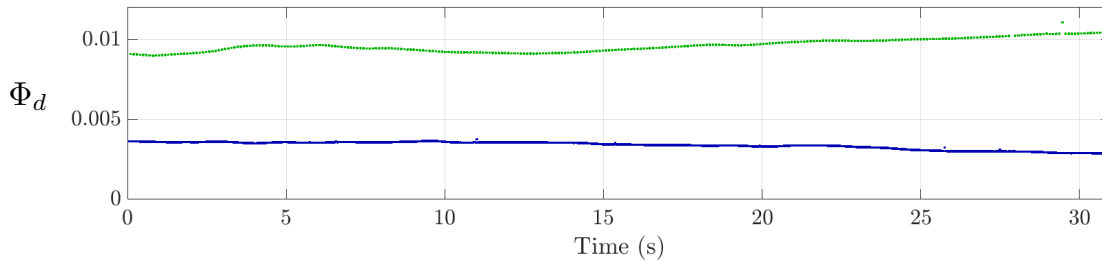


Figura 3: Producción de BPE como medida de mezcla para el caso supercrítico en color azul ($Fr=2.14$) y subcrítico en color verde ($Fr=0.5$), definida para todo el dominio de acuerdo a las ecuaciones de balance de Winters et al. (1995).

La inclusión de sedimentos permite observar cómo su presencia modifica localmente la densidad del fluido y por lo tanto la generación de estructuras coherentes turbulentas. En particular, se identifican zonas donde la concentración de sedimentos está acoplada con vórtices, lo que sugiere mecanismos preferenciales de transporte de sedimentos al interior de la pluma, como se muestra en la Figura 4.

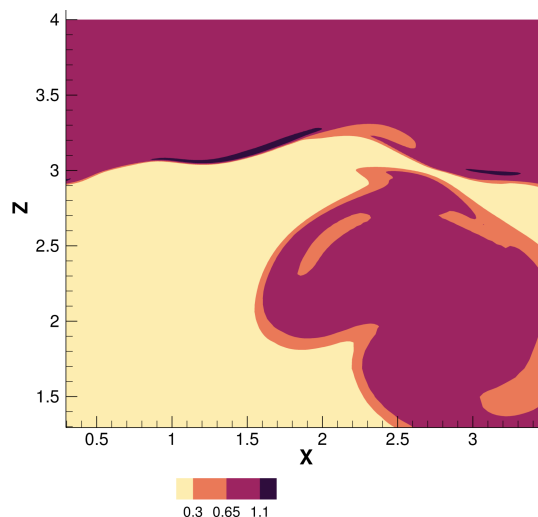


Figura 4: Imagen local de la concentración de sedimentos en la interfaz de la pluma, indicando zonas de alta concentración en la ubicación de vórtices.

4. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado permite capturar con alta resolución la dinámica una pluma fluvial en la zona cercana a la desembocadura, resolviendo las escalas fundamentales responsables del transporte de masa y momento. La simulación numérica directa permite identificar con precisión las estructuras coherentes que gobiernan la mezcla vertical, el intercambio de masa y la evolución del frente de la pluma.

En la presentación se discutirán los parámetros adimensionales que controlan la estructura de la pluma, analizando en detalle el desarrollo de inestabilidades y su rol en la modulación de flujos densos y estratificados. La descripción cuantitativa de los flujos de densidad, la disipación de energía y la evolución de la mezcla permitirá establecer mecanismos fundamentales de transporte y dispersión en sistemas fluviales costeros.

Adicionalmente, se presentarán los efectos que generan los sedimentos en suspensión sobre la dinámica de la pluma, analizando cómo su presencia puede alterar las tasas de mezcla y las escalas de las estructuras turbulentas dominantes. Esta información es clave para entender procesos de transporte sedimentario y su impacto ecológico en zonas costeras influenciadas por descargas fluviales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto ONR-Global N62909-23-1-2004. Se agradecen los recursos computacionales provistos por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

REFERENCIAS

Barros, M., & Escauriaza, C. (2024). Lagrangian and Eulerian perspectives of turbulent transport mechanisms in a lateral cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, 984, A1.

Barros, M., Vinkovic, I., & Escauriaza, C. (2025). Momentum and energy dynamics across scales in the flow over a rough bed with an array of boulders. *Journal of Fluid Mechanics*, 1014, A21.

Winters, K. B., Lombard, P. N., Riley, J. J., & D'Asaro, E. A. (1995). Available potential energy and mixing in density-stratified fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, 289, 115-128.

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

Yuan, Y., & Horner-Devine, A. R. (2017). Experimental investigation of large-scale vortices in a freely spreading gravity current. *Physics of Fluids*, 29(10).