

CONFLUENCIA DE FLUJOS GEOFÍSICOS EN PRESENCIA DE DISTINTOS CONTRASTES DE DENSIDAD

Rocío Luz Fernandez

Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba
Bv. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina, Tel/Fax: +54 3541 437009
E-mail: rocioluz@efn.uncor.edu - Web: <http://www.lh-efn.com.ar>

RESUMEN

Se describe una investigación experimental de la interacción entre dos corrientes de gravedad conformadas por dos volúmenes finitos de fluido denso que se trasladan sobre un plano inclinado. Los experimentos incluyen distintos grados de contraste en la densidad de las corrientes. Durante los experimentos, la corriente tipo 'ola' de menor densidad es alcanzada por la de mayor densidad debido a su mayor velocidad. En la interacción, se observan dos tipos de procesos característicos: *i)* si el contraste de densidades es grande entre los volúmenes finitos de fluido, la 'ola' más densa se traslada hacia el frente de la corriente como una intrusión sin verificarse un proceso de mezcla significativo; *ii)* si el contraste de densidades es pequeño, durante la interacción ambas 'olas' de fluido se mezclan dando origen a una corriente de densidad homogénea. Una parameterización de la energía involucrada en la interacción de las corrientes permite evaluar las condiciones en las cuales ocurren los dos mecanismos posibles observados durante la interacción.

ABSTRACT

This paper describes laboratory investigations of the motion between two fixed volumes of dense fluid (surge-type gravity currents) with different salt concentrations that interact above an incline in presence of ambient stratification. The experiments include both large and small density contrasts between the interacting surges. Initially, the propagation of each fluid mass assumes a thermal like nature, but then the lower density surge is quickly caught up by the denser fluid flow because of its higher velocity. There are two key processes regarding the surge interaction. With a large density contrast the fluid volumes, the denser flow moves to the front of the current as an intrusion with no mixing. With a small density difference, pronounced mixing occurs between the surges with the development of a homogeneous underflow. A simple energy parameterization is developed to evaluate the source conditions under which the different flow dynamics develop.

INTRODUCCIÓN

Puesto que las corrientes de densidad ocurren en muchas y diferentes situaciones naturales y pueden también ser ocasionados por el hombre, la caracterización de sus propiedades es de importancia para muchas disciplinas científicas: flujos de intercambio en estuarios, descarga de sedimentos de los ríos en lagos y estuarios, descarga de desperdicios industriales en ríos, lagos u océanos, etc.

Asimismo, la caracterización de los procesos de mezcla aguas abajo de una confluencia de ríos plantea en ocasiones la modelación de la interacción de corrientes con distintas densidades, ya sea por diferencias en la temperatura del agua, en la carga de sedimento suspendido, etc.

El objetivo del presente estudio es el de complementar los trabajos experimentales sobre corrientes de densidad no estacionarias en cuerpos de agua estratificados (Fernandez e Imberger, 2006) para incluir la situación frecuente en la naturaleza de la interacción de dos volúmenes finitos de fluido de densidades distintas, o bien, de dos corrientes de gravedad tipo "ola", que se propagan a lo largo de un plano con pendiente moderada.

METODOLOGÍA

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Occidental de Australia, en la ciudad de Perth, Australia. Un esquema del equipamiento utilizado, sus dimensiones y el sistema de coordenadas adoptado se muestran en la Figura 1. Se utilizó un canal vidriado de 8m de largo (longitud efectiva $L = 7.2\text{m}$), 0.4m de profundidad y 0.6m de ancho; el ángulo de inclinación en todos los experimentos fue llevado a $\theta = 2.5^\circ$.

Los dos tanques que se observan en la Figura 1 fueron utilizados para la preparación del fluido con dos concentraciones distintas de sal. Una vez preparada la mezcla de agua, sal y tinta (utilizada como trazador visual) en cada reservorio, se procedió al bombeo del fluido preparado y a su descarga dentro del canal principal; la operación del reservorio (1) permitió la generación del flujo tipo ola (1), mientras que con el segundo reservorio se dio origen a la ola (2). A fines de minimizar el momento del líquido descargado, se dispuso de un grupo de difusores a lo ancho y en el fondo del canal, todo este conjunto de difusores dispuestos dentro de una cámara de ingreso que se llenó con goma espuma.

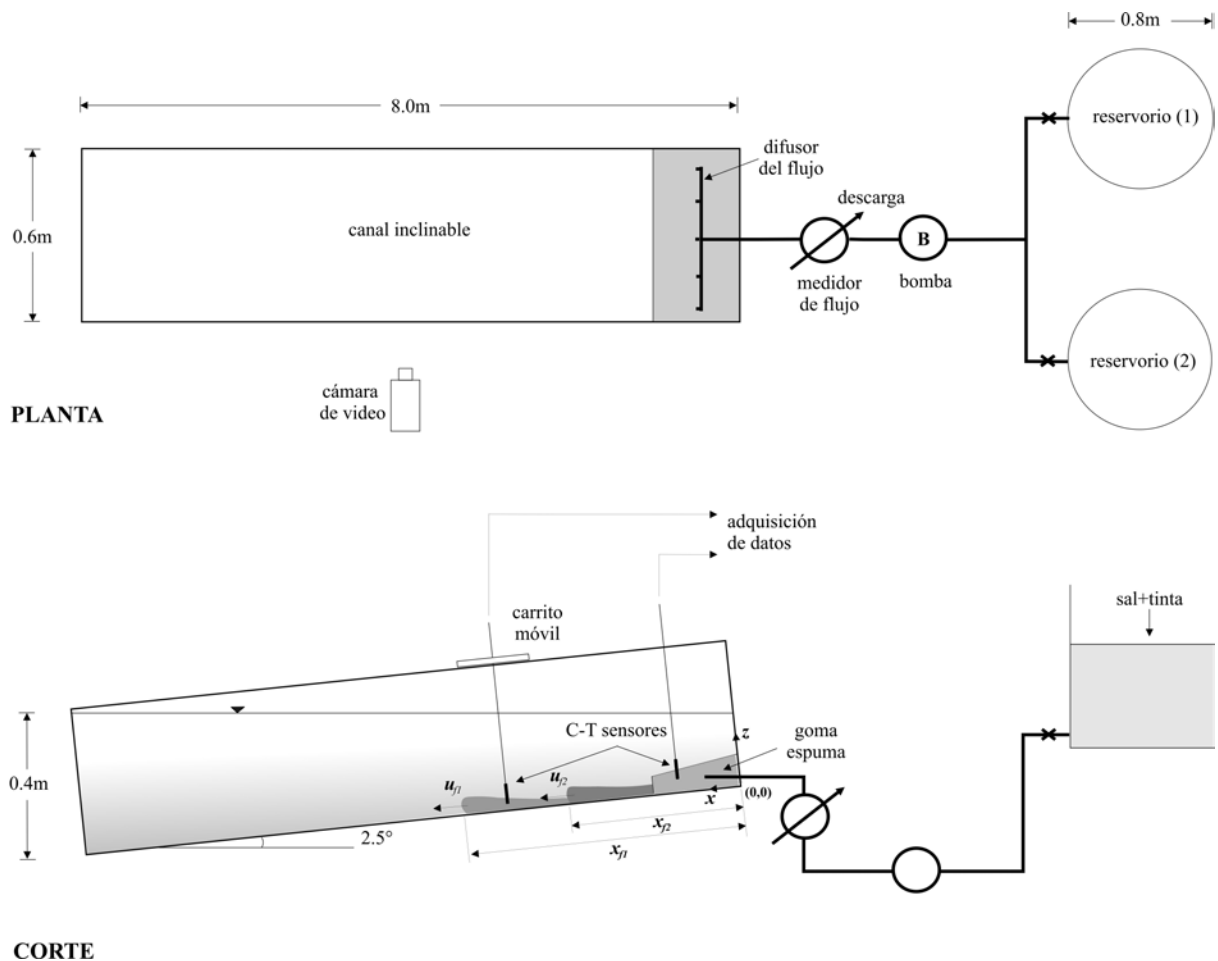


Figura 1.- Esquema de la instalación experimental.

Durante un experimento dado, un duplo de sensores de respuesta de baja frecuencia (Precision Measurement Equipment, PME) fueron utilizados para las mediciones de temperatura-conductividad de las corrientes de densidad descargadas: uno de los sensores fue

montado en un carro móvil localizado sobre el canal (con capacidad de desplazarse en toda la longitud del mismo) mientras que el segundo sensor fue instalado dentro de la cámara de ingreso y permaneció fijo en su posición durante todo el experimento. La descarga fue fijada a una tasa constante por unidad de ancho del canal ($q = 7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y estuvo formada por dos descargas de fluido de corta duración (~ 40 segundos), con distintas concentraciones de sal y color de tinta, a fines de la identificación visual de cada una de ellas. Así, al término de la descarga de la primer ola de fluido (con una densidad y coloración dada), luego de un corto tiempo (~ 30 segundos), la válvula del segundo tanque circular fue abierta permitiendo de esta manera la descarga de la segunda ola de fluido. Ambos, el tiempo transcurrido entre una y otra descarga y la densidad de cada ola de fluido, o corriente de densidad, estuvieron diseñados de manera de garantizar la interacción entre los flujos dentro de la longitud finita del canal usado. Claramente las dos corrientes de gravedad quedaron diferenciadas por los dos colores de tinta usados como trazador. La evolución de los flujos y propagación a lo largo del canal fueron registrados mediante una combinación de video y fotografías para su posterior análisis.

La densidad de la ola (1), primer flujo en ingresar al canal, permaneció prácticamente igual durante todos los experimentos. Por lo contrario, la densidad de la ola (2) se mantuvo en el rango $1028 < \rho < 1055 \text{ kg m}^{-3}$, lo cual garantizó el análisis de una gran variedad de contrastes de densidad entre las corrientes generadas. Debido a que predominaron sólo dos comportamientos distintos de todos los contrastes de densidad ensayados, el siguiente análisis hace referencia solo a dos configuraciones experimentales tipo: “Contraste I”, que representa al grupo de experimentos en los que se empleó una diferencia de densidades $\Delta\rho$ pequeña entre flujos (ejemplo “run A”), y “Contraste II”, que caracteriza a los experimentos que utilizaron una diferencia grande de densidades entre flujos interactuantes (ejemplo “run C”). Los resultados observados para el resto de los experimentos realizados fueron cualitativa y cuantitativamente similares a estos dos casos seleccionados, por lo que la Tabla 1 lista los parámetros experimentales sólo para run A y run C.

Tabla 1.- Parámetros experimentales de ensayos distintivos.

Run	$\Delta\rho$ (kg m^{-3})	Máx. vel. alcanzada (m s^{-1})	Distancia de confluencia de flujos (m)
A	11	0,026	4,5
C	32	0,046	2,8

RESULTADOS

La propagación de las corrientes incluyó tres etapas: *i*) propagación en forma de flujo aislado (Figura 2a y 2b), *ii*) confluencia (Figura 2c y 2d) y *iii*) de los flujos, resultando la mezcla entre flujos (Figura 2e.1) o no (Figura 2e.2) luego de la interacción de las olas. En la primera etapa, la corriente de densidad tipo ola propagó en forma aislada sobre el fondo del canal, hasta que fue alcanzada por la segunda ola debido a su mayor densidad, y en consecuencia, su mayor velocidad de propagación. La diferencia en las densidades entre los flujos fue el factor gobernante en la interacción, tal como lo sugiere la Figura 2e. Así, en presencia de un contraste de densidad pequeño, la ola (2) se introdujo a través de la ola (1) para mezclarse en la parte frontal de la misma, y para formar luego de la confluencia un flujo homogéneo que siguió propagándose por el fondo del canal. Contrariamente, en presencia de un contraste de densidad grande, la ola (2) relativamente más densa y con mayor velocidad de propagación,

se introdujo en la ola (1) para atravesarla y luego continuar como el nuevo frente de la corriente de gravedad; en este último caso ocurrió un cambio de frente de la corriente de gravedad y la mezcla fue insignificante durante la confluencia de los flujos.

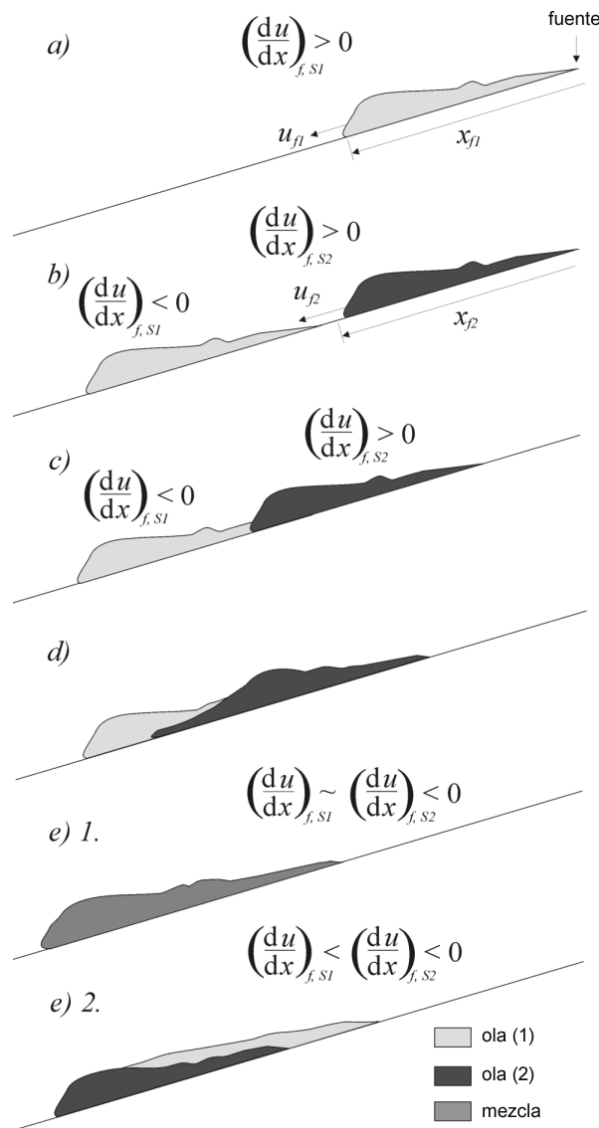


Figura 2. Esquema de los mecanismos observados: a) primer flujo sobre la pendiente u ola (1), b) los dos flujos aún sin interactuar, c) el segundo flujo alcanza al primer flujo, d) confluencia de flujos, e) 1: corriente de densidad homogénea resultante de la interacción, e) 2: cambio de frente de la corriente de densidad.

Las dos naturalezas distintas observadas durante la interacción de los flujos se puede visualizar también en los perfiles de densidad medidos con los sensores posicionados en dos secciones distintas del canal: $x = 3.5\text{m}$ y $x = 6\text{m}$. Específicamente, la Figura 3a) muestra que para $t = 100$ segundos, el frente de la ola (1) alcanza el sensor ubicado a $x = 3.5\text{m}$, e inmediatamente lo hace la ola (2). Una vez que ambas olas se alejan de la sección, la densidad medida por este sensor decrece hasta el valor del fluido ambiente, es decir, $\bar{\rho}_a \sim 1017.5 \text{ kg m}^{-3}$. Con respecto al sensor ubicado aguas abajo, $x = 6\text{m}$, éste registra sólo un valor máximo de densidad sugiriendo que los flujos se han mezclado e integrado en una sola corriente de densidad en la distancia $3.5 < x < 6 \text{ m}$. Por lo contrario, los perfiles de densidad de la Figura 3b) sugieren una muy distinta dinámica para el caso de “Contraste II”. Aquí, en coincidencia

con las observaciones experimentales, las mediciones de densidad a partir del sensor fijo en $x = 4\text{m}$ claramente sugieren la existencia de un cambio de frente en la corriente de densidad, quedando la ola (2) ahora el frente de la misma.

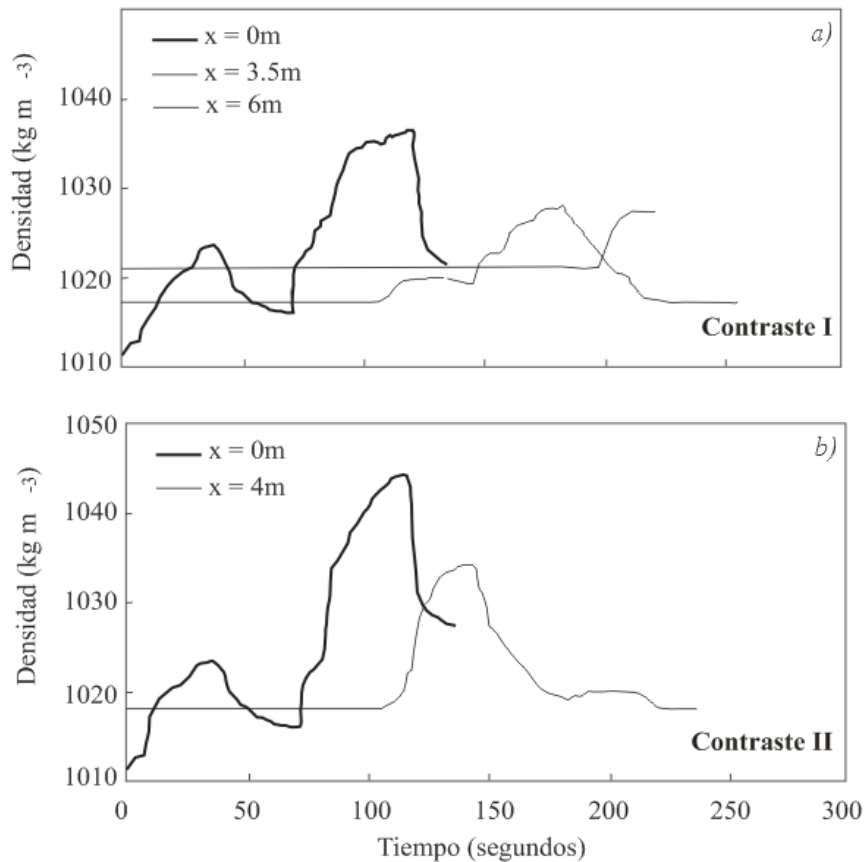


Figura 3. Esquema de los mecanismos observados.

PARAMETERIZACIÓN

A lo largo de la distancia previa a la sección de confluencia de los flujos

En la Figura 2 los parámetros que gobiernan al sistema son las densidades de cada ola, ρ_{s1} y ρ_{s2} , donde los subíndices refieren a la ola (1) y (2), respectivamente; la diferencia en densidad entre los flujos, $\Delta\rho$, la densidad relativa (considerada igual a la densidad en la superficie del reservorio) $\rho_r = 1000 \text{ kg m}^{-3}$, la aceleración de la gravedad, g , el volumen inicial por unidad de ancho de cualquiera de las dos olas de fluido, V_0 , la altura media de estos flujos, d , la distancia desde el punto de descarga al frente de la corriente, x_f , y el tiempo medido desde la primer descarga de flujo, t . En todos los experimentos se mantuvo $d \sim 0.08\text{m}$, y las corrientes de gravedad se propagaron bajo un régimen subcrítico en el cual el número de Froude fue menor a $1/\pi = 0.318$ (ver Tabla 1), pero con una relación de submergencia d/H relativamente profunda de 0.4-0.5, que permitió considerar que las perturbaciones del fluido ambiente fueron insignificantes al movimiento de las olas (Long 1955, Simpson 1997, Maxworthy *et al.* 2002).

Inmediatamente luego de la descarga, las corrientes de densidad se aceleraron hasta su máxima velocidad y luego se desaceleraron, tal como se indica en la Figura 2. Debido a que las corrientes de densidad fueron descargadas con una velocidad inicial próxima a la máxima ($u_0 \sim 0.7 u_{max}$) (ver Tabla 1), la fase de aceleración fue relativamente corta con respecto a la fase de desaceleración, y no relevante en el siguiente análisis.

Así, luego de una cierta distancia x del punto de descarga, cuando el frente del flujo (2), más denso, alcanza el flujo (1) (Figura 2d), se puede escribir

$$x_I = x_{f,S1} = x_{f,S2} \quad ; \quad t_I = t_{S1} = t_{S2} + \tau \quad (1)$$

donde x_I indica la distancia desde la fuente a la sección aguas abajo en la cual flujos interactúan, y t_I , el tiempo desde el comienzo del experimento al instante en el que se produce la interacción de las olas. A partir de las observaciones experimentales, y basado en lo sugerido por Beghin *et al.* (1981), es posible considerar que cada ola o corriente de densidad puede ser modelada como la de una corriente discontinua, tipo “thermal”, de forma constante, a lo largo de la distancia antes de la interacción, $x \leq x_I$. De esta manera, la posición del frente de la corriente respecto al tiempo transcurrido queda expresado por

$$x_f(t) = \alpha (g'_0 V_0)^{1/3} t^{2/3} \quad (2)$$

donde el valor del coeficiente es $\alpha = 2.6 \pm 0.2$ cuando el ángulo de la pendiente varía en el rango de $1^\circ < \theta < 50^\circ$, y se reduce gradualmente para incrementos de θ (ver Beghin *et al.* 1981, Laval *et al.* 1988, Hopfinger 1983). Debido a que el volumen descargado para cada ola es el mismo ($V_0 = 0.04 \text{ m}^3$), de las ecuaciones (2) y (3) resulta que $(g'_{0,S1})^{1/2} t_{S1} = (g'_{0,S2})^{1/2} t_{S2}$, lo que define

$$\Delta^* = \frac{(\rho_{S1} - \rho_r)}{(\rho_{S2} - \rho_r)} = \left(\frac{t_{S2}}{t_{S1}} \right)^2 \quad (3)$$

y por tanto, el tiempo a la interacción de las olas, t_I , se expresa

$$t_I = \frac{\tau}{1 - \sqrt{\Delta^*}} \quad (4)$$

y la distancia a la sección donde interactúan ambos flujos, x_I ,

$$x_I = \alpha (g'_0 V_0)_{S1}^{1/3} \left(\frac{\tau}{1 - \sqrt{\Delta^*}} \right)^{2/3} \quad (5)$$

en la cual Δ^* es la relación boyante adimensional, o bien, la relación de las diferencias de densidades entre flujos para cualquier experimento; típicamente en este estudio $\Delta^* \sim 10^{-1}$. Cabe destacar que Δ^* es simplemente la densidad del flujo menos denso dividido por la densidad del flujo más denso, en referencia a la densidad correspondiente a la superficie del reservorio. Así, para un contraste de densidad considerable entre los flujos, Δ^* resulta un

valor pequeño; por lo contrario, cuando el contraste de densidad es mínimo, el valor de Δ^* se aproxima a la unidad. Durante los experimentos, la densidad de los flujos en una sección dada, entre la fuente y la sección en la que interactúan los flujos, se considera que permanece constante e igual al valor inicial (dado que el transporte vertical o coeficiente de “entrainment” es despreciable debido a la pendiente de fondo pequeña coeficiente de fricción en el fondo despreciable).

En el presente trabajo, los valores de g'_0 se escogieron en el rango de $0.177 < g'_0 < 0.538 \text{ m s}^{-2}$, resultando un valor característico de $\Delta^* \sim 0.6$ para el “Contraste I” y de $\Delta^* \sim 0.36$ para el “Contraste II”. De las ecuaciones (4) y (5), respectivamente, $t_I \sim 160$ segundos, $x_I \sim 4$ m, para el “Contraste I”, y $t_I \sim 100$ segundos, $x_I \sim 2.8$ m, para el “Contraste II”.

Los valores estimados de x_I fueron usados en la Figura 4 para graficar la distancia adimensional alcanzada por los flujos, $x^* = x_f/x_I$, a diferentes tiempos, $t^* = (g'_0 V_0/x_f^3)^{1/2} t$. El colapso de los puntos que describen la propagación de las corrientes de densidad en el tiempo inicial para los dos tipos de experimentos “Contraste I” y “Contraste II”, indica que la expresión (2) correspondiente a la propagación de un flujo de volumen finito modela adecuadamente a los flujos antes de la interacción. El colapso de la parameterización para distancias $x^* > 1$, valida la ecuación (5) en la predicción de la distancia a la interacción de ambos flujos x_I como una función de los parámetros en el punto de descarga o fuente, $g'_{0,S1}$, $g'_{0,S2}$, V_0 and τ .

Parameterización de la confluencia de los flujos

Existiendo un contraste $\Delta\rho$ entre las corrientes de densidad, los resultados experimentales indicaron que existen dos mecanismos posibles durante la confluencia de dichos flujos. Para un valor pequeño del contraste, la ola (2) se introduce a través de la ola (1) mezclándose ambos volúmenes de fluido para producir una corriente de densidad homogénea. Por lo contrario, si la diferencia en densidad es grande, la ola (2) se introduce en la ola (1) y la atraviesa sin mezclarse significativamente. En este último caso, se observa un cambio de frente de la corriente de densidad, con la ola (2) conformando la cabeza de la corriente de gravedad al final del experimento.

Considerando que la intensidad de la turbulencia en estas corrientes de fondo modeladas es proporcional a la velocidad de corte u_* (Fischer, 1979 y otros); la relación entre los efectos estabilizadores de la fuerza boyante (que está en función de $\Delta\rho$) y la energía disponible para la interacción de los flujos queda definida a través de la relación de energías

$$R_E = \frac{(\Delta\rho/\rho_1) gdL}{\Delta t u_*^3} \quad (6)$$

donde Δt es el tiempo durante el cual los flujos interactúan al confluir (calculado a partir de la diferencia de velocidades de las corrientes, $\Delta t = L/\Delta u$), ρ_1 es la densidad de la ola (1), L es la longitud típica de la ola ($\sim 40\text{cm}$), y d es la altura de la misma. La velocidad u_* fue

determinada basado en el balance de fuerzas del flujo como $u_* = (g'_{0,S1} S d)^{1/2}$ (ver Henderson 1966 por ejemplo), donde S es la pendiente de fondo. La ecuación (6) sugiere que a medida que el contraste de densidad se reduce entre los flujos que confluyen, la eficiencia estabilizadora del gradiente de densidad es insuficiente frente a la energía disponible para la mezcla durante la confluencia. Por el contrario, si $\Delta\rho$ es grande, el efecto estabilizador del contraste de densidad entre olas se incrementa al mismo tiempo que la energía disponible para la mezcla disminuye; en este caso se observa que el flujo más denso atraviesa al menos denso sin existir una mezcla significativa entre ambos flujos.

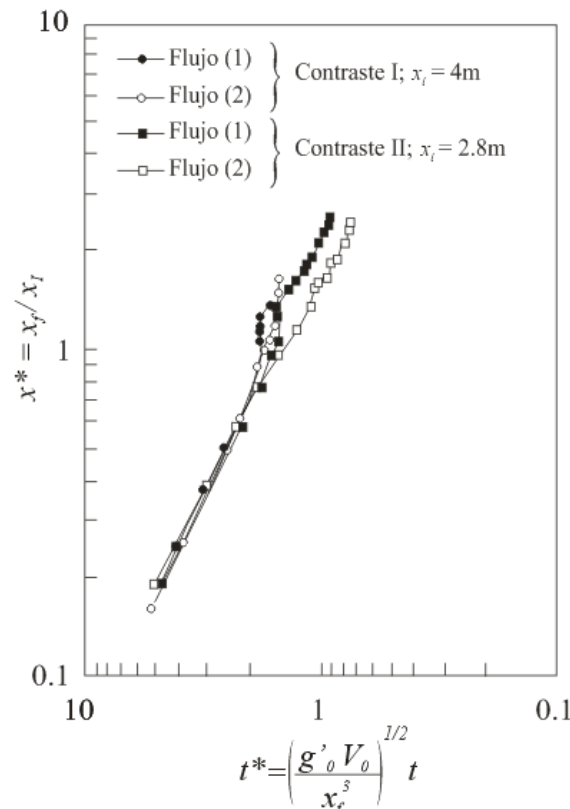


Figura 4. Distancia versus tiempo para los experimentos tipo Contraste I y Contraste II. La desviación de los datos de la línea recta indica el comportamiento de los flujos luego de la interacción.

El valor de la relación R_E incrementa con el valor de $\Delta\rho$ (Figura 5). Basado en las observaciones de laboratorio, entre los experimentos “Contraste I” y “Contraste II”, se concluyó que la transición entre los dos mecanismos observados y posibles ocurrió en el rango de valores $5 < R_E < 10$. Dado que la diferencia en densidades controla la naturaleza de la interacción, R_E y la relación adimensional de densidades $\Delta^* = (\rho_1 - \rho_r) / (\rho_2 - \rho_r)$, puede ser utilizada para caracterizar el tipo de mecanismo a ocurrir tal como lo sugiere la Figura 6; ρ_2 refiere a la densidad de la ola (2) y ρ_r la densidad de referencia. En términos de Δ^* , la transición entre mecanismos ocurrió para $0.4 < \Delta^* < 0.5$.

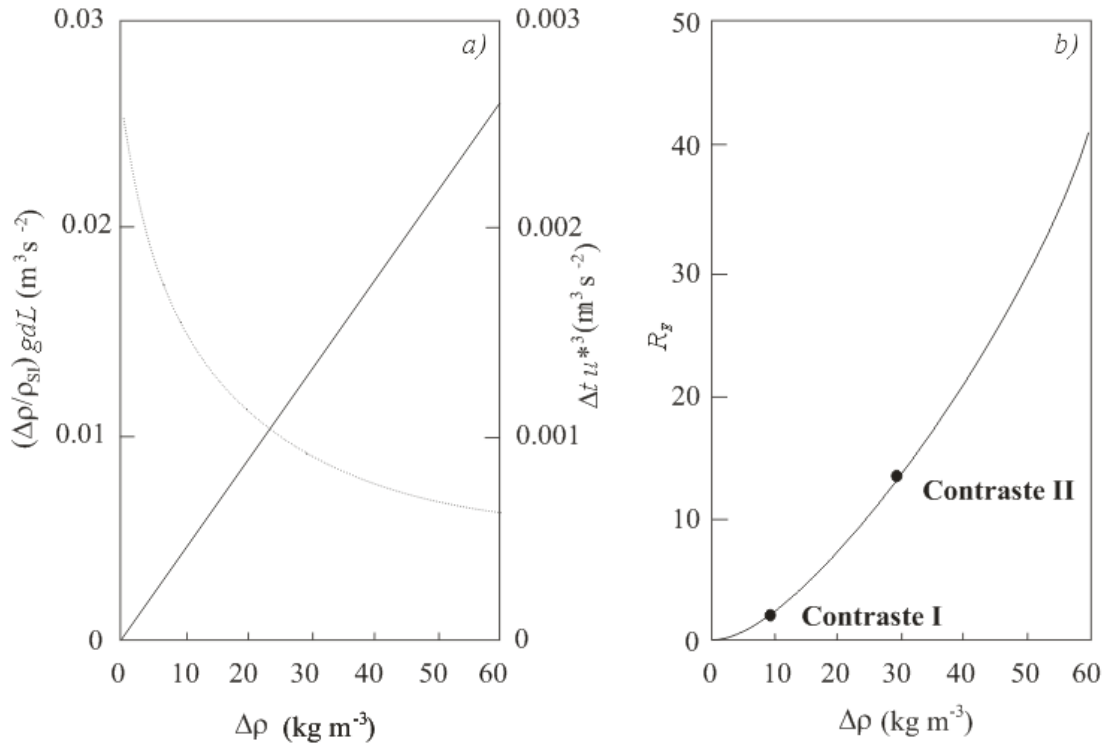


Figura 5. La variación del parámetro R_E observada en *b)* puede ser entendida en términos de las tendencias mostradas en *a)*, la cual muestra el numerador de la ecuación (6), $(\Delta\rho/\rho_1) gdL$ (línea continua) y el denominador de la Ecuación (6), $\Delta t u_*^3$ (línea entrecortada). Los experimentos Contraste I y Contraste II sugieren valores entre $5 < R_E < 10$ para la transición entre los dos mecanismos observados en la confluencia de los flujos.

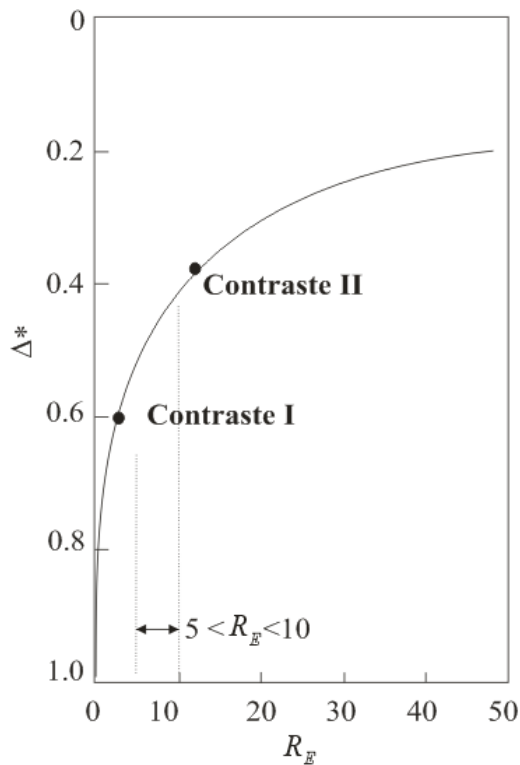


Figura 3. Δ^* en función del parámetro R_E .

CONCLUSIONES

La parameterización de la confluencia de flujos con distintos contrastes de densidad permitió establecer dos mecanismos claros: *i*) para diferencias pequeñas ($\Delta^* > 0.5$), los dos flujos tipo ola confluyen y mezclan produciendo una corriente homogénea; y *ii*) para diferencias grandes ($\Delta^* < 0.4$), la mezcla entre flujos es mínima y ocurre un cambio de frente de la corriente de densidad durante la confluencia de los flujos.

Las observaciones experimentales permiten caracterizar el mecanismo de interacción y posible grado de mezcla durante la confluencia de dos flujos con distintas densidades.

Agradecimiento. Los experimentos fueron realizados mientras R. Fernandez concluía con una Beca Internacional de Investigación otorgada por la Univ. de Australia Occidental. Se agradece muy en especial a los Profesores J. Imberger y G. Ivey por los aportes al trabajo y permiso al uso de las instalaciones del Lab. de Hidráulica de dicha Universidad, respectivamente.

LISTA DE SÍMBOLOS

d:	profundidad media del flujo
Fr:	Número de Froude densimétrico
g:	aceleración de la gravedad
g' :	aceleración reducida de la gravedad
H:	profundidad del fluido en el canal
q:	descarga por unidad de ancho del canal
Re:	Número de Reynolds
R_E :	parámetro definido por ecuación (6)
t:	tiempo transcurrido del inicio del experimento
u:	velocidad media de la ola
V:	volumen del flujo ola
w:	ancho del canal
x:	coordenada en dirección longitudinal
z:	coordenada en la dirección vertical
θ :	ángulo del fondo del canal
Δu :	diferencia en velocidad entre los flujos
$\Delta \rho$:	diferencia en densidad entre los flujos
Δ^* :	relación de densidades dado por ecuación (3)
ρ :	densidad del flujo tipo 'ola'
ρ_i :	densidad en el punto de descarga
ρ_r :	densidad de referencia
v:	viscosidad cinemática
τ :	tiempo entre flujos tipo ola

Los siguientes subíndices son usados en este trabajo

- f refiere al frente del flujo tipo ola
 $S1, S2$ refieren ola (1) and (2), respectively
 0 refiere a las condiciones iniciales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beghin, P., Hopfinger, E. and Britter, R. (1981). “Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries”. *J. Fluid Mech.*, 107, 407-422.

Fernandez, R. L. e Imberger, J. (2007): “Time-varying underflow into a continuous stratification with bottom slope”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 134, No. 5, pp. 636-643.

Fischer, H., List, E., Koh, R, Imberger, J. y Brooks, N. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, Inc. Pp. 483.

Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan series, pp. 522.

Hopfinger, E. (1983). “Snow avalanche motion and related phenomena”. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 15, 47-76.

Laval, A., Cremer, M., Beghin, P. and Ravenne, C. (1988). “Density surges: two-dimensional experiments”. *J. Sedimentology*, 35, 73-84.

Long, R. R. (1955). “Some aspects of the flow of stratified fluids, III. Continuous density gradients”. *Tellus*, 7 (3), 341-357.

Maxworthy, T., Leilich, J., Simpson, J. and Meiburg, E. H. (2002). “The propagation of a gravity current in a linearly stratified fluid”. *J. Fluid Mech.*, 453, 371-394.

Simpson, J. E. (1987). *Gravity currents: in the environment and the laboratory*. Cambridge University Press, pp. 244.