

TÉRMICAS EN UN MEDIO ESTRATIFICADO LINEALMENTE

THERMALS IN A LINEARLY STRATIFIED MEDIUM

L.P. Thomas^{1*}, B.M. Marino¹, S.B. Dalziel²

¹ Instituto de Física Arroyo Seco, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina

² Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge
Wilberforce Road, Cambridge CB3 0WA, Reino Unido
lthomas@exa.unicen.edu.ar, bmarino@exa.unicen.edu.ar, sbdalziel@damp.cam.ac.uk

Estudiamos las ondas internas generadas por la liberación instantánea de una pequeña cantidad de fluido denso (o térmica) en el seno de un medio estratificado linealmente. A medida que el fluido denso desciende, su volumen crece debido al mezclado con el fluido del entorno a la vez que su densidad media disminuye. Este problema está relacionado con algunos mecanismos convectivos que tienen lugar en los niveles inferiores de la atmósfera terrestre. La técnica schlieren sintético junto con el procesamiento digital de las imágenes que emplea un software especialmente diseñado nos permiten obtener información cuantitativa y medir los parámetros relevantes. Introducimos un procedimiento experimental útil para visualizar la evolución del gradiente bidimensional de densidad de ambos fluidos hasta que la térmica alcanza una altura de equilibrio donde se derrama como un corriente de gravedad y mostramos los resultados para tres casos específicos.

Palabras Claves: ondas internas, térmica, procesamiento de imágenes, schlieren sintético

We study the internal waves generated by the instantaneous release of a small quantity of a dense fluid (or thermal) in a linearly stratified medium. As the dense fluid descends, its volume increases due to mixing with the surrounding fluid and its mean density diminishes. This problem is related to some convective mechanisms that take place in the lower levels of the Earth's atmosphere. The synthetic schlieren technique, together with the digital processing that uses a specialized software, allows obtaining quantitative information and accurate measurements of the relevant parameters. We introduce an experimental procedure useful to visualize the evolution of the two-dimensional density gradient for both fluids till the thermal reaches an equilibrium height and spreads as a gravity current, and show the results for three specific cases.

Key Words: internal waves, thermals, image processing, synthetic schlieren

I. INTRODUCCIÓN

Una *térmica*, *columna térmica* o *deriva vertical* (también, por influencia del inglés, *thermal* y *columna thermal*), es una columna de aire ascendente desde bajas altitudes de la atmósfera terrestre, causada por el desigual calentamiento de la superficie terrestre por la radiación solar, y es un ejemplo de convección. Las térmicas pueden formarse en cualquier lugar donde el aire sea apenas un par de grados más caliente que el del entorno. Hay térmicas sobre las montañas, campos y carreteras, en las cercanías a los grandes espejos de agua como ríos y lagos, etc. y suelen ser utilizadas por los pilotos de planeadores para ascender

El sol calienta el suelo, que a su vez calienta el aire por encima de él. Cuando una masa de aire caliente se acumula, se expande, se hace más liviano que la masa de aire circundante y asciende, pero mientras lo hace también se vuelve a enfriar debido a la expansión. Este proceso continuará hasta que esa masa de aire se enfría hasta la misma temperatura del aire que lo rodea, donde detiene su ascenso. Es común asociar con la térmica el flujo descendente del aire más frío circundante a la columna, desplazado desde el tope de la misma, y que

recibe el nombre de “descendente” en meteorología. El tamaño y la intensidad de las térmicas están influenciados por las propiedades del aire en los niveles bajos de la atmósfera. Puesto que los fluidos involucrados son miscibles, su volumen aumenta a medida que asciende a causa del mezclado. Las térmicas a veces se pueden detectar por la presencia de cumulus que se forman por la condensación del vapor de agua del aire que se enfría durante el ascenso y hace visibles las gotas.

Aquí es conveniente hacer la siguiente distinción basada en la importancia del factor (cantidad de movimiento, flotación, diferencia de densidad) que controla el movimiento del fluido ⁽¹⁾. Mientras usamos el término *térmica* para referirnos al flujo generado por la liberación instantánea desde el reposo de un volumen de fluido de densidad diferente a la de su entorno (ver Fig. 1), el término *pluma* describe al flujo generado por la incorporación continua de fluido en el que los efectos de la fuerza de flotación son más importantes que los de la cantidad de movimiento siendo ellos los que controlan el mezclado entre los fluidos. Cuando los efectos de la cantidad de movimiento predominan la

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia

pluma recibe el nombre de *chorro* (o *jet* en inglés). Las plumas son de considerable importancia en la dispersión de contaminantes.

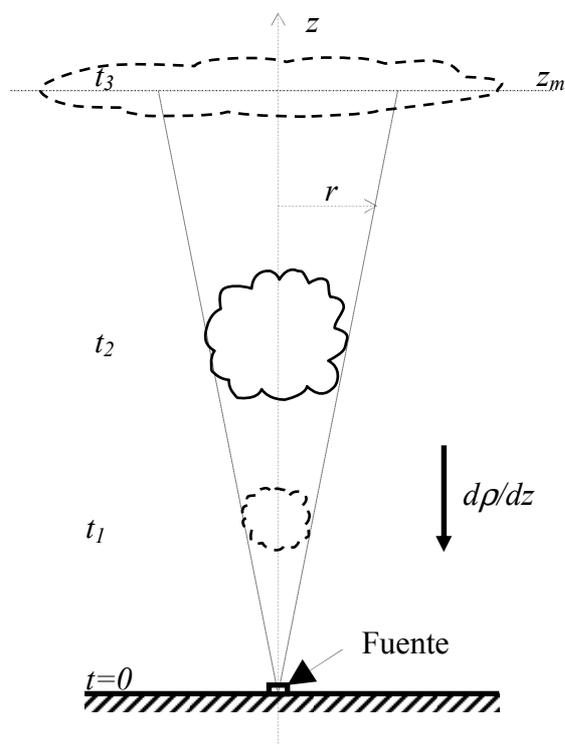


Figura 1: Evolución de una térmica ascendente.

Las ecuaciones de conservación para el caso de una térmica desplazándose en un fluido no estratificado fueron examinadas por Morton *et al.* ⁽²⁾ y el primer trabajo experimental fue realizado por Scorer ⁽³⁾ quien confirmó las predicciones del análisis dimensional. Cuando la diferencia de densidad entre la térmica y su entorno es pequeña, vale la aproximación de Boussinesq y el comportamiento global de la térmica no depende de si la misma está ascendiendo o descendiendo.

Scorer ⁽³⁾ mostró que una térmica en un medio homogéneo desarrolla una estructura autosimilar en la que la relación entre la posición z del frente y el radio máximo r alcanzado permanece constante, es decir $z = nr$ donde n es un parámetro empírico. Por tanto, la térmica desarrollará la forma de un cono a medida que se desplaza (figura 1). En general, la térmica no comienza a moverse con una estructura autosimilar y el cono se extiende más allá del vértice hasta un punto llamado "origen virtual". Así, la posición del frente medida desde el punto de liberación debe corregirse para comparar los resultados de los experimentos con la teoría ^(4,5).

Puesto que la liberación tiene lugar desde el estado de reposo, la cantidad de movimiento inicial es cero y entonces el movimiento es enteramente debido a las fuerzas de flotación. A medida que la térmica se desarrolla se mezcla con el fluido ambiente, su densidad disminuye y su volumen aumenta, pero en un fluido ambiente homogéneo el exceso de la flotación total

permanece constante. Entonces, la relación entre la posición del frente y el tiempo t , es:

$$kz^2 = t, \quad \text{con} \quad k = \frac{\sqrt{m}}{2nF\sqrt{g_0V_0}},$$

siendo m otro parámetro empírico, F es el número de Froude, V_0 es el volumen liberado y g_0 es la gravedad reducida inicial.

Recientemente, Hart & Dalziel ⁽⁶⁾ reportaron los resultados preliminares del estudio de la interacción de múltiples térmicas muy próximas la una a la otra generadas simultáneamente en un medio no estratificado. Ellos encontraron que la separación inicial entre las fuentes es un parámetro importante a considerar y que la interacción entre las térmicas es compleja complicando el modelado teórico.

Nuestro objetivo es estudiar los diferentes aspectos de las térmicas desarrolladas en medios estratificados como la atmósfera. Para ello realizamos una serie de experimentos que consisten en la liberación instantánea de una pequeña cantidad de fluido denso (agua salada) en un medio estratificado linealmente (agua salada estratificada), invirtiendo la disposición experimental. El efecto de la compresibilidad del aire sobre la distribución vertical de densidad en la atmósfera puede tomarse en cuenta usando la densidad potencial en lugar de la densidad absoluta. En la siguiente sección describimos el procedimiento experimental y luego presentamos los resultados que se pueden explicar con el modelo sencillo propuesto en la Sección IV.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los experimentos fueron realizados en un tanque de paredes transparentes de 75.0 cm de largo, 29.5 cm de ancho y 38.0 cm de altura. Este se llenó hasta la profundidad de 34.0 cm con una solución de agua salada empleando el sistema de doble recipiente para obtener un medio estratificado linealmente. Los experimentos cubrieron un rango de valores del parámetro característico de la estratificación dado por $0 < \rho_0^{-1} \Delta\rho/\Delta z < 0.002 \text{ cm}^{-1}$ donde $\rho_0 = 0.998 \text{ g/cm}^3$ es la densidad del agua.

Las térmicas son producidas por medio de un tubo de acrílico de 3.7 cm de diámetro interior y 5.8 cm de longitud, cuyo extremo inferior redondeado se cubre con una membrana tensa de látex. El tubo se sumerge por completo en el fluido y entonces una cantidad conocida de una solución salina se coloca en el fondo usando una jeringa. El experimento comienza cuando se rompe la membrana de látex con una aguja montada en una barra, liberando el agua salada en un lapso despreciable. El flujo desarrollado no dependerá de las condiciones iniciales siempre que la membrana esté bien tensa y se rompa completa y rápidamente. Se realizaron 24 experimentos con diferentes combinaciones del volumen V_i y la densidad ρ_i iniciales del fluido denso, y de la estratificación en el tanque. El volumen liberado varió entre 3 y 10 ml, y la densidad inicial entre 1.09 y 1.2 g/cm^3 (correspondiente a agua saturada con sal).

Se emplearon dos diagnósticas: una basada en la atenuación de la luz por un colorante para visualizar la térmica, y schlieren sintético para observar las perturbaciones del fluido ambiente generadas por el movimiento descendente de la misma. En ambos casos, una fuente extensa de luz consistente de un panel de tubos fluorescentes y una lámina difusora se coloca detrás del tanque para proveer un campo de iluminación uniforme. Las imágenes se registraron mediante una cámara JAI CV-M4 blanco y negro ubicada 3 m delante del tanque. La resolución de la cámara es de 1392×1040 píxeles de 8 bits y su velocidad de adquisición es de hasta 24 imágenes por segundo gracias al empleo de una adecuada tarjeta digitalizadora (o *frame-grabber*). El procesamiento digital de las imágenes se realiza con el software DigiFlow⁽⁷⁾, diseñado especialmente para extraer información física de experimentos de mecánica de fluidos

En la diagnóstica basada en la atenuación de luz^(8,9), el colorante agregado al agua salada reduce la intensidad de la luz proveniente del panel posterior; dicha disminución está relacionada con la densidad del fluido, lo cual permite visualizar la térmica y obtener la distribución de densidad durante el experimento. La técnica de schlieren sintético⁽¹⁰⁾ permite visualizar y medir las muy pequeñas variaciones de los gradientes de densidad generadas por el movimiento de la térmica.

Los haces luminosos procedentes de la fuente atraviesan una máscara y el tanque. Como máscara se usa una tela tramada con agujeros circulares de 1 mm de diámetro espaciados regularmente. Antes de liberar el fluido denso se adquiere una imagen de referencia con el objeto de detectar y cuantificar a posteriori las variaciones de la intensidad en cada punto, asociadas a los cambios de los gradientes de densidad vertical y horizontal.

III. RESULTADOS

La térmica parte del reposo y desciende debido únicamente a la diferencia de densidad con el fluido ambiente. A medida que avanza, su volumen crece por el mezclado entre los fluidos. La cantidad de movimiento vertical aumenta progresivamente por la acción de la gravedad mientras la densidad y la velocidad disminuyen debido a la incorporación de fluido ambiente. La Fig. 2 muestra las imágenes obtenidas por medio de la diagnóstica basada en la atenuación de la luz por la presencia de un colorante, correspondientes a la evolución de una térmica en agua. Puesto que en este caso el exceso de flotación (o empuje) es constante, el fluido denso alcanza el fondo del tanque sobre el que se derrama como una corriente de gravedad⁽¹¹⁾. En cambio, en un medio estratificado el exceso de flotación disminuye a medida que la térmica desciende, y se detiene cuando su densidad iguala la del fluido ambiente a una profundidad intermedia del tanque. En este nivel se extiende horizontalmente como se observa en la Fig. 3.

Cuando el fluido denso no llega al fondo del tanque, los efectos asociados con la cercanía al contorno inferior no afectan la propagación de las ondas internas generadas por el avance de la térmica. La Fig. 4 muestra las variaciones del gradiente de densidad para tres instantes, obtenidas mediante schlieren sintético para la térmica mostrada en la Fig. 3. Desde el inicio de la evolución observamos que se producen ondas internas que se propagan formando diferentes haces inclinados respecto de la vertical. Los haces horizontales corresponden a ondas internas de frecuencia muy baja. A medida que la térmica desciende, los ángulos disminuyen indicando que la frecuencia de las ondas aumenta a la vez que la velocidad disminuye. Eventualmente se generan nuevos haces verticales que indican la presencia

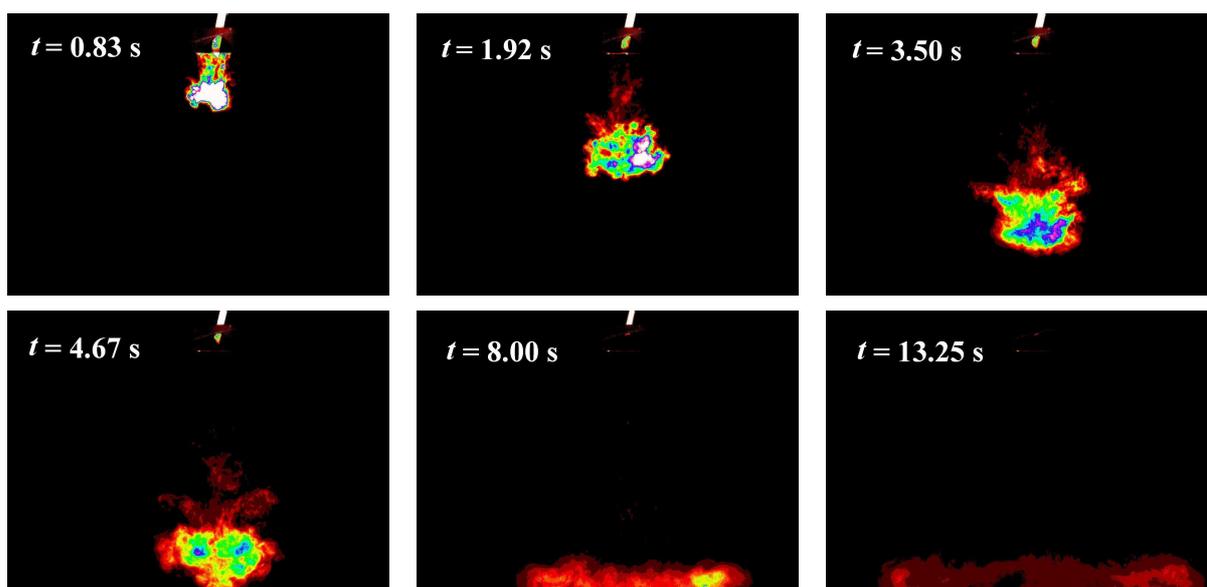


Figura 2. Secuencia de imágenes de una térmica con $V_i = 5.0 \text{ ml}$ y $\rho_i = 1.2 \text{ g/cm}^3$ en un medio no estratificado.

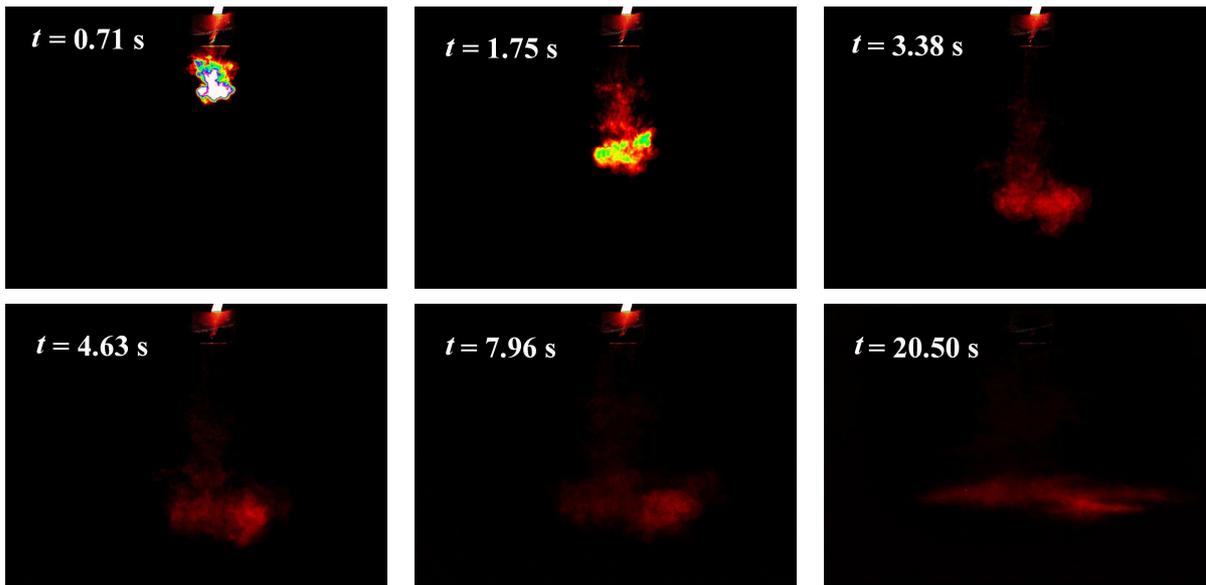


Figura 3. Idem Fig. 2 pero en un medio estratificado con $\rho_0^{-1}\Delta\rho/\Delta z = 0.0005$.

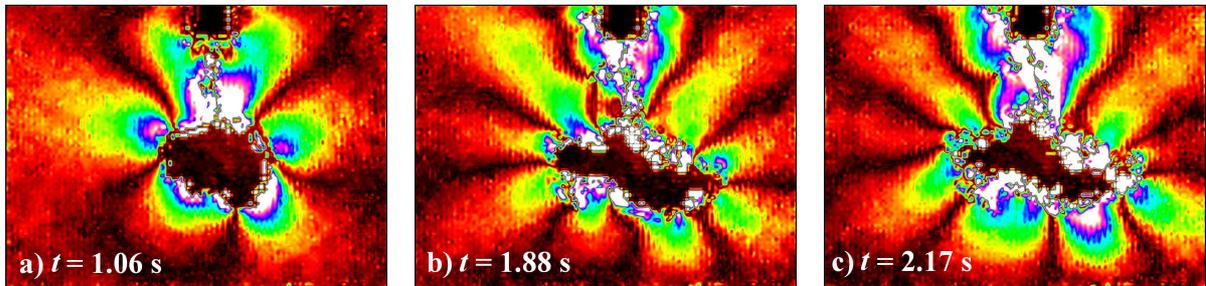


Figura 4. Evolución de las variaciones de $\rho_0^{-1}\Delta\rho/\Delta z$ generadas por una térmica con $V_i = 5.0$ ml y $\rho_i = 1.2$ g/cm³ en un medio estratificado con $\rho_0^{-1}\Delta\rho/\Delta z = 0.0005$ obtenida mediante schlieren sintético.

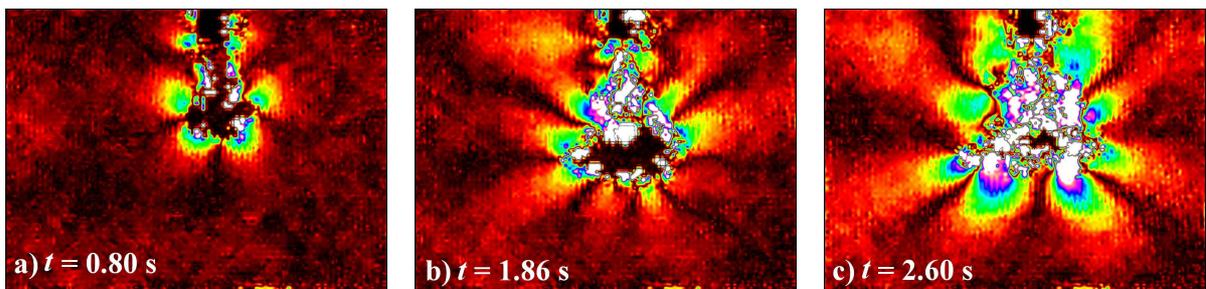


Figura 5. Idem figura 4 pero para una térmica de menor densidad inicial $\rho_i = 1.09$ g/cm³.

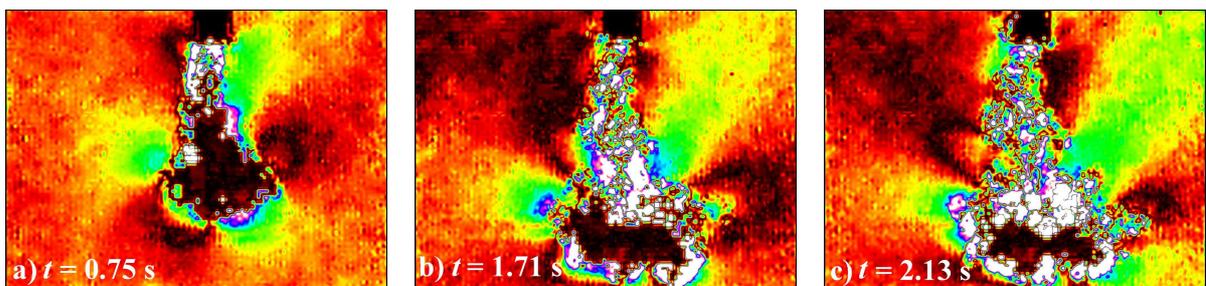


Figura 6: Ídem figura 4 pero para una térmica que desciende en un medio con menor estratificación $\rho_0^{-1}\Delta\rho/\Delta z = 0.00027$.

de nuevas ondas internas. En general, la simetría de la térmica se pierde paulatinamente y también la de la distribución de haces, hasta obtener una configuración muy irregular al final del experimento.

Para una térmica con menor densidad inicial respecto a la de Fig. 4, como la mostrada en la Fig. 5, no apreciamos diferencias significativas en cuanto a la generación de ondas internas y número de haces al comienzo (Fig. 5a). Sin embargo, durante el descenso se excita una cantidad mayor de ondas internas cuya evolución es más rápida. En la fase de expansión del fluido denso a la profundidad de equilibrio, la generación de ondas es similar a pesar de que la altura a la cual se detiene es mayor que en el caso anterior. Por el contrario, para térmicas que descienden en un medio con menor estratificación pero iguales V_i y ρ_i , se generan menos ondas internas desde el comienzo del experimento como muestra la Fig. 6.

V. CONCLUSIONES

Realizamos una serie de experimentos que consisten en la liberación de pequeños volúmenes de agua salada en una solución salina estratificada linealmente. Las térmicas así generadas son visualizadas mediante la técnica basada en la atenuación de la luz por la presencia de un colorante, mientras sus propiedades pueden analizarse empleando schlieren sintético. Presentamos aquí los resultados preliminares del estudio relacionado con la generación y evolución de las ondas internas generadas en el medio estratificado. En forma preliminar, es posible determinar que las frecuencias de las ondas internas no dependen del volumen inicial liberado sino de su densidad inicial y de la estratificación. Sigue el modelado teórico del comportamiento observado que será objeto de un próximo trabajo.

Esta fenomenología se relaciona con mecanismos convectivos asociados con el desarrollo de nubes cúmulos y con la dispersión de efluentes gaseosos en la atmósfera terrestre. Por lo tanto, sigue la profundización del estudio recién iniciado sobre el comportamiento de las térmicas y su relación con las perturbaciones causadas al entorno por su desplazamiento.

Referencias

- 1 – Turner, J.S. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **1**, 29-44 (1969).
- 2 – Morton, B.R., Taylor, G. & Turner, J.S. *P. Roy. Soc. Lond. A. Mat.* **234**, 1-23, (1956).
- 3 – Scorer, R.S. *J. Fluid Mech.* **2**, 583-594 (1957).
- 4 – Hunt, G.R. & Kane, N.G. *J. Fluid Mech.* **435**, 377-396 (2001).
- 5 – Hunt, G.R. & Kane, N.G. *J. Fluid Mech.* **533**, 329-338 (2005).
- 6 – Hart, A. and Dalziel, S.B. *Interacting thermals*, Proc. 6th Int. Symp. in Stratified flows, Perth, Australia. Ed. G. Ivey. pp. 86-91, 2006.
- 7 – Dalziel, S.B. *DigiFlow User Guide*.
<http://www.damtp.cam.ac.uk/lab/digiflow/> (2006).
- 8 – Cenedese, C. & Dalziel, S.B. *Concentration and depth fields determined by the light transmitted through a dyed solution*; Proc. 8th International Symposium on Flow Visualization, ed. Carlomagno & Grant, paper 061, 1-5 (1998).
- 9 – Thomas, L.P., Marino, B.M., Estela, M. & Mandrini, M. *Actas VIII Reunión sobre Recientes Avances en Física de Fluidos y sus Aplicaciones* **8**, 50-57 (2003).
- 10 – Dalziel, S.B., Hughes, G.O., Sutherland, B.R. *Expts. Fluids* **28**, 322-335 (2000).
- 11 – Simpson, J.E. *Gravity currents: In the environment and the laboratory*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido (1997).