

# CONVECCIÓN DE BÉNARD: VISUALIZACIÓN DEL FENÓMENO Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS RELEVANTES EMPLEANDO UN PROGRAMA DE CÁLCULO

M. Vilte, D. Hoyos , I. De Paul

Facultad de Ciencias Exactas - Universidad Nacional De Salta  
Av. Bolivia 5150 - (4400) -Salta - Argentina  
*e-mail: viltem@unsa.edu.ar*

El presente trabajo desarrolla una propuesta de visualización del fenómeno de convección de Bénard en un fluido. Estas experiencias sencillas realizadas en el laboratorio permiten observar y describir el fenómeno; reconocerlo a otras escalas tales como en los procesos dinámicos de evolución y transformación de los sistemas terrestres como la atmósfera y la geósfera. Se realiza el registro fotográfico de las celdas de convección, e introduciendo una fotografía de referencia se puede procesar la información de los registros fotográficos empleando un programa de cálculo, que permite estimar parámetros relevantes del fenómeno como la relación entre la diagonal de las celdas del diagrama que se establece en la superficie y la altura de la capa de fluido que convecta. El propósito del trabajo es el planteo de la observación como recurso para describir el fenómeno y la aplicación de técnicas relativamente sencillas para el procesamiento de la información registrada.

Palabras claves: convección de Bénard, experiencia de enseñanza, técnica de visualización de flujo, programa de medición

The present paper is a proposal of an experience for visualisation of Bénard convection in a fluid. This simple laboratory experience allows the observation and description of the phenomenon, as well as to recognise it at other scales such as dynamic processes of evolution and transformation of terrestrial systems like the atmosphere and the geosphere. By photographing the convection cells and taking a reference photograph, the information of the characteristics of the cells can be obtained and processed by means of a calculus program. This procedure allows the measurement of relevant parameters of the phenomenon such as the relation between the cell diameter and the depth of the convecting fluid layer. The proposal is to state the observation as a mean for describing the phenomenon and the use of simple techniques for processing the obtained information.

Key words: Bénard convection, teaching experience, fluid visualisation technique, measurement program

## I. INTRODUCCIÓN

La convección es un fenómeno con el que convivimos a diario y que se manifiesta en una amplia gama de escalas. El mismo fenómeno de convección que se observa en una jarra con agua hirviendo es el que provoca que en un día de calor, el aire caliente se eleve sobre la superficie del pavimento produciendo una reverberación que distorsiona las imágenes; es el que a diversas escalas es responsable de la aparición del viento y de la circulación global de la atmósfera, de las corrientes oceánicas que determinan el aspecto físico y climático de nuestro planeta y de la convección del manto terrestre que establece el lento desplazamiento de los bloques continentales. Asimismo la convección es la principal responsable de la transferencia de energía desde el interior de algunas estrellas hacia su superficie, entre ellas el sol. Actualmente, la comprensión de las relaciones entre los movimientos de la atmósfera y los de la hidrosfera afecta a muchos campos: meteorología y climatología, pesca industrial, producción de energía eléctrica, etc. <sup>(1), (2), (3)</sup>.

Las principales características de la convección pueden aprehenderse a partir del estudio de un caso particular: la convección de Bénard, que se produce en capas delgadas de fluido. En el presente trabajo se

desarrolla una experiencia de convección que puede ser trasladada a la enseñanza en el nivel medio o básico universitario. El fenómeno de convección a pesar de ser importante en la vida cotidiana, no está incluido dentro de las clases habituales de física del nivel medio y en el caso del nivel básico universitario se lo desarrolla en la mayoría de los casos como una forma de transferencia de energía, pero desvinculado de los procesos que intervienen en la constante transformación del sistema en que vivimos. Si bien no está explícitamente propuesto en los contenidos Básicos Comunes de Ciencias Naturales para la Educación General Básica, su inclusión será de fundamental importancia para la comprensión de los procesos dinámicos de evolución y transformación de los sistemas terrestres como la atmósfera y la geósfera, la adquisición de una idea clara de las manifestaciones externas del magmatismo y el tectonismo, contenidos que figuran dentro del currículum <sup>(4)</sup>.

Se propone a continuación el planteo del estudio de la convección de Bénard al nivel de un curso superior de enseñanza media o de un curso elemental de enseñanza superior, destacando el papel relevante que tiene la observación en el proceso de aprendizaje del fenómeno.

## II. MARCO TEÓRICO

¿Qué es la convección? ¿Cómo puede explicarse? <sup>(5)</sup>. El fenómeno de convección puede explicarse básicamente diciendo que cuando un fluido es calentado desde abajo, la capa inferior debido al aumento de temperatura, se expande y se torna menos densa, experimentando una fuerza que tiende a elevarla. Asimismo una capa de fluido más densa y fría tiende a hundirse, y se establece de esta manera un flujo convectivo; la fuerza responsable de este flujo es el empuje por flotación. En ambos casos esta fuerza está determinada por la diferencia de temperatura entre la parte alta y el fondo del fluido, o más precisamente por el cociente entre esta diferencia de temperatura y el espesor de la capa de fluido, conocido como “*gradiente térmico*”. Un análisis de la evolución histórica del problema ilustrará las relaciones entre la teoría y la observación, y el conocimiento que actualmente se tiene de los conceptos vinculados a la convección <sup>(6)</sup>.

Hacia 1900, Henri Bénard realizó una serie de experiencias de convección en capas delgadas, con la superficie superior expuesta al aire, que presentaron características muy peculiares. En estas experiencias una capa delgada de fluido era calentada desde abajo, se establecía el flujo convectivo y se observaba en la superficie un diagrama complicado que consistía en la división poligonal en celdas similares a un mosaico. El diagrama llegaba a ser un ordenamiento acabado de hexágonos regulares dispuestos como en un panal de abejas, como se indica en la Figura 1.

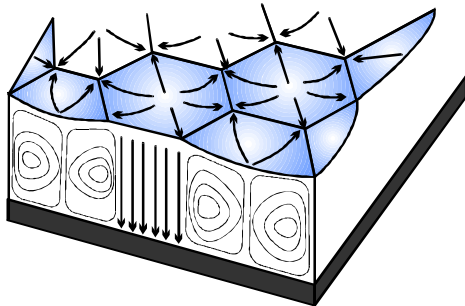


Figura 1. Diagrama de celdas de Bénard.

En 1916 Lord Rayleigh desarrolló una teoría que permitía explicar los mecanismos físicos que producen la convección aunque no permitía explicar los detalles de lo observado por Bénard. Rayleigh señaló que se debía tener en cuenta no sólo el empuje de flotación sino también los mecanismos que disipan energía: el *arrastre viscoso* que se opone al movimiento y tiende a frenar el ascenso de una parcela de fluido caliente y la *difusividad térmica* que tiende a anular la diferencia de temperatura y por lo tanto el empuje.

Imaginemos que se desplaza ligeramente hacia arriba una pequeña parcela de fluido (Figura 2); en su nueva posición la parcela tiene mayor temperatura y por lo tanto menor densidad que su entorno. El empuje convectivo ascendente originado en una diferencia de densidad (flotamiento) provoca el ascenso de parcelas de fluido menos densas y el hundimiento por acción de la gravedad

de parcelas más densas; la fricción viscosa contra la masa del fluido tiende a frenar su ascenso y la difusión térmica tiende a disminuir el gradiente térmico que produce el empuje convectivo. Dependiendo de la relación que exista entre estos tres mecanismos la parcela de fluido permanecerá en reposo (situación de *equilibrio estable*), o tenderá a ascender (situación de *equilibrio inestable*).

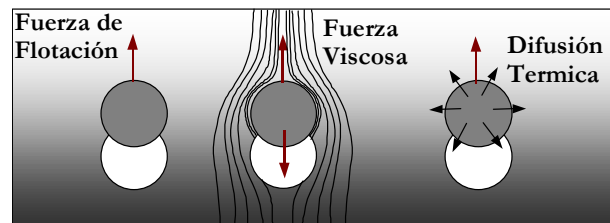


Figura 2. Diagrama que muestra los fenómenos involucrados en la convección natural.

La importancia relativa de estos mecanismos se mide a partir del valor de un número adimensional llamado *número de Rayleigh*,  $Ra$ , que es esencialmente el cociente entre la fuerza de flotamiento y el producto del arrastre viscoso y la rapidez de difusión térmica.

$$Ra = \frac{\beta g L^3 (T - T_0)}{\nu \chi} \quad (1)$$

Donde  $\beta$  es el coeficiente de dilatación térmica,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $\chi$  es la difusividad térmica del fluido;  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $L$  es una longitud característica del fenómeno,  $(T - T_0)$  es la diferencia de temperatura que impulsa el flujo convectivo.

La convección comienza cuando la fuerza de flotamiento sobrepasa los efectos disipativos del arrastre viscoso y la difusión térmica, es decir, cuando el  $Ra$  supera un *valor crítico*. Desde el punto de vista energético, para que haya convección la energía potencial gravitatoria liberada por el hundimiento del fluido denso y la elevación del fluido liviano debe ser mayor que la energía disipada por arrastre viscoso y difusión.

La respuesta del sistema al ser sometido a una perturbación arbitraria, tal como un pequeño desplazamiento desde la posición de equilibrio, dará información acerca de su estabilidad: si al ser desplazado el sistema tiende a volver a su posición original se dice que *el equilibrio es estable*; si ante la perturbación el sistema tiende a apartarse cada vez más de la posición original, *el equilibrio es inestable*; si ante el desplazamiento el sistema no vuelve a la posición original ni tiende a alejarse de ella, se dice que *el equilibrio es indiferente o que existe estabilidad neutra*.

Si  $Ra = 0$ , *el gradiente de temperatura es nulo* y el sistema está en reposo, en equilibrio estable. Si  $Ra$  es muy grande de modo que la fuerza de flotamiento supere los efectos disipativos, el sistema tenderá a reducir su energía estableciendo un flujo convectivo. Entre estos extremos existirá un valor intermedio del  $Ra$  en el cual las fuerzas de flotamiento y disipativas están en equilibrio,

correspondientes a un estado de estabilidad neutra; este valor es el  $Ra$  crítico. Las experiencias muestran que el valor de  $Ra$  crítico es alrededor de  $1708 \pm 50$ , que coincide razonablemente bien con los valores teóricos. Cuando el  $Ra$  supera el valor crítico y el sistema es inestable, el fluido caliente tiende a subir y el fluido frío tiende a bajar en todas partes, pero no puede subir y bajar en el mismo lugar; esto determina que la capa de fluido se divida en un diagrama de *celdas convectivas* dentro de las cuales el fluido circula en órbitas cerradas. Para sacar al sistema de su estado de equilibrio estable es necesario perturbarlo, y puede ocurrir que sea más sensible a algunas perturbaciones que a otras: importa la *escala de la perturbación*; normalmente se expresa esta escala en términos de un *número de onda*  $k$ , que es la recíproca de una longitud. En general, una perturbación compleja puede ser descompuesta en un espectro de modos fundamentales o *frecuencias espaciales* (descomposición de Fourier), en los que el número de onda representa la contribución de una escala de longitud particular a las fluctuaciones aleatorias. Es importante no confundir la *amplitud* de la perturbación, que en nuestro modelo experimental corresponde al *desplazamiento vertical* de una parcela de fluido, con la *escala* de la perturbación que mide el *tamaño* de la parcela. La teoría de Rayleigh vale para amplitudes muy pequeñas, mientras que la escala puede ser tan grande como permita el tamaño del aparato.

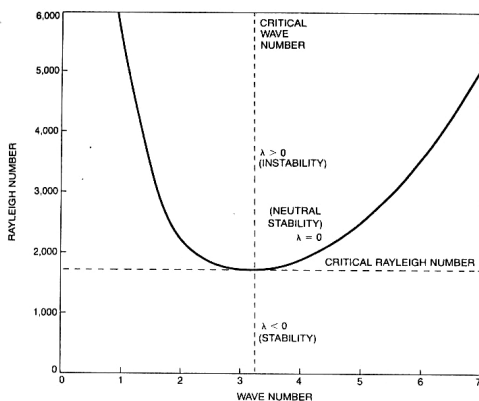


Figura 3. Estabilidad del fluido a partir de la relación entre el número de Rayleigh y el número de onda  $k$ .

Una experiencia de Bénard en la que se pudiera medir el  $Ra$  crítico en función del número de onda de las perturbaciones mostraría que la inestabilidad se establece más rápidamente cuando el número de onda toma un valor particular (número de onda crítico  $k_c$ ), que en este caso corresponde a una *dimensión horizontal que es alrededor de dos veces la profundidad del fluido*. Si el número de onda de la perturbación es mayor o menor que este valor crítico, el  $Ra$  necesario para establecer la convección es mayor que el correspondiente a  $k_c$ . Esto se muestra en la Figura 3. Este resultado cualitativo que establece una *relación entre el diámetro y el espesor de las celdas convectivas* se puede demostrar teóricamente a partir de un análisis de las condiciones de estabilidad de la capa fluida. Si bien la teoría de Rayleigh no permite determinar la forma de estas celdas, hay reglas empíricas

bien establecidas que permiten hacer predicciones cualitativas aceptables. Como el diagrama de celdas se repite con continuidad en el movimiento del fluido, la unidad convectiva consiste en dos rollos rotando en direcciones opuestas, (Figura 4).

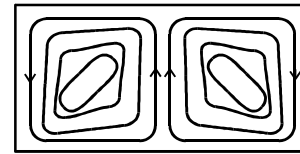


Figura 4. Unidad de celda convectiva en la teoría de Rayleigh

En 1937 el teórico ruso Lev D. Landau amplió la teoría de Rayleigh permitiendo explicar muchas de las características observadas experimentalmente. Recién en 1958 J. R. Pearson estudió la influencia decisiva que tenía la fuerza de tensión superficial en la división poligonal de la superficie libre del fluido que convectaba, lo que permitió explicar el aspecto peculiar de cada celda, cuyo centro es una región deprimida de líquido caliente mientras que los bordes de las celdas forman cúspides. La influencia de la tensión superficial fue fehacientemente establecida por D. Nield en 1964.

Un ejemplo de convección de Bénard es el que se puede observar y admirar en los paisajes de Salinas Grandes en Salta (Figura 5). Los salares<sup>(3)</sup> son cuencas cerradas donde se acumula agua en época de lluvias; en la época seca el agua se evapora lentamente por acción del sol dejando capas delgadas de solución salobre concentrada en la que se produce convección de Bénard. El flujo de líquido arrastra la sal en las celdas convectivas, donde se cristaliza a medida que el agua evapora. Finalmente la cuenca se seca dejando una estructura geométrica de sal que reproduce la forma de las celdas convectivas.



Figura 5. Celdas de Bénard en la superficie de los salares de Salinas Grandes (Provincia de Salta).

### III. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

A continuación<sup>(7)</sup> se propone la realización de experiencias sencillas con el fin de:

- Visualizar las celdas convectivas observadas por Bénard.
- Comprobar la relación entre la diagonal y el espesor de las celdas de acuerdo a la teoría de Rayleigh.

Las experiencias propuestas requieren elementos sencillos: un calentador eléctrico, en este caso, uno circular de 15 cm de diámetro, una cápsula de Petri de igual diámetro, un nivel, una plancha de hierro de igual superficie que se coloca sobre el calentador para uniformizar la temperatura en la base del recipiente que contiene el fluido, una fuente de tensión a la que se conecta el calentador y suministra una potencia de calentamiento constante. Es importante nivelar estos elementos de manera que la base de la cápsula que contiene el líquido esté perfectamente horizontal. Se calienta la muestra desde abajo, con la superficie libre en contacto con el ambiente a menor temperatura. Para visualizar las celdas se emplea una lámpara dicróica con la que se ilumina la superficie libre del fluido desde arriba, lo que permite ver y fotografiar las celdas convectivas.

Como fluido convectivo se pueden emplear diversas sustancias: agua, alcohol, glicerina, etc, cuyas propiedades físicas son conocidas y de las que se podría así calcular el Ra. Sin embargo, para visualizar simplemente el fenómeno, se puede emplear detergente común que es suficientemente viscoso como para que el fenómeno sea lento y además contiene fluoresceína que facilita la visualización de las sombras que el diagrama de celdas proyecta sobre el fondo.

Otro método de visualización es esparcir ligeramente trazadores tales como almidón o una cantidad muy pequeña de polvo de permanganato de potasio sobre el fluido. Este convecta arrastrando el trazador en suspensión el que se acumula en los bordes de la celda lo que permite la visualización del diagrama. Como el permanganato de potasio es un colorante que se libera suavemente en el fluido, se puede observar a simple vista las celdas en forma tridimensional.

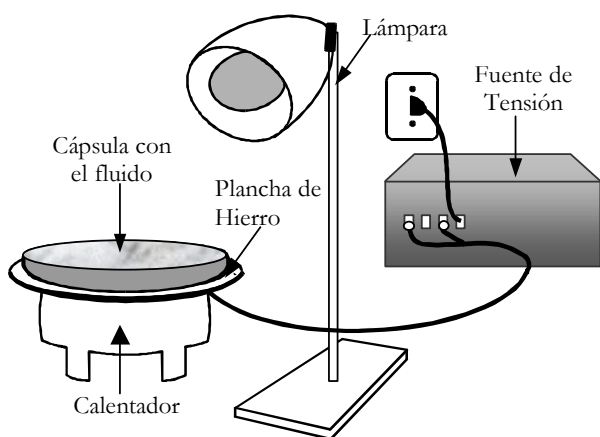


Figura 6. Esquema del dispositivo experimental de las experiencias de laboratorio.

En las experiencias realizadas se empleó detergente y el calentamiento de la muestra se efectuó conectando el calentador a la fuente de tensión con una potencia de calentamiento de 67 W. Luego de aproximadamente 15 minutos de iniciado el calentamiento, se colocó la muestra. Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 6<sup>(8)</sup>. Se fotografió la muestra desde arriba con una cámara fotográfica común. Una vez reveladas las fotos en

papel, y a los efectos de obtener medidas cuantitativas se digitalizaron con un Scanner y se procesaron empleando un programa convencional de procesamiento digital de imágenes. Este procedimiento se simplifica empleando una cámara digital que permite descargar directamente en la computadora las imágenes.

#### IV. VISUALIZACIÓN DE LAS CELDAS DE BÉNARD

Para estas experiencias se empleó detergente en una capa de 9 mm de espesor. En el aula, una vez nivelados los elementos e iniciado el calentamiento de la muestra, se propone a los alumnos observar con atención, ya que a los minutos de iniciarse el calentamiento comienza a formarse desde el centro del recipiente un diagrama de celdas, como una flor; luego el diagrama evoluciona abarcando toda la superficie. Aproximadamente a los 10 minutos de comenzado el calentamiento el flujo está completamente desarrollado y se visualiza con claridad el diagrama de celdas mostrado en la Figura 7.



Figura 7. Registro fotográfico del diagrama de celdas de Bénard en el laboratorio con flujo completamente desarrollado.

A medida que transcurre el tiempo se hace más visible el centro de cada una de las celdas convectivas del diagrama de Bénard, adquiriendo la forma de una pequeña estrella. Se observa cómo las celdas evolucionan fusionándose algunas entre sí, surgiendo otras nuevas, pero manteniendo siempre en general un diagrama con el mismo aspecto. Es interesante observar con atención el diagrama que se establece, discriminando las diferentes figuras geométricas que se forman en la superficie: pentágonos y hexágonos en el centro de la superficie; cerca de los bordes de la cápsula las celdas se transforman en cuadriláteros (Figura 8) que, cuando el calentamiento es suficientemente intenso se unen formando anillos que reproducen la forma del recipiente.



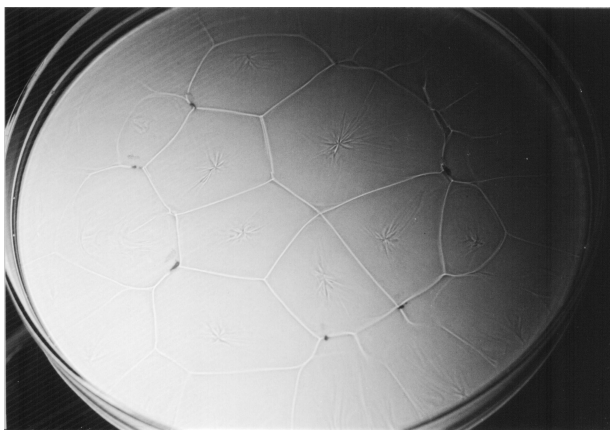


Figura 8. Diagrama de Bénard mostrando el efecto de bordes.

Es importante tener una iluminación tan vertical como sea posible para visualizar el diagrama de celdas. Al tener la superficie superior libre, el detergente adquiere una estructura "poceada" sobre la cual la refracción de la luz desvía los rayos luminosos de distinta manera según el radio de curvatura de la superficie, concentrando la luz en los bordes de las celdas. Esto se observa sobre el fondo como una estructura de líneas luminosas y puntos oscuros que permiten visualizar el fenómeno.



Figura 9. El diagrama definido por el permanganato de potasio como trazador.

Para observar el movimiento tridimensional del flujo en una dada celda, se agregó suavemente permanganato de potasio en polvo sobre la superficie como se visualiza en la Figura 9<sup>(8),(9)</sup>. Se observa una migración del polvo hacia los bordes de las celdas, el descenso hacia el fondo, el arrastre sobre el fondo hacia el centro de la celda para terminar ascendiendo por el mismo, cerrando el ciclo. Es interesante en esta instancia plantear la filmación del desarrollo del flujo, para luego discutir y analizar el fenómeno, incluso para medir el tiempo que tarda en completar un ciclo que permitiría tener idea de la rapidez del flujo<sup>(4)</sup>.

Es significativo discutir en este fenómeno el papel de los trazadores, ya que se pueden ensayar diferentes trazadores y analizar el éxito o fracaso en función de las características de los mismos y del fenómeno observado, como así también las ventajas o desventajas de unos frente a otros para la obtención de registros fotográficos con un buen contraste que nos permitan medir los parámetros ya mencionados. La experiencia es muy sencilla de repetir ya que el tiempo que lleva el calentamiento y el establecimiento del diagrama no supera la media hora y el diagrama se mantiene estable alrededor de 20 minutos.

## V. PROGRAMA DE CÁLCULO

El programa empleado fue desarrollado en la UNSa. y permite medir el tamaño de estructuras en una imagen bidimensional<sup>(10),(11)</sup>. Para correlacionar el tamaño de la imagen con el tamaño real del objeto se requiere contar con longitudes de referencia en el plano de la imagen. Una vez realizado esto, el programa resuelve una serie de algoritmos que permiten medir directamente en la pantalla de la computadora el tamaño de las estructuras. El programa se realizó en Scilab, un programa matricial de cálculo para matemática, y la visualización de las imágenes se programó en TCL-TK.

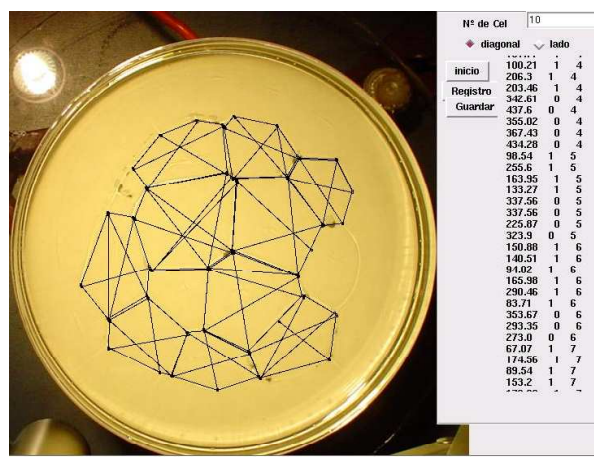


Figura 10. Registro de pantalla del programa de cálculo

El diseño del programa permite al operador, por medio de una pantalla interactiva, identificar cada estructura, en este caso las celdas convectivas de Bénard, y discriminar qué longitud se mide: el lado o la diagonal de la celda. En la Figura 10 se muestra la pantalla interactiva, incluida la foto sobre la que se realizó una medida. Los resultados se guardan en un archivo ascii que puede tratarse posteriormente con una planilla de cálculo.

Las medidas pueden realizarse directamente sobre una fotografía empleando una regla y contando con una longitud de referencia; aunque en este caso la precisión de la medida resulta menor.

## VI. RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

A continuación se muestran los resultados de las medidas realizadas usando este programa sobre una

imagen obtenida en una experiencia particular en donde el diagrama de Bénard presenta ocho celdas convectivas definidas claramente. Sobre la pantalla interactiva se midió en milímetros los lados de los polígonos, (denotados con  $L_i$ ,  $i=1...6$ ) y las diagonales (denotadas con  $D_i=1,...,3$ ) de las celdas (denotadas con  $C_j$ ,  $j=1,...,8$ ); estos datos se muestran en las Tablas 1 y 2.

TABLA 1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
L1	16,5	12,1	9,30	6,84	5,51	4,69	11,1	9,05
L2	5,96	9,68	10,4	17,5	9,16	12,2	12,8	8,43
L3	10,7	14,9	9,98	14,8	8,76	6,27	11,4	5,64
L4	6,34	4,18	12,6	6,11	8,15	10,7	3,35	9,96
L5	9,80	13,5	12,5	6,01	4,72	12,3	14,0	17,4
L6	8,84	5,73	18,0	12,3	14,7	11,4	6,58	5,02

TABLA 2

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
D1	22,2	17,7	20,7	20,5	16,4	14,7	20,7	21,2
D2	15,2	17,7	17,7	21,3	16,5	20,3	20,2	17,6
D3	19,3	19,3	19,5	22,0	19,2	21,7	18,5	16,4
Dp	18,9	18,2	19,3	21,3	17,4	18,9	19,8	18,4

De la Tabla 1 se calcula el perímetro ( $P_i$ ,  $i=1,...,8$ ) para cada celda y se determina con el perímetro, las diagonales promedio ( $D_i' = P_i/3$ ) de cada celda. Se promedian valores y se determina la relación entre el valor de la diagonal media de las celdas ( $D_p$  y  $D_p'$ ) y el espesor de la capa de líquido, que en una situación ideal, debería ser el doble del espesor, según la teoría. Para esto se definen los siguientes parámetros:

$q$ : razón promedio entre el valor de una diagonal medida en forma directa y el espesor.

$q'$ : razón promedio entre una diagonal calculada con el perímetro y el espesor.

En las Tablas 1 y 2 figuran los valores de las diagonales y los lados de las celdas medidos directamente sobre las ampliaciones de las fotos procesadas. En la Tabla 3 se muestran, los valores de  $D_p$ ,  $D_p'$  y los cocientes  $q$  y  $q'$  para cada celda.

TABLA 3

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Dp	18,9	18,2	19,3	21,3	17,4	18,9	19,8	18,4
Dp'	19,4	20,0	24,3	21,3	17,0	19,2	19,8	18,5
q	2,10	2,03	2,15	2,37	1,93	2,1	2,2	2,04
q'	2,15	2,23	2,7	2,36	1,89	2,13	2,2	2,06

Los valores promedio de  $q$  y  $q'$  para las ocho celdas con sus respectivos errores son:

$$q = 2.11 \pm 0.04$$

$$q' = 2.21 \pm 0.08$$

Estos valores son aceptables teniendo en cuenta las condiciones en que se realizaron las experiencias. Se observa que los valores de  $q$  obtenidos con ambas formas de cálculo son muy próximos dentro del error de la medida, del orden de la centésima. El valor de  $q$  obtenido en las experiencias comprueba experimentalmente la teoría que predice que la relación entre la diagonal de las celdas de convección y el espesor de la muestra es igual a 2.

## V. MEDIDAS DE TEMPERATURA

Para tener idea del gradiente que impulsa el flujo, se realizaron algunas medidas de temperatura en el laboratorio. Para este propósito se colocaron dos termocuplas, una en el centro del recipiente en su superficie interna y otra en la superficie libre del fluido. Para realizar estas medidas en una experiencia frente a alumnos es necesario contar con un sistema de adquisición de datos; en la experiencia realizada se empleó un Omega con una precisión de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ . Los valores de temperatura obtenidos se grafican en función del tiempo en la figura 11. Se observa que aproximadamente a los 15 minutos de iniciado el calentamiento de la muestra, los valores alcanzan estacionariedad.

Evolución de la temperatura, convección de Bénard

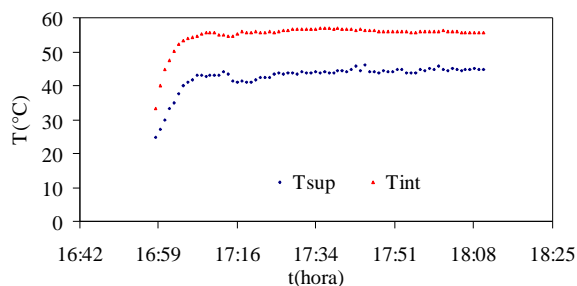


Figura 11. Evolución temporal de las temperaturas en la experiencia

Se puede calcular el gradiente vertical de temperatura empleando la siguiente fórmula:

$$Grad_{vertical} = (T_{in} - T_{sup}) / e \quad (2)$$

Donde  $T_{in}$  es la temperatura interior en la base del recipiente en contacto con el fluido y  $T_{sup}$  es la temperatura en la superficie del fluido en contacto con el ambiente. El espesor de la capa de fluido en la muestra es  $e$ , que en el caso ensayado es de 9 mm.

La Tabla 4 muestra los valores de temperatura y los valores correspondientes del gradiente vertical obtenidos promediando las medidas sobre intervalos temporales de 10 minutos en estado estacionario.

TABLA 4

T	T <sub>SUP</sub> (°C)	T <sub>INT</sub> (°C)	Grad <sub>vertical</sub> (°C/m)
16:58:52	35,3	48,4	1455,6
17:08:52	42,6	55,2	1400,0
17:18:52	42,5	55,8	1477,8
17:28:52	43,8	56,8	1444,4
17:38:52	44,6	56,5	1322,2
17:48:52	44,3	55,9	1288,9
17:58:52	44,9	55,9	1222,2
18:08:52	45,0	55,6	1177,8

De la Tabla 4, se obtiene que el valor promedio del gradiente vertical es 1348.6 °C/m.

## VI. EXPERIENCIA Y ENSEÑANZA

La experiencia presentada en este trabajo permite al docente plantear a los estudiantes un abordaje del conocimiento de un fenómeno natural que incentive el interés por la investigación por medio del trabajo experimental y la comparación con las predicciones de las teorías formuladas<sup>(4)</sup>.

Una programación adecuada de las actividades de laboratorio y sesiones de discusión fomentará la adquisición en forma gradual de las habilidades propias del trabajo experimental: observación sistemática, recolección de la información, procesamiento de la misma, obtención y análisis de los resultados y validación de la teoría por parte de los alumnos.

La recolección de la información por medio de registros fotográficos pone en juego habilidades de destreza manual y potencia el proceso de observación y selección.

El uso de la computadora como herramienta para el procesamiento de las imágenes o como instrumento de cálculo en el empleo del programa que permite medir y guardar la información muestra la potencialidad del empleo de los recursos informáticos en esta experiencia.

## VII. CONCLUSIONES

- Las experiencias de laboratorio propuestas requieren el empleo de elementos sencillos y permiten visualizar el fenómeno de convección de Bénard, describir la estructura de celdas y, empleando trazadores, conocer la circulación en su interior.
- El programa de cálculo empleado procesa la información del diagrama de celdas de una manera sencilla, rápida y precisa. Hace posible la obtención de los parámetros relevantes que caracterizan el fenómeno.
- Los resultados obtenidos sobre los registros fotográficos con el programa de cálculo permiten comprobar las teorías formuladas.

- Las medidas de temperatura permiten tener una idea precisa de la fuerza que impulsa el flujo convectivo.
- El trabajo propuesto estimula la actitud de observación de los fenómenos naturales y, a partir del estudio del caso particular de la convección de Bénard, permite aprehender los fundamentos de los procesos convectivos que, a distintas escalas, están presentes en la naturaleza.
- Favorece la discusión del diseño experimental en el laboratorio para reproducirlo y plantea nuevas alternativas en cuanto a las técnicas de visualización del fenómeno.

## IX. REFERENCIAS

- 1 - Hewitt, P.G. "Física Conceptual", Addison Wesley Iberoamericana S.A., E.U.A. (1995).
- 2 - Mason, J.B. "The physics of clouds", Oxford University Press. (1964).
- 3 - Cousteau, J.Y. "Enciclopedia del mar: los secretos del mar", Editorial Hyspamerica, España. (1983).
- 4 - Díaz Barriga, F. Y Rojas Hernández, G. "Estrategias docentes para un aprendizaje significativo", MacGraw Hill Interamericana, México (1997).
- 5 - Burmeister. "Convective heat transfer", J. Wiley & Sons. Kansas. EE. UU.(1983).
- 6 - Velarde, M.G., Normand, Ch. Scientific American 243, 1, 92-108. (1980).
- 7 - Vilte, M.del S. "Convección de Bénard". Seminario de Actualización Científica, Fac. de Cs. Ex., UNSa. (1992).
- 8 - Merzkirch, W. "Flow visualization". Academic Press Inc. (1974).
- 9 - Khalighi, B., Braun, M. J., Freitas, C. J. Ed., "Flow visualization – 1989". ASME Transactions. (1989).
- 10 - Lim, J. S. "Two dimensional signal and image processing", Prentice Hall International Editions. (1990).
- 11 - Srinivas, K., Fletcher, C. A. "Computational techniques for fluid dynamics", Springer Series in Computational Physics, Springer-Verlag. ( 1992).