

NOTAS Y CORRESPONDENCIA

TALLEX - EXPERIMENTOS CON FLUJOS ROTANTES EN LA FORMACIÓN DE METEORÓLOGOS Y OCEANÓGRAFOS.

Claudia Simionato¹, Norma Possia¹, Claudia Campetella¹ y Martín Saraceno¹
Diego Moreira² y Moira Luz Clara Tejedor²
Dernis Mediavilla³, Guadalupe Alonso³, Laura Ruiz Etcheverry³, Carolina Kahl³,
Mariana Carolina Nieva Tamasiunas³ y Daniel Valla³
María E. Dillon⁴, María S. Osores⁴, Laura I. Pappalardo⁴, Vanesa Pantano⁴ y Romina E. Racedo⁴

¹ Depto. de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, DCAO-FCEN-UBA. Investigadores del CIMA/CONICET-UBA. Buenos Aires, Argentina.

² Auxiliares docentes y estudiantes doctorales DCAO-FCEN-UBA; Buenos Aires, Argentina.

³ Estudiantes de la Licenciatura en Oceanografía DCAO-FCEN-UBA; Buenos Aires, Argentina.

⁴ Estudiantes de la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera DCAO-FCEN-UBA; Buenos Aires, Argentina.

(Manuscrito recibido el 27 de mayo de 2010, en su versión final el 29 de Setiembre 2010)

RESUMEN

El desarrollo de experiencias de laboratorio es un elemento crucial en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias. En este trabajo se ilustran algunas experiencias básicas de la mecánica de fluidos geofísicos que resultaron muy útiles en dicho proceso. Las experiencias, que se realizaron en el marco del Taller de Experimentación en Fluidos Geofísicos del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, ayudan a comprender los procesos físicos que subyacen por detrás de resultados teóricos poco intuitivos, haciendo que el estudiante reavive su curiosidad, se plantee preguntas y se motive a encontrar respuestas. Los experimentos son muy valiosos, además, para la divulgación y extensión de las carreras de meteorología y oceanografía a la hora de despertar vocaciones, lo cual es un aspecto crítico para nuestras ciencias.

Palabras clave: experimentos, fluidos, aprendizaje

TALLEX – EXPERIMENTS WITH ROTATING FLOWS IN THE ACADEMIC TRAINING OF METEOROLOGISTS AND OCEANOGRAPHERS

ABSTRACT

Laboratory experiments are crucial elements in the learning-teaching process of scientific courses. In this work some examples of didactic experiments with fluids under rotation are shown. They were developed with new equipments acquired in the frame of the Laboratory of Geophysical Fluids at the Department of Atmospheric and Oceanic Sciences of the

Faculty Natural and Exact Sciences of the University of Buenos Aires. These experiments illustrate and help to understand the complex physical processes which lie behind theoretical results. Experiments motivate the curiosity of the students, make them ask questions and search for answers. The experiments are also useful to promote our sciences among high school students, a critical issue given the low number of undergraduate students.

Key words: experiments, fluids, learning

1. INTRODUCCIÓN

Un medio para lograr aprendizajes significativos es que los estudiantes relacionen el contenido temático de las asignaturas con fenómenos observados en la naturaleza. Para conseguirlo la docencia debe de ser creativa y motivadora, estimulando la vinculación teórico-práctica. Una de las formas de alcanzar este objetivo es a través de la realización de experimentos a partir de los cuales el estudiante fije contenidos, reflexione acerca de su comprensión de los procesos físicos subyacentes y reavive su curiosidad planteándose preguntas y motivándose a encontrar respuestas. En el caso particular del proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias de la atmósfera y los océanos, el desarrollo de experiencias de laboratorio que ilustren procesos de la dinámica de los fluidos geofísicos es de vital importancia para la comprensión de los complejos y, en ocasiones poco intuitivos, fenómenos que ocurren en dichos fluidos. A través de estas experiencias el alumno puede visualizar los procesos físicos subyacentes e interpretarlos como complemento del análisis del complejo sistema de ecuaciones que se utilizan para explicarlos.

A pesar de la importancia de la experimentación como elemento didáctico, hasta hace poco no existía en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO) equipamiento de laboratorio y recursos humanos dedicados que permitieran el desarrollo de experiencias con fluidos en rotación. Esto motivó la creación del Taller de Experimentación en Fluidos Geofísicos (TalEx) en 2007. El TalEx es un espacio académico extracurricular de participación voluntaria por parte de los docentes, investigadores y estudiantes, abierto a todos aquellos que quieran participar, tanto del DCAO, como de otros departamentos de la Facultad de Ciencias Exactas y

Naturales (FCEN) de la Universidad de Buenos Aires (UBA). El objetivo es elaborar y desarrollar experimentos educativos que reproduzcan a escala fenómenos naturales observables en fluidos en general y, en particular, en fluidos geofísicos. Sus metas son acercar a la sociedad medios para comprender los procesos que generan estos fenómenos, aumentar la conciencia de la importancia de su estudio, despertar vocaciones y contribuir al mejoramiento de la enseñanza de las Ciencias de la Atmósfera y los Océanos.

En lo que respecta a extensión y divulgación, las experiencias se realizan regularmente para jóvenes de escuela secundaria en diversos espacios, como la Semana de las Ciencias de la Tierra (FCEN-UBA), el Laboratorio 0 (Centro Atómico Constituyentes-CNEA), la Feria Internacional del Libro en Buenos Aires, diversos Encuentros Nacionales Pibes con la Ciencia, la Feria de Ciencias Prociencia, el Programa Federal de Turismo Educativo y Recreación, Científicos por un Día y otras actividades de la Secretaría de Extensión, Graduados y Bienestar Estudiantil (SEGBE) de la FCEN, como las Experiencias Didácticas y Talleres de Ciencia. Los resultados han sido fructíferos, llegando a miles de jóvenes, despertando su interés y generando en muchos casos un acercamiento que previamente no existía a docentes universitarios, investigadores y estudiantes de ciencias. Los talleres y demostraciones se tornan, por lo tanto, un marco ideal para la promoción de las ciencias.

En relación con la docencia universitaria el desafío que se propuso el grupo fue mejorar la base de experimentos disponibles, como modo de contribuir a mejorar la calidad de la enseñanza de nuestras ciencias en la FCEN y a formar recursos humanos en el área de fluidos geofísicos experimentales. Con este fin, en el marco del

TalEx se obtuvo en 2008 un subsidio INVOFI (Incentivo de Vocaciones para el Estudio de Física) de la Asociación Física Argentina (AFA) que, conjuntamente con el aporte económico de varios docentes/investigadores del DCAO, posibilitó el mejoramiento de los recursos de laboratorio disponibles. Una de las adquisiciones más significativas es una mesa rotante, sencilla pero robusta, que posibilita por primera vez en el DCAO la realización de experimentos con fluidos en rotación. Los mismos no sólo han resultado muy útiles a los efectos de la extensión universitaria y divulgación, sino que están siendo utilizados en diversas asignaturas como un elemento fundamental en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

En este trabajo se describen algunos de los experimentos desarrollados que están siendo aplicados en las materias de las carreras de Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía y se ilustra cómo los mismos son útiles en el proceso de enseñanza-aprendizaje, contribuyendo a la adquisición de conocimientos verdaderamente significativos.

2. LAS EXPERIENCIAS DE LABORATORIO, MARCO TEÓRICO Y VINCULACIÓN CON LAS OBSERVACIONES

Una de las características fundamentales de los fluidos geofísicos es que su dinámica está dominada por la rotación y la esfericidad de la Tierra. Preservando adecuadamente las escalas dinámicas es posible reproducir el comportamiento de estos fluidos en pequeños tanques en el laboratorio. La rotación de la Tierra se puede simular utilizando un recipiente con agua apoyado sobre una mesa rotante. Su esfericidad se puede simular mediante el uso de un fondo inclinado (ver sección 2.3).

A continuación se describen algunas experiencias que utilizan estos recursos. La primera ilustra uno de los principios fundamentales de la dinámica de los fluidos geofísicos, el Teorema de Taylor-Proudman. La segunda discute la formación de ondas baroclínicas inestables en la corriente en chorro de capas altas. Finalmente, se discute un análogo dinámico de la circulación profunda de los

océanos, muy útil a la hora de interpretar la dinámica subyacente en este complejo proceso.

2.1. Columnas de Taylor

El Teorema de Taylor-Proudman o T-P (Taylor, 1923 y Proudman, 1916) muestra que, para un fluido homogéneo en presencia de rotación y para el cual los efectos no-lineales son despreciables frente a los efectos de la rotación y de la fricción (número de Rossby y Ekman respectivamente menores que uno), se verifica que:

$$(\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla) \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

donde \mathbf{U} es el vector velocidad y $\boldsymbol{\Omega}$ es el vector rotación. Es decir, *el flujo no puede tener gradientes en dirección paralela al eje de rotación*. En el caso de que el eje de rotación sea perpendicular al plano en el que se desarrolla el flujo, (1) se reduce a que los gradientes verticales de la velocidad son nulos:

$$\partial u / \partial z = \partial v / \partial z = \partial w / \partial z = 0 \quad (2)$$

Donde u , v y w son las componentes de la velocidad en las direcciones x , y y z , respectivamente. Físicamente la ecuación (2) resulta como consecuencia del balance entre las fuerzas de Coriolis y de gradiente de presión. Bajo las condiciones descritas, (2) indica que no hay variaciones de velocidad en la dirección del vector de rotación $\boldsymbol{\Omega}$. Si además se considera como condición de contorno un fondo plano y rígido, la velocidad vertical w es nula en el fondo y por (2) en todo el fluido. Se concluye, por lo tanto, que el flujo es *bidimensional*, su campo de velocidades será el mismo para un dado (x, y) independientemente de la profundidad a la que se observen las mismas. En estas condiciones, el fluido no puede estrecharse, ni contraerse, ni sobrepasar un obstáculo, es decir, se comporta como si 'fuera rígido'.

La reproducción de este experimento en el laboratorio es de suma utilidad para estudiar esta propiedad de los fluidos rotantes que está lejos de resultar intuitiva.

2.1.1. Diseño experimental

Para el desarrollo de las experiencias se utilizó la mesa rotante. Sobre la misma se montó un recipiente cilíndrico de acrílico de 46 cm de diámetro, 26 cm de altura y 4 mm de espesor que se llenó con agua dulce. Para visualizar el comportamiento del fluido en toda la columna de agua se utilizaron como trazadores colorantes vegetales. Se montó una cámara fija sobre la mesa desde el sistema rotante.

Se realizaron dos experiencias para visualizar, respectivamente, dos características que resultan como consecuencia directa del teorema de T-P. En la primera el objetivo es mostrar que la rotación organiza el campo de velocidades del fluido, impidiendo que el mismo pueda mezclarse de forma turbulenta como sucede en ausencia de rotación frente a una perturbación externa. En la segunda, se reproduce el experimento utilizado por Taylor para demostrar el teorema: se muestra cómo el fluido es incapaz de atravesar un obstáculo sumergido como consecuencia de no poder tener variaciones en la componente vertical de la velocidad.

2.1.1.1. Experiencia 1: la rotación organiza el campo de velocidades

Se llena el tanque con aproximadamente 10 cm de agua dulce y se lo hace rotar a una velocidad angular de 14 rpm. Una vez que el movimiento se estabiliza se introduce algo de turbulencia, simplemente moviendo el fluido con la mano.

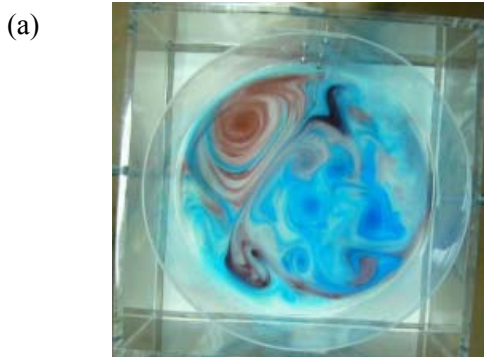


Figura 1: (a) Resultados del experimento inicial sobre el teorema de T-P. Los trazadores muestran la 'rigidez' del fluido.



Figura 1: (b) imagen de la gran mancha roja de Júpiter (de Marshall y Plumb, 2007).

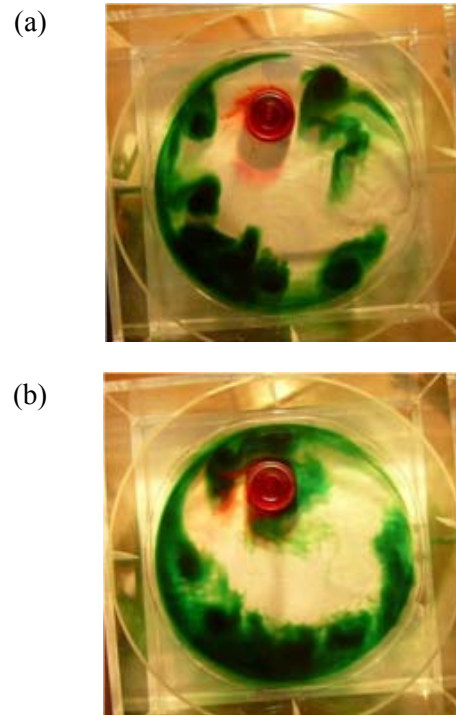


Figura 2: Resultados del experimento sobre bloqueo topográfico en dos instantes diferentes. El colorante rojo, sobre el obstáculo, muestra que el fluido sobre el mismo no puede cambiar su espesor. El colorante verde, en el fluido más profundo alrededor del obstáculo, muestra que el fluido es incapaz de superar el obstáculo, en concordancia con el teorema de T-P. La figura (b) representa un instante posterior a la (a).

Finalmente, se inyectan tintas de dos colores diferentes. Se observa como los puntos a lo largo de una columna tienen la misma velocidad. Se observa, asimismo, la ausencia de mezcla lateral (Figura 1.a).

Desde el punto de vista didáctico, es útil cuando se realiza este experimento mantener un experimento testigo sin rotación, de modo que el alumno pueda visualizar claramente las diferencias y notar que las mismas son exclusivo resultado de la rotación.

Un ejemplo claro en la naturaleza de una situación similar a la observada en el experimento es la gran mancha roja de Júpiter (Figura 3.b). Es didácticamente útil en este caso hacer que el alumno calcule las escalas para la mancha en la atmósfera de ese planeta y verifique que en la misma el número de Rossby es pequeño, de modo que este fluido se encuentra fuertemente afectado por la rotación.

2.1.1.2. Experiencia 2: bloqueo topográfico

En este experimento se introduce en el fondo del tanque un obstáculo circular a unos 13 cm del centro del mismo y se llena el tanque con 10 cm de agua dulce. El obstáculo utilizado tiene 4 cm de alto y 8,5 cm de diámetro. Luego de que el fluido se estabiliza, se imprime una velocidad relativa, reduciendo o aumentando ligeramente la velocidad de rotación del tanque, y se inyecta trazador de un color (rojo en la Figura 2) sobre el lugar en donde se encuentra el obstáculo y de otro color (verde en la Figura 2) en las regiones aledañas.

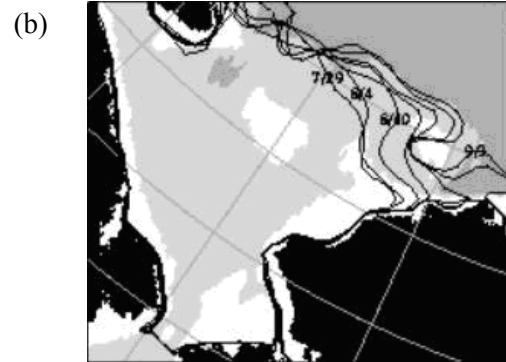
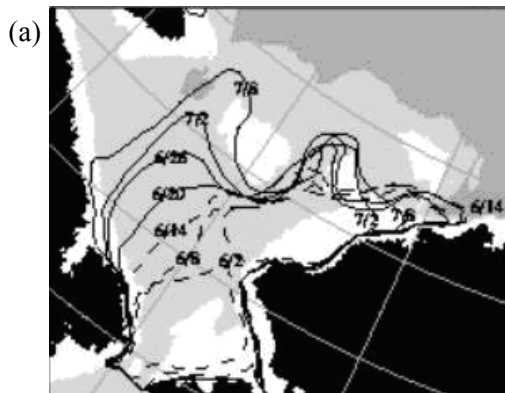


Figura 3: Retiro del borde del hielo en el verano de 1994 en el Mar de Chukchi. Las líneas de contorno del borde del hielo a intervalos aproximados de seis días se derivan del canal de 19GHz de las imágenes de DMSP SSM / I. Los contornos muestran el borde de hielo. Los cuatro colores de fondo en el mapa muestran la topografía submarina del Mar de Chukchi. Las áreas blancas son aguas poco profundas (0-40m), el gris oscuro corresponde a aguas profundas (> 60 m) y la tierra es de color negro. Adaptado de Martin y Drucker (1997).



Figura 4: Imagen del espectro visible (fuente NASA) mostrando el campo de nubes sobre las islas Guadalupe. El viento medio es del noreste.

Las Figuras 2.a y 2.b muestran dos estados de la evolución de esta experiencia. El primero de ellos (Figura 2.a) muestra que el agua que está sobre el obstáculo, indicada con rojo, no se desplaza durante el movimiento, obedeciendo el teorema de T-P en relación a que el fluido no puede ‘salirse’

del obstáculo, ya que esto implicaría aumentar su espesor. En segundo lugar (Figura 2.b) puede observarse que el fluido en las regiones aledañas se ve obligado a desviarse en toda la columna, como si el obstáculo se extendiera en toda la profundidad del fluido. Esta observación es consistente con la hipótesis del teorema de T-P, es decir que el campo de velocidades del flujo debe ser el mismo para todas las profundidades.

El comportamiento del fluido en el tanque representa, de manera simplificada, el comportamiento del océano y de la atmósfera, así como de atmósferas planetarias, en situaciones similares. En el océano, las corrientes se desvían en presencia de una montaña submarina y se observa que la región sobre la montaña es aislada dinámicamente de su alrededor. Un ejemplo se muestra en la Figura 3, adaptada de Martin y Drucker (1997). Estos autores explican el comportamiento de los flujos de hielo en el Mar de Chukchi por la presencia de columnas de Taylor. El Mar de Chukchi está situado justo al norte del estrecho de Bering entre Alaska y Rusia (una latitud alta, donde la profunda profundidad del océano es casi paralela al eje de rotación de la Tierra). Examinando las imágenes de microondas para la región durante los veranos de 1992-1994, observaron que el hielo se mantuvo preferentemente sobre Herald Shoal, una región mucho menos profunda que las aguas aledañas. Martín y Drucker (1997) postulan que ello se debe a una columna de Taylor atrapando el agua fría y el hielo en la región por encima del banco. La Figura 4 muestra otra situación en la que las columnas de Taylor se manifiestan en la naturaleza: la imagen satelital muestra la formación de vórtices en el flujo de las nubes sobre las Islas Guadalupe. Esta es atribuida a una consecuencia de la formación de columnas de Taylor por encima de las islas, perturbando el flujo de nubes muy por encima de la altura física de las islas.

2.2. La circulación general de la atmósfera

La circulación de gran escala de la atmósfera es forzada principalmente por la diferencia térmica entre el ecuador y el polo y la rotación terrestre. El balance radiativo muestra que la Tierra tiene un exceso de energía térmica en los trópicos y un

déficit en latitudes medias y altas. Según este balance, las regiones de latitudes más altas deberían ser más frías de lo que se observa en la naturaleza, y las regiones tropicales, más cálidas. Sin embargo, el gradiente térmico asociado a procesos puramente radiativos, resulta menguado como consecuencia de la circulación atmosférica, que actúa transportando calor de los trópicos a los polos.

En una primera aproximación, considerando una Tierra esférica y sin rotación, Hadley propuso un modelo de circulación en el cual el desequilibrio térmico asociado a la radiación produce una celda de circulación meridional.

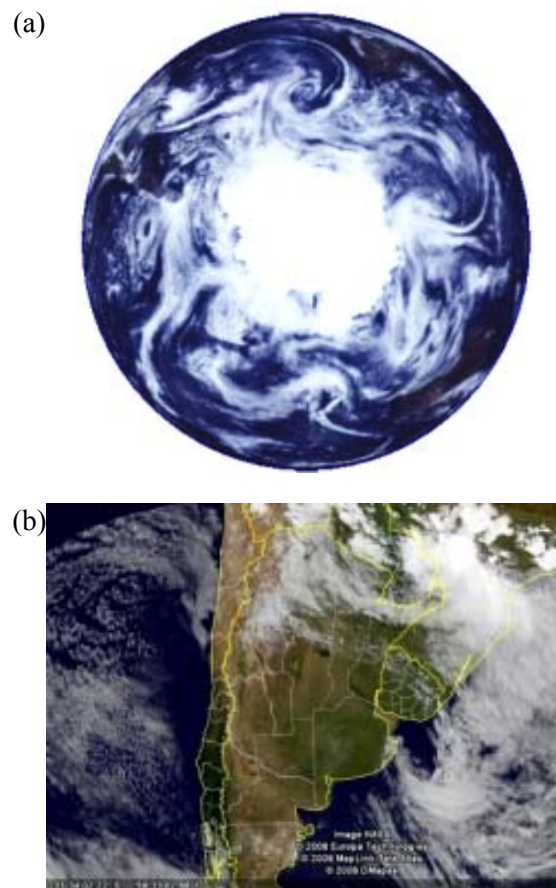


Figura 5: (a) Composición de imágenes satelitales infrarrojas. (b) Imagen captada por el Satélite Goes-12, a las 19 UTC del 29 octubre 2008 (hora 17 de Argentina). De: <http://meteorologia-practica.blogspot.com>. Imágenes procesadas por la NASA.

En ella, el aire cálido asciende en el ecuador y viaja en altura transportando calor hacia el polo enfriándose en su trayectoria; allí el aire frío desciende y regresa hacia el ecuador a través de una rama en capas bajas. El efecto de la rotación terrestre, hace que el descenso de la celda de Hadley se produzca a los 30° de latitud y no en el polo. ¿Cómo se explica, entonces, el transporte de calor hacia latitudes medias y altas?

Para la medición de la temperatura del agua se emplean se emplean dos termómetros digitales con sensor metálico cuya precisión es de 0,1° C. La observación del movimiento del fluido se logra mediante la utilización de trazadores de colores (tintas vegetales disueltas en agua). Para escalar este dispositivo de laboratorio, de modo que represente la atmósfera terrestre, se utiliza el número adimensional de Rossby térmico (Holton, 2004), que proporciona información sobre la validez de la teoría cuasigeostrofica. Aproximando la magnitud de la velocidad U del flujo mediante la aproximación geostrofica, la ecuación hidrostática y una relación entre la temperatura y la densidad, se reescribe el número de Rossby de la siguiente manera:

$$Ro_T = (gh\varepsilon(\delta T)) / (2\Omega^2(b-a)^2) \quad (3)$$

donde: g es la aceleración de la gravedad, h la altura de la columna, ε es el coeficiente de expansión térmica, δT la diferencia de temperatura radial del anillo, a y b los radios interior y exterior, respectivamente, del anillo y Ω la velocidad angular de rotación. En los experimentos que se discuten en este trabajo, los valores correspondientes fueron $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$; $h = 0,04 \text{ m}$; $\varepsilon = 2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $\Omega = 0,216 \text{ s}^{-1}$ y $(b-a) = 0,165 \text{ m}$, por lo cual resulta $Ro_T = 0,1272 < 1$.

2.2.1.1. Experiencia 1: Circulación en presencia de un gradiente radial de temperatura en ausencia de rotación.

En esta experiencia se observa la circulación forzada por un gradiente térmico (que emula el calentamiento diferencial entre el ecuador y el polo) considerando la superficie terrestre plana y

sin rotación. En la zona de mayor calentamiento (análogo del ecuador) se produce el ascenso de las masas de agua (que emulan masas de aire), que son transportadas hacia la región fría (análogo de las latitudes altas) en las capas superiores del fluido. Durante ese trayecto la temperatura disminuye progresivamente, por lo cual la densidad aumenta y se produce el descenso. Al llegar al fondo del tanque (que emula la superficie de la Tierra) el agua más densa es transportada nuevamente hacia la región cálida (análogo del ecuador) en capas bajas, formando una celda que tiende a balancear la temperatura del sistema.

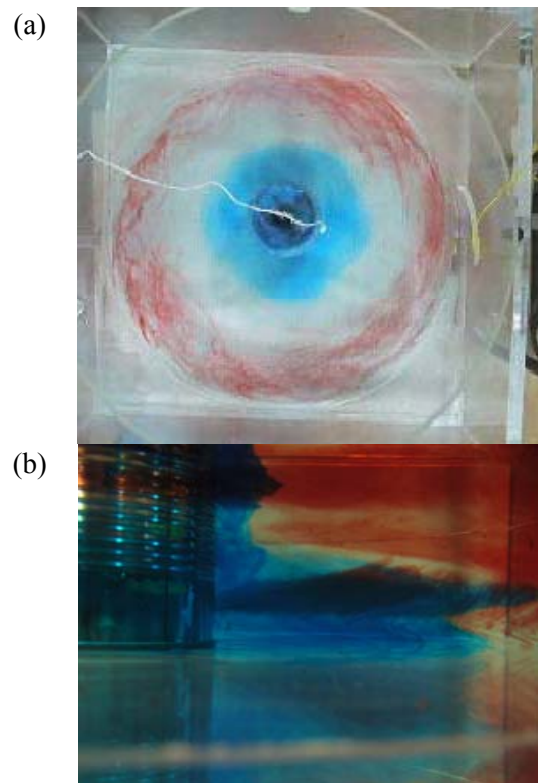


Figura 6: (a) Movimiento del fluido en el plano perpendicular al eje de rotación; (b) Circulación en un plano paralelo al que contiene al eje de rotación. El fluido más denso se muestra en color azul el menos denso en rojo. Se observa el desarrollo de una celda meridional similar a la propuesta por Hadley

En este experimento, en el plano perpendicular al eje de rotación (Figura 6.a), se observa un movimiento radial que se expande en forma concéntrica y uniforme, comunicando la zona

cálida en el borde del tanque ('ecuador') y la zona fría en el centro del tanque ('polo'). La Figura 6.b muestra la circulación en el plano vertical (plano que contiene al eje de rotación). En el fondo del dispositivo se observa una rama fría que se aleja de la región de menor temperatura hacia los bordes exteriores (trazador azul); por encima se observa una rama cálida que se dirige en sentido contrario (trazador rojo). Este resultado simula el modelo teórico de una sola celda (Celda de Hadley).

2.2.1.2. Experiencia 2: Circulación en presencia de un gradiente radial de temperatura y rotación.

En este experimento, las condiciones son similares a las del anterior, pero se hace rotar el tanque. El gradiente de temperatura que se obtuvo fue de aproximadamente de 4° C entre la región central y exterior del tanque. La Figura 7 muestra los resultados de este experimento. Se observan varias perturbaciones con forma de espiral inmersas en el flujo, que transportan fluido relativamente más frío hacia el borde exterior del tanque ('ecuador') y fluido relativamente más caliente hacia el centro del tanque ('polo'). Las flechas superpuestas indi-

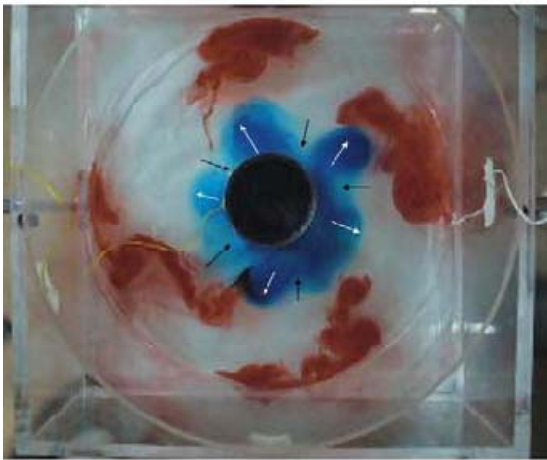


Figura 7: Movimiento del fluido con gradiente térmico y rotación. Las flechas indican la dirección y sentido del desplazamiento. Se observa la formación de ondas baroclínicas.

can el sentido de este transporte. Esta experiencia muestra como la atmósfera y el océano realizan las transferencias de calor en latitudes medias. La

comparación entre las figuras 5, 7 y 2.2.4 muestran un claro ajuste entre el modelo teórico, la experiencia de laboratorio y las observaciones.

2.3 La circulación profunda en el océano

Debido a la escasez de observaciones directas del flujo abisal en el océano, los experimentos de laboratorio y la teoría han sido una guía muy valiosa en la oceanografía a los efectos de deducir los patrones de circulación más probables. Hay dos inferencias importantes que se pueden hacer de las observaciones directas colectadas en el océano. Primero, las aguas densas se forman en la superficie en regiones relativamente pequeñas y altamente localizadas del océano en altas latitudes del Océano Atlántico. De esta manera, la circulación abisal parecería ser inducida por fuentes localizadas. Pero, por conservación de masa, por cada partícula de agua que se hunde, otra debe retornar a la superficie. Sin embargo, las distribuciones de propiedades observadas no sugieren que el retorno ocurra concentradamente en una o algunas regiones del océano. Es razonable suponer, entonces, que el retorno a la superficie, o surgencia, que compensa el hundimiento ocurre de modo disperso a la escala de las cuencas. Esta fue la hipótesis planteada por los estudios pioneros de Stommel (1958), Stommel y otros (1958) y Stommel y Arons (1960).

Las observaciones muestran que el flujo profundo es lento y se desarrolla en escalas de tiempo muy largas, de modo que el número de Rossby es pequeño. Por lo tanto, estará en balance geostrófico e hidrostático. Para comprender cómo responde una capa profunda en equilibrio geostrófico a una velocidad vertical (w_{PT}) impuesta por pérdida a medida que la capa cede agua a la capa superior, por encima de la termoclina, se utiliza la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles aplicada al flujo profundo interior (lejos de los contornos), geostrófico. La combinación de estas aproximaciones da como resultado:

$$\int_{fondo}^{PT} v dz = (f / \beta) w_{PT} \begin{cases} > 0 HN \\ < 0 HS \end{cases} \quad (4)$$

Donde PT es la profundidad de la base de la termoclina, donde se produce la surgencia, v es la velocidad meridional, f es el parámetro de Coriolis y β es la variación de dicho parámetro con la latitud. En el hemisferio norte (sur), f es positivo (negativo), y como tanto w_{PT} como β son positivos resulta que el transporte (representado por la integral del miembro de la derecha en 4) es positivo (negativo), o sea, hacia el polo. De esta manera, sorprendentemente, aunque las fuentes de agua profunda se encuentran los polos, el transporte meridional de masa en el interior del océano *también es hacia el polo*. Una manera alternativa de entender el flujo hacia los polos en el interior de los océanos, es a través del teorema de T-P en la esfera. Este teorema es una generalización del discutido en la sección 2.1 a una Tierra esférica. El teorema de T-P asegura que en un flujo barotrópico las columnas de fluido conservan su espesor con respecto al eje de rotación. En el caso de un tanque plano, como el del experimento discutido en la sección 2.1, el espesor siempre será el mismo, h . Sin embargo, en una Tierra esférica el espesor relativo al eje de rotación aumenta a medida que disminuye la latitud, como ilustra la Figura 8.

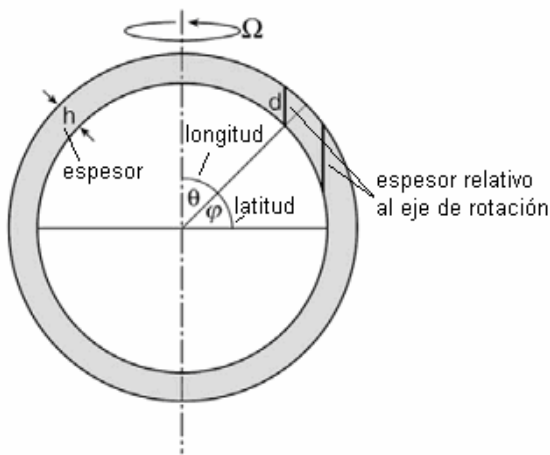


Figura 8: Una ilustración del teorema 1 Taylor-Proudman en una esfera rotante. Consideramos un casquete esférico de fluido homogéneo de espesor h . Las columnas de Taylor se alinean paralelamente al vector rotación Ω . La latitud es φ y la colatitud, θ . Adaptado de Marshall y Plumb (2007)

Volviendo al caso de la circulación profunda, si la columna pierde fluido por arriba por la sistemática surgencia, puede reducir su altura sin modificar su ancho (lo que no está permitido en estado estacionario por el teorema de T-P) simplemente moviéndose sistemáticamente hacia el polo en el casquete esférico. Este problema fue estudiado en términos de la ecuación (4) por Stommel y coautores (Stommel, 1958; Stommel y otros., 1958; Stommel y Aarons, 1960). Estos autores hipotizaron que la circulación de gran escala se cierra a través de corrientes de contorno oeste hacia el ecuador en todos los océanos. Ante sus curiosos resultados teóricos, los autores realizaron una serie de experimentos de laboratorio con el fin de confirmar sus hipótesis y verificar la validez de las aproximaciones utilizadas. Sus resultados son confirmados, además, por observaciones directas, como muestra la Figura 9. En la analogía experimental que discutimos en este trabajo, los resultados se explican en términos del teorema de T-P en la esfera.

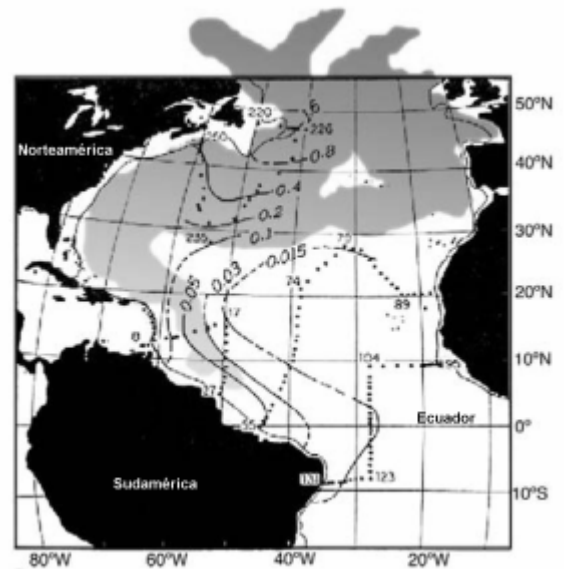


Figura 9: Observaciones de clorofluorocarbonos (CFCs) a una profundidad de 2 km (contornos). Superpuesto (en gris) se muestran los resultados de una simulación numérica de un modelo de la circulación oceánica con trazadores. Adaptado de Marshall y Plumb (2007).

2.3.1. Metodología y diseño experimental

Para la reproducción de la circulación profunda en una escala de laboratorio, se usa un tanque de acrílico cuadrado de 50×50 cm de lado, montado sobre una mesa rotante. Se utiliza como trazador agua con tinta vegetal azul, que desciende por gravedad desde un bidón situado fuera del dispositivo. Para controlar el flujo de entrada se utiliza un estrangulador de sueros. Además se instala una cámara digital solidaria al sistema rotante. El dispositivo se muestra en la Figura 10.

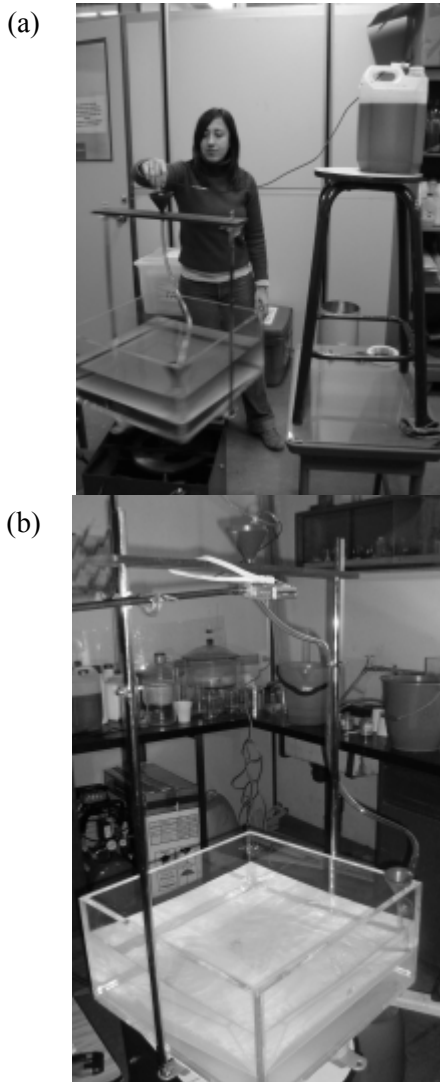


Figura 10: Dispositivo experimental para la ilustración de la circulación profunda del océano. (a) vista general; (b) detalle

Antes de iniciar la liberación del trazador, se debe hacer rotar la mesa hasta alcanzar su estado de rotación de cuerpo sólido, a fin de que las ondas de gravedad que se generan al encenderse el dispositivo se hayan disipado. Este proceso lleva aproximadamente 15 a 20 minutos.

Uno de los aspectos más relevantes desde el punto de vista didáctico es que este experimento es, en realidad, una analogía dinámica del proceso que ocurre en el océano profundo en el que, con el fin de representar la esfericidad terrestre, se coloca un fondo inclinado. La parte menos profunda del tanque simula las latitudes polares (las columnas de Taylor son más estrechas) y la más profunda, las ecuatoriales (las columnas son más altas). Mientras que en la naturaleza las columnas del océano profundo pueden ganar o perder fluido por intercambio con la capa superior, en el caso del experimento, sólo se tiene una capa. Si se introduce fluido en un tanque de lado de longitud L a una tasa S , entonces la profundidad en el tanque, o espesor de la columna, h , crece a una velocidad dada por:

$$dh/dt = S/L^2 \quad (5)$$

En presencia de rotación, las columnas de fluido en movimiento estacionario, lento y sin fricción deben, por el teorema de T-P, mantener su espesor. Por lo tanto, si la superficie libre se eleva, una columna del interior, debe moverse hacia el extremo más somero del tanque *conservando su altura*. En un tiempo Δt la superficie libre ha aumentado en Δh y, por lo tanto, la velocidad vertical es $w = \Delta h / \Delta t = S/L^2$ por (5). Dado que el desplazamiento de la columna debe ajustarse a la geometría de la cuña definida por la superficie libre y el fondo, entonces las velocidades horizontal y vertical deben mantener la relación $w/v = (dz/dt)/(dy/dt) = dz/dy = \alpha$, donde α es la pendiente del fondo. Por lo tanto, está dada por:

$$v = w/\alpha = (1/\alpha)(S/L^2) \quad (6)$$

que es exactamente análoga a (4). La columna se mueve hacia la parte menos profunda del tanque, es decir, hacia ‘el polo’. En relación con la analogía entre (6) y (4), vemos que α juega el rol de

$\beta D / f = D / a$, dado que $\beta \approx f / a$, donde D es la profundidad típica del océano y a es el radio de la Tierra. Es interesante notar que Ω (la velocidad angular de rotación del tanque) no aparece directamente en las ecuaciones (5) o (6). Sin embargo, la rotación es un forzante crucial a través de la imposición de las restricciones de T-P; este aspecto puede estudiarse en el laboratorio suprimiendo la rotación de la mesa, aunque dicho experimento no será discutido en este trabajo.

Considerando algunos valores típicos, si $S = 20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$, $\alpha = 0,2$, $L = 50 \text{ cm}$, encontramos que $v = 3,3 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, o sólo 20 cm en 10 minutos. Las corrientes de contorno son mucho más rápidas. En la experiencia se espera que los alumnos no sólo observen la circulación predicha por la teoría, sino que verifiquen las escalas.

2.3.2. Resultados

La figura 11 muestra la secuencia de la evolución del trazador en el océano profundo. La tinta se libera en el extremo este del lado polar (menos profundo), que comienza a fluir hacia el

oeste (Figura 11.a). Al alcanzar el extremo 'occidental' del tanque, se forma una corriente de contorno estrecha y rápida, que se desplaza hacia el ecuador (parte más profunda del tanque) hasta que encuentra la pared del lado profundo del tanque (Figura 11.b). Allí la corriente comienza a desplazarse al 'este', retornando el flujo a lo largo de toda la cuenca, compensando el transporte por la corriente de contorno (Figura 11.c). El experimento ilustra exitosamente los principales rasgos de la circulación abisal en el océano: pese a la presencia de una fuente de masa en el polo, la circulación en el interior de toda la cuenca es hacia la fuente y es cerrada por la ocurrencia de una corriente de contorno oeste estrecha y relativamente rápida que fluye hacia el ecuador. En el caso particular del experimento mostrado en la figura 10, del lado oeste del sector polar se introdujo una pequeña elevación del fondo respecto de su lado este. Como se observa, el flujo se mantuvo acorde a lo predicho por la teoría: las columnas de Taylor preservaron la altura, viajando por la zona de igual profundidad y alejándose ligeramente de la pared 'sur'.

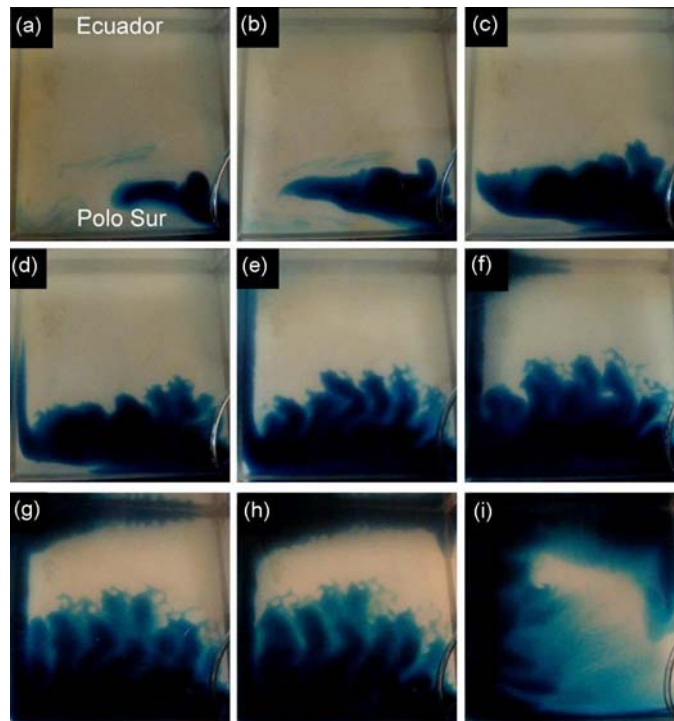


Figura 10: Secuencia del experimento de circulación profunda en el océano. Se observa la formación de la corriente de contorno oeste y el trasporte de masa hacia el polo en el interior del océano.

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se ilustra cómo, con el equipamiento disponible en el laboratorio del DCAO, es posible llevar a cabo experiencias sencillas que ilustren y ayuden a entender al alumno los procesos físicos que subyacen por detrás de resultados teóricos poco intuitivos como el Teorema de T-P, o características generales de la circulación del océano y la atmósfera.

Estos experimentos están siendo utilizados activamente en cursos de grado del DCAO. Se observa que los estudiantes no sólo se motivan y divierten durante la ejecución de los experimentos, sino que se sorprenden con los resultados, aún si los mismos son predichos por la teoría y la misma les ha sido presentada en las clases correspondientes. Esto sirve como disparador de preguntas y suscita nuevas discusiones en el aula, que ayudan a que el alumno comprenda los aspectos teóricos y fije las ideas. Además, los estudiantes se motivan a desarrollar más experimentos, lo que resulta en un círculo virtuoso. El éxito de la iniciativa a llevado a que el DCAO genere una materia nueva, Laboratorio de Fluidos Geofísicos a partir del segundo cuatrimestre de 2010.

Los valiosos resultados obtenidos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, así como en lo que respecta a la extensión y divulgación, sugieren que el esfuerzo por mejorar los recursos de laboratorio y la base de experimentos disponibles en el DCAO debe continuar.

Agradecimientos: A la Asociación Física Argentina (a través del Programa INVOFI) y al Dr. Mario N. Núñez (CIMA/CONICET-UBA) por financiar la construcción de la mesa rotante y la adquisición de los tanques acrílicos, respectivamente. Al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN-UBA por proporcionar la infraestructura y financiar la compra de materiales e insumos, así como por el apoyo prestado para la ejecución de este proyecto. A la Dra. Leonor Bonan y al Sr. Julián Suárez por las sugerencias y ayuda permanente. A las revisoras del trabajo, Dras. Bibiana Cerne y Lydia Galagovsky por sus enriquecedores comentarios. Los costos de

publicación fueron cubiertos con el proyecto de la Universidad de Buenos Aires UBACyT X-176.

REFERENCIAS

Charney, J. G., 1947. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.*, **5**, 44-57.

Eady, E. T., 1949. Long waves and cyclone waves. *Tellus*, **1**, 33-52

Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. Vol 30, Academic Press, 645 págs.

Holton J. R., 2004. *An introduction to dynamical meteorology*, Fourth edition, Elsevier, 535 pags.

Marshall, J. y Plumb, A., 2007. *Circulation of the Atmosphere and Ocean: an introductory text* Massachusetts Institute of Technology, 519 págs.

Martin, S. y Drucker, R., 1997. The effect of possible Taylor columns on the summer ice retreat in the Chukchi Sea. *J. Geophys. Res.* **102**, 10473-10482.

Proudman, J., 1916. On the motion of solids in a liquid possessing vorticity, *Proceedings of the Royal Society of London A*, **92**, 408-424.

Stommel H., 1958. The abyssal circulation. *Deep-Sea Res.* **5(1)**, 80-82.

Stommel H., y A.B. Aarons. 1960: On the abyssal circulation of the world ocean—II. An idealized model of the circulation pattern and amplitude in oceanic basins. *Deep-Sea Res.* **6**, 217-233.

Stommel H., Aarons, A.B. y Faller, A.J., 1958. Some examples of stationary flow patterns in bounded basins. *Tellus* **10(2)**, 179-187.

Taylor, G.I., 1923. Stability of a Viscous Liquid contained between Two Rotating Cylinders. *Phil. Trans. Royal Society* **A223**, 289-343.