

Ondas de Rossby topográficas

Adaro Martín, Bodnariuk Nicolás, Dinapoli Matías, Espinoza Karina

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Dinámica de la atmósfera y el océano I

RESUMEN: El comportamiento dinámico de los fluidos geofísicos se encuentra en gran medida influenciado por el efecto de la rotación, el cual se manifiesta principalmente en el control que la fuerza de Coriolis ejerce sobre el movimiento. En función de un desarrollo teórico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido homogéneo rotante no disipativo puede demostrarse que existe una magnitud conservativa denominada vorticidad potencial que condiciona fuertemente la dinámica del sistema. Cuando las variaciones del parámetro de Coriolis con la latitud o los gradientes topográficos constituyen los mecanismos restitutos, se origina un tipo de onda particular denominada onda de Rossby. El objetivo del proyecto radica en comprender la dinámica de propagación de dichas ondas mediante su generación a escala de laboratorio. Este estudio se encuentra motivado por la influencia que dichas perturbaciones, de escala planetaria, poseen en la dinámica de una gran variedad de fenómenos atmosféricos y oceánicos, como por ejemplo ENSO.

INTRODUCCIÓN

El movimiento de los eddies en la atmósfera y el océano corresponde a la escala cuasigeostrófica. En base a un análisis dimensional en coordenadas esféricas y bajo las aproximaciones hidrostáticas, plano beta, casquete esférico, cuasi-geostrófica junto con la hipótesis de Boussinesq se tiene que las perturbaciones correspondientes a dicha escala se encuentran gobernadas por la siguiente ecuación escalada [1]:

$$\left(\frac{f}{|f|} \frac{\partial}{\partial t'} - \frac{\partial \psi'}{\partial y'} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial \psi'}{\partial x'} \frac{\partial}{\partial y'} \right) \left(\frac{f}{|f|} \nabla^2 \psi + \beta' y' + \frac{f}{|f|} (\eta'_b - F \psi') \right) = 0 \quad (1)$$

donde ψ' es la función corriente asociada al campo de velocidades, f la vorticidad planetaria, β' el cociente entre el gradiente latitudinal de vorticidad planetaria y el gradiente de vorticidad relativa del fluido, η'_b la topografía de fondo y F el número de Froude (cociente entre la escala de movimiento y el radio de deformación de Rossby).

Como puede observarse, la expresión anterior expresa la conservación de la vorticidad absoluta de cada partícula de fluido: $\Delta\psi$ representa la vorticidad relativa inducida en el océano debido al desplazamiento de una parcela en un ambiente donde la vorticidad planetaria varía β 'y' o donde la topografía induce estiramientos o estrechamientos de los tubos de vórtice (η'_b). Finalmente, $F\psi'$ representa el impacto que la superficie libre genera en el estrechamiento del tubo de vórtice.

En el laboratorio la forma más sencilla de generar un ambiente donde la vorticidad planetaria varíe en una dirección puede lograrse generando topografía de fondo. Con el objetivo de conseguir un ambiente dinámico semejante al plano beta se consideró una variación lineal de la topografía en dirección N-S:

$$\eta_b = D \left(\frac{\Delta\eta}{D} \frac{y}{L} \right) = D (s\epsilon y') \quad (2)$$

donde L representa la escala de desplazamiento del fluido; s la pendiente de la topografía; y ϵ el cociente entre la vorticidad relativa y la planetaria. Si consideramos la propagación de una perturbación de pequeña amplitud, es decir, una perturbación para la cual la velocidad de fase es mayor a la velocidad inducida en el fluido, es posible linealizar la ecuación tomando que

$$O \left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{\nabla}}{\frac{\partial}{\partial t}} \right) = O \left(\frac{U}{\frac{L}{T}} \right) = O \left(\frac{U}{c} \right) \ll 1. \quad (3)$$

En el experimento desarrollado en el laboratorio se considera sólo el efecto que la topografía posee sobre la dinámica. En este caso la ecuación (1) linealizada se expresa como

$$\frac{\partial}{\partial t'} (\nabla^2 \psi' - F\psi') + s \frac{f}{|f|} \frac{\partial \psi'}{\partial x'} = 0. \quad (4)$$

En base a la linealización consistente con la consideración de pequeñas perturbaciones, la solución de la ecuación (4) puede descomponerse por sus componentes de Fourier:

$\psi'_n = \Re \left\{ \hat{\psi}'_n e^{i(\vec{k}'_H \cdot \vec{r}' - \omega' t')} \right\}$. Reemplazando en la ecuación 1 se obtiene la relación de dispersión re-escalada:

$$\omega = - \frac{f}{|f|} \frac{s k_x}{k_H^2 + Ro^{-2}} \quad (5)$$

donde Ro representa el radio de deformación de Rossby. Es decir, la escala para la cual la vorticidad relativa y el estrechamiento de tubo de vórtice contribuyen de igual forma a la conservación de la vorticidad absoluta.

Como puede observarse en (5) las ondas características de la ecuación (4) son de tipo dispersivas y propagan fase exclusivamente hacia el oeste. Las mismas se denominan **Ondas de Rossby**.

DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

Para llevar a campo la generación de estas ondas se contó con una pecera montada sobre una mesa rotante, con dimensiones de base: 46,7 cm x 46,7 (figura 1). La topografía de fondo se armó en base a una placa de acrílico de dimensiones comparables a las de la base de la pecera. La inclinación óptima de dicha placa para poder observar el fenómeno se estimó teniendo en cuenta que el diámetro medio de los eddies observados a escala laboratorio es de 5 cm, que la escala de velocidad es de 0,5 cm/s y que la velocidad de rotación de la mesa se asocia a $f \sim 2,09$ s. Bajo las consideraciones detalladas anteriormente se obtuvo $\varepsilon \sim 0,1$.



Figura 1. Dispositivo experimental. Los tubos metálicos constituyen los soportes de la cámara de video. Las paredes de la pecera fueron cubiertas con hojas para filmar únicamente el interior de la misma.

Una vez establecido el equilibrio de la masa rotante, se procedió a depositar un bloque de hielo coloreado el cual generó las perturbaciones en el campo de velocidades debido al gradiente de temperatura. Las parcelas que atraviesan las isobatas sienten la variación de vorticidad ambiental, y por conservación de la vorticidad absoluta, desarrollan vorticidad relativa de manera de ser restituidas a su isobata original, figura 2.

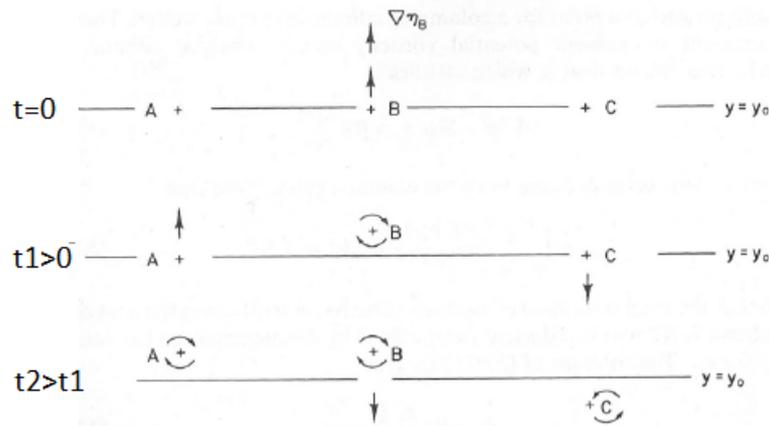


Figura 2. Mecanismo restitutivo de la onda de Rossby basado en la conservación de la vorticidad absoluta.

Esta evolución se apreció en las líneas de traza generadas por el colorante, captadas por la cámara de video solidaria al sistema rotante.

RESULTADOS

La altura del agua sobre la pecera se fijó en $H=14$ cm, lo que implicó montar una pendiente del fondo de $\Delta H=sH_0 \sim 1.4$ cm. Dado que la mesa rotante gira en sentido horario (como el hemisferio sur) se dispuso la plataforma de acrílico de manera tal que la pendiente correspondiera a la dirección Norte - Sur. Es decir, las isobatas se extendieron de Este a Oeste.

Se realizaron tres experimentos: uno de control con fondo plano, otro en las condiciones anteriormente mencionadas y por último uno con pendiente mayor a la calculada.

Respecto al experimento de control, en la figura 3 puede observarse que sólo se percibe la generación de columnas de Taylor.

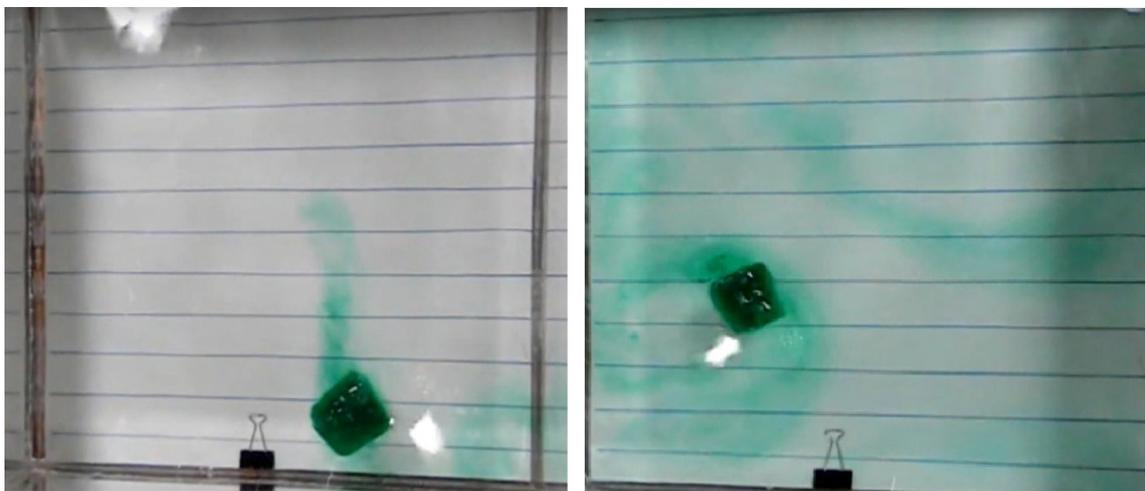


Figura 3. Experiencia 1. Evolución del fluido en un ambiente con fondo plano.

En el caso de la experiencia 2 (figura 4), el fondo se caracterizó por poseer una elevación de $\Delta H = 1,4$ cm. En este caso se evidenció la generación de eddies, tal como era de esperarse en base a las consideraciones teóricas. La imagen superior izquierda muestra la formación de los eddies debido al forzante. La imagen superior derecha muestra un instante posterior donde estos eddies comienzan a propagarse hacia el oeste siguiendo las líneas de las isobatas. En la imagen inferior derecha se muestra un estado más desarrollado en donde se corroboraron las hipótesis de la dimensión de los eddies y su velocidad media de propagación. Por último, en la imagen inferior izquierda se muestra el sistema ya sin forzante donde se ve que el sistema sigue la evolución de las ondas de Rossby: eddies viajando hacia el oeste, dejando aguas someras a la izquierda.

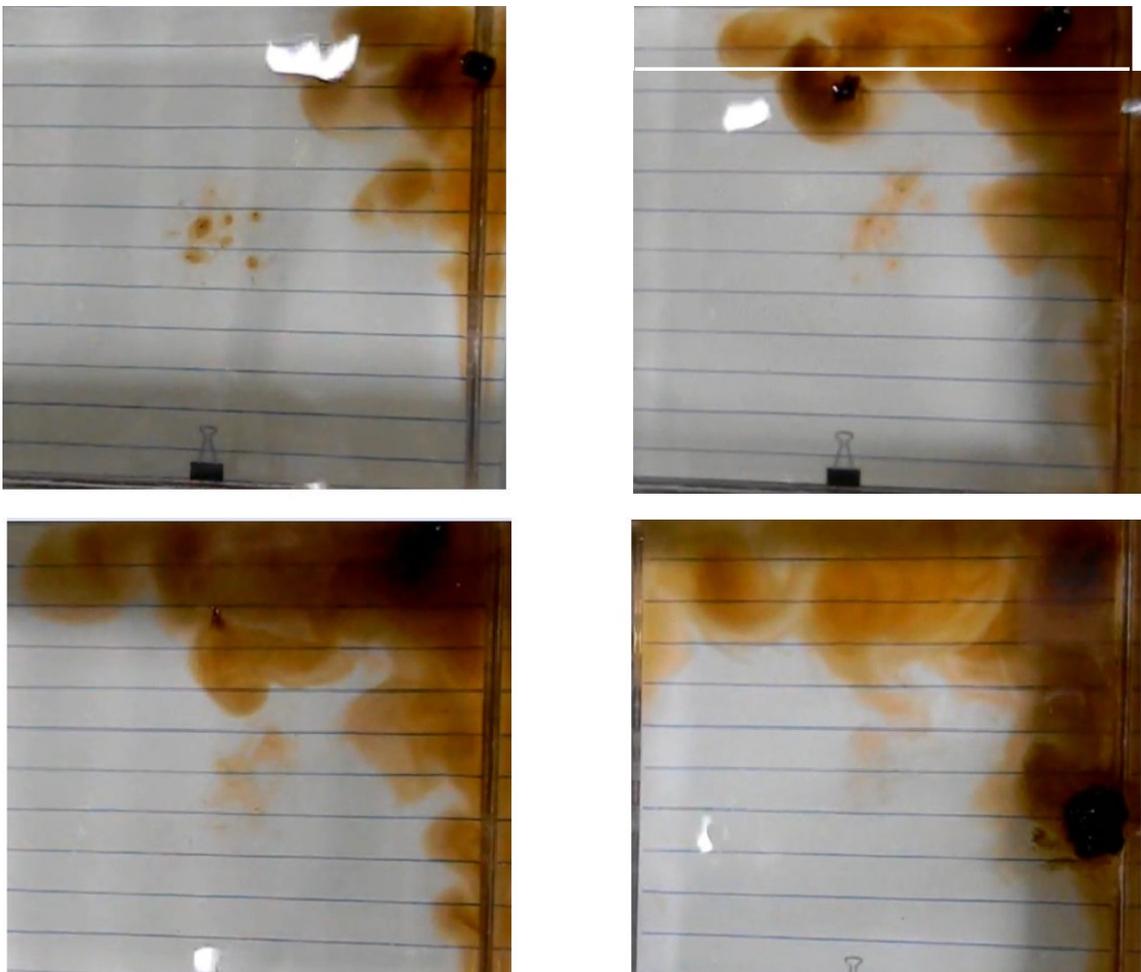


Figura 4. Experiencia 2. Generación de ondas de Rossby en un ambiente con topografía suave.

Por último, en la figura 5 puede observarse el tercer experimento correspondiente a una topografía más abrupta que restringió en gran medida a la dinámica del flujo.

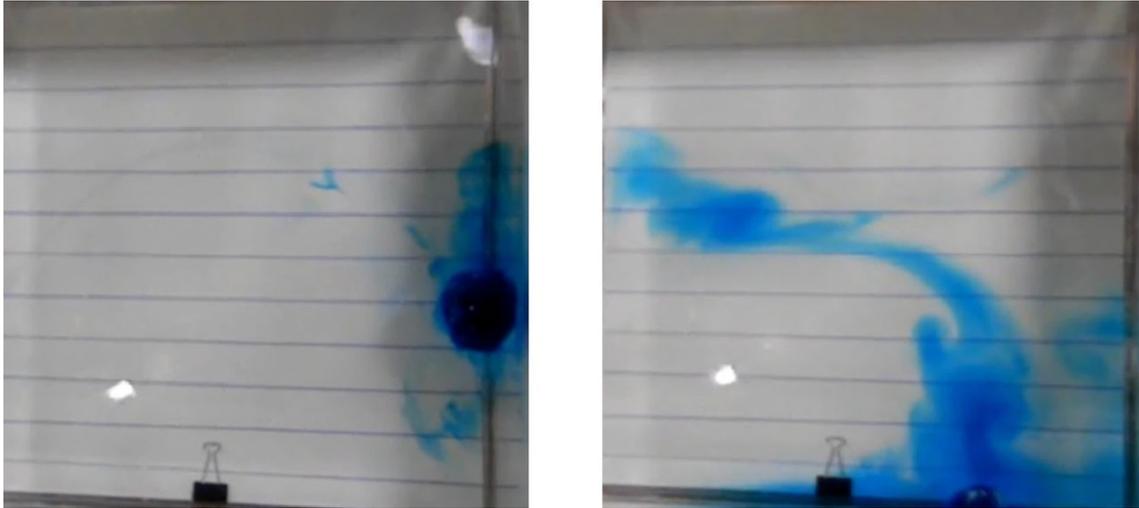


Figura 5. Experiencia 3. La topografía restringe el movimiento del sistema a través de las isobatas.

CONCLUSIONES

Cuando el experimento se montó considerando los valores de los número adimensionales ϵ y s calculados en base al marco teórico se pudieron generar ondas de Rossby topográficas. Los eddies generados propagaron eminentemente hacia el Oeste con una componente principal de desplazamiento a lo largo de las isobatas. En el experimento de topografía plana sólo se observó el desarrollo de columnas de Taylor. La ausencia de formas de fondo implicó la inexistencia de un gradiente latitudinal de vorticidad ambiental, el cual constituye un requisito indispensable para la generación de ondas de Rossby. Finalmente en la última experiencia, el incremento abrupto de la pendiente de fondo generó una gran restricción sobre el movimiento del fluido, limitando al mismo a moverse a lo largo de las isobatas. Esta restricción evitó activar los mecanismos necesarios para la generación de ondas de Rossby.

REFERENCIAS

- Joseph Pedlosky, 1992. Springer, "*Geophysical Fluid Dynamics*", 2nd ed. 1987. Corr. 2nd printing edition, March 25.
- Adrian E. Gill, 1982. Academic Press, "*Atmosphere-Ocean Dynamics, Vol. 30*", International Geophysics, November 28.