

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDIA  
MÁSTER UNIVERSITARIO EN EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO  
AMBIENTAL DE ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

## **Estudio de la generación y propagación de ondas de Rossby a pequeña escala**

***TRABAJO FINAL DE MÁSTER***

Autor:  
**Sara López Calderón**

Directores:  
**D. Víctor J. Sánchez Morcillo**

***GANDIA, 2013***

# ÍNDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS DE LAS ONDAS DE ROSSBY .....	4
1.1 INTRODUCCIÓN .....	4
1.2 ONDAS DE ROSSBY .....	6
1.2.1 Descripción .....	6
1.2.2 Formulación teórica .....	7
1.2.3 Mecanismo físico .....	9
1.3 EJEMPLOS EN LA ATMÓSFERA Y OCÉANO .....	11
1.3.1 Ejemplos en la atmósfera .....	11
1.3.2 Ejemplos en el océano .....	11
1.3.3 Formación de eddies .....	13
CAPÍTULO 2: TRABAJO EXPERIMENTAL .....	14
2.1 MATERIAL Y MÉTODOS .....	14
2.1.1 Dispositivo experimental .....	14
2.1.2 Mecanismo de generación .....	17
2.1.3 Sistema de captura de imágenes y vídeo .....	17
CAPÍTULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	19
3.1 EXPERIMENTO CON PLANO INCLINADO .....	19
Caso 1: $\Omega = 0$ y $\beta = 0$ .....	20
Caso 2: $\Omega = 0$ y $\beta \neq 0$ .....	21
Caso 3: $\Omega = 15\text{rpm}$ y $\beta = 0$ .....	22
Caso 4: $\Omega = 15\text{rpm}$ y $\beta \neq 0$ .....	22
3.2 EXPERIMENTO CON CONO .....	26
Caso 1: $\Omega = 0$ .....	26
Caso 2: $\Omega = 15\text{rpm}$ .....	26
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	30
AGRADECIMIENTOS .....	31
BIBLIOGRAFIA .....	32

## RESUMEN

El propósito de este trabajo es generar ondas de Rossby en el laboratorio a pequeña escala y estudiar su mecanismo de formación. Por tanto se pretende observar la teoría descrita por Rossby a través de la generación de ondas en el experimento.

Estas ondas son importantes para caracterizar la distribución de la temperatura en el océano y la atmósfera.

Para ello se estudiarán diferentes casos para comprobar dicha teoría, modificando el plano de inclinación o la velocidad de rotación.

La parte numérica está basada en fórmulas de diferentes experimentos y estudios de dichas ondas en las que se tiene en cuenta la esfericidad de la Tierra, la componente de Coriolis, el potencial de vorticidad, además de otros parámetros como la latitud (plano  $\beta$ ) o la profundidad del fluido.

La parte experimental se realiza en una tabla giratoria en la cual se sitúa un tanque de PVC con agua en la que se simulará la rotación de la Tierra y la variación latitudinal. Las ondas serán observadas gracias a la elaboración de cubos de hielo con colorante que permitirán la visualización de dichas ondas.

**PALABRAS CLAVE:** ondas de Rossby, ondas planetarias, tabla giratoria, distribución de temperatura.

## **ABSTRACT**

The aim of this research is to generate Rossby waves in the laboratory to small scale and to study the mechanism of their formation. Therefore, it pretends to observe the theory described by Rossby through the generation of waves in the experiment.

These waves are important because they characterize the distribution of the temperature in the ocean and the atmosphere.

For this reason we are going to study different cases to verify that theory, by modifying the plane tilt or rotation speed.

The numerical study is established by formulas of different experiments and studies of such waves, in which we consider the roundness of the Earth, the Coriolis component or the potential vorticity, besides other parameters like the latitude ( $\beta$  plane) or fluid depth.

The experimental part will be performed on a rotating table on which we will place a PVC tank with water. In this tank we simulate the rotation of the Earth and latitude variation. The waves will be observed by the production of ice cubes with colourings. They allow the display of these waves.

**KEY WORDS:** Rossby waves, planetary waves, rotating table, temperature distribution.

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS DE LAS ONDAS DE ROSSBY

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La Tierra recibe emisiones de energía en forma de radiación proveniente del Sol, esto es lo que permite el calentamiento de la Tierra. Pero este calentamiento no es homogéneo en la superficie del planeta, tanto en la atmósfera como en el océano. Debido a la esfericidad de la Tierra las regiones ecuatoriales y tropicales reciben mayor energía solar que las latitudes medias y regiones polares.

La Tierra a su vez, también emite radiación hacia el espacio, y esta energía emitida tampoco se distribuye homogéneamente, ya que depende de la temperatura de la superficie. Las regiones ecuatoriales emiten mayor energía que las regiones polares al estar a mayor temperatura.

En la siguiente imagen (Fig. 1), se observa la distribución de las calorías netas que recibe y emite la superficie de la Tierra. En resumen, en las latitudes altas se pierde más calor del que se recibe, y en las latitudes bajas se gana más calor del que se pierde.

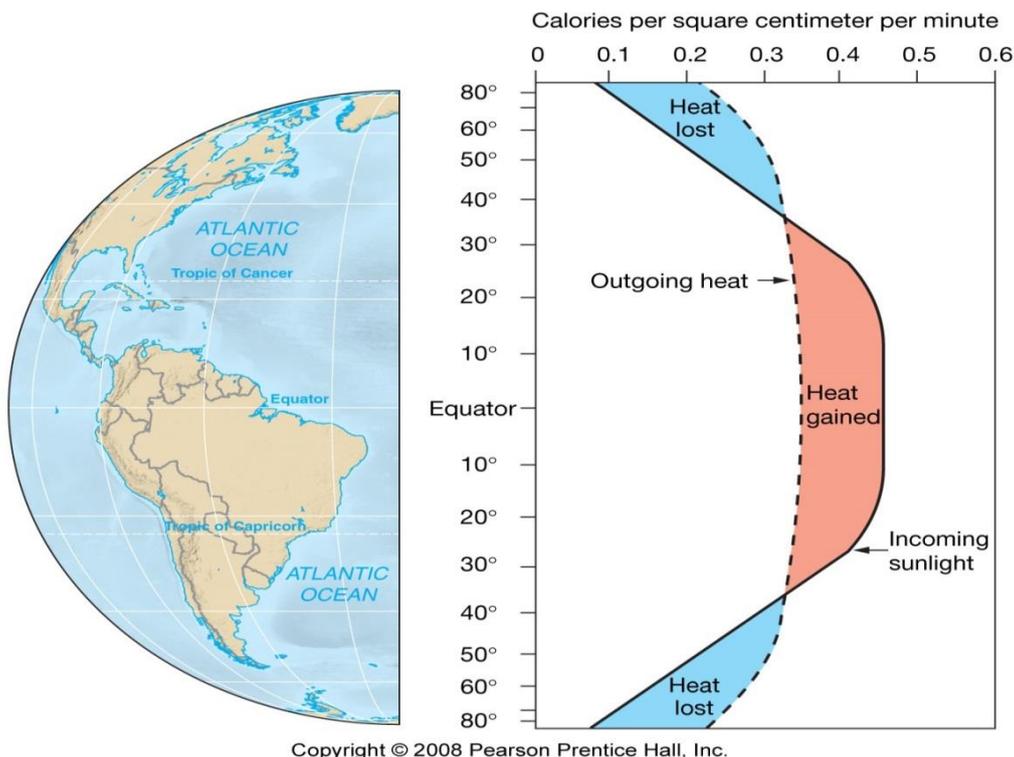


Fig. 1 Calorías por centímetro cuadrado. [1]

Debido a este desequilibrio latitudinal se da origen a la circulación atmosférica y oceánica, es decir, la energía calorífica se redistribuye desde las regiones más cálidas hasta las más frías por medio de dicha circulación. La figura 2 (Fig. 2) muestra la circulación global de la atmósfera y la figura 3 (Fig.3), la circulación global oceánica.

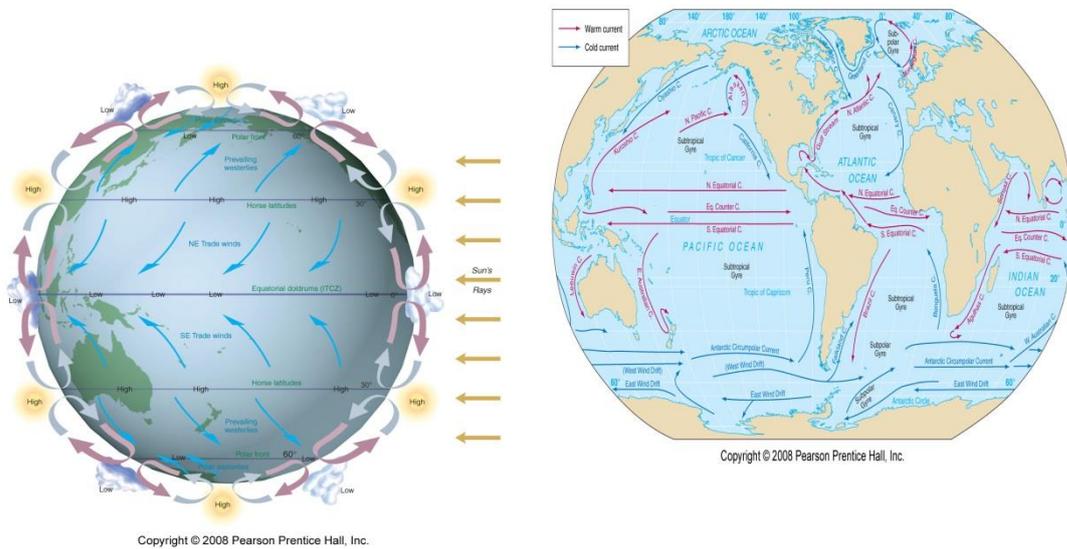


Fig. 2. Circulación global de la atmósfera. [1] Fig. 3. Circulación global del océano [1]

En latitudes medias, el transporte de energía lo llevan a cabo fundamentalmente las ondas planetarias u ondas de Rossby, que son generadas por inestabilidades térmicas y/o dinámicas en el flujo. En las figuras 4 y 5 (Fig. 4 y Fig. 5) se puede observar el mecanismo de formación de dichas ondas.

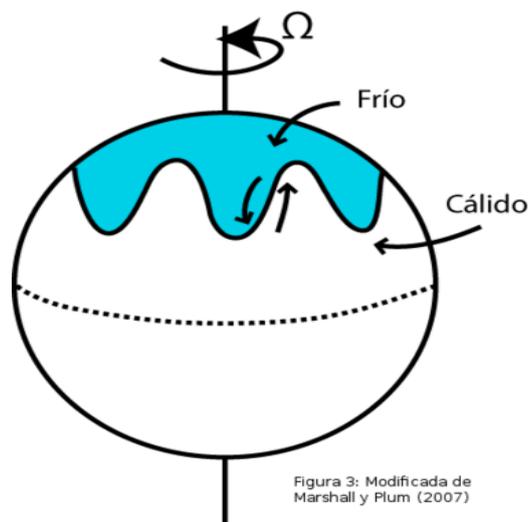


Fig.4 Mecanismo de formación de ondas planetarias [2]

Se conocen como ondas de Rossby en honor de Carl-Gustaf Arvid Rossby, meteorólogo estadounidense de origen sueco que explico por primera vez los movimientos atmosféricos de gran escala basándose en la física de fluidos y fundó el Departamento Meteorológico del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) [3].

## 1.2 ONDAS DE ROSSBY

### 1.2.1 Descripción

Las ondas de Rossby u ondas planetarias, deben su existencia a la forma esférica y a la rotación de la Tierra, y son uno de los fenómenos naturales más intrigantes, menos conocidos y con importantes implicaciones en la evolución del clima. Se producen en ambos fluidos geofísicos, tanto la atmósfera como el océano, y aunque su observación es mucho más clara y evidente en la atmósfera (en forma de oscilaciones o meandros, por ejemplo, en las corrientes de chorro o jet-stream de las latitudes medias), en el caso del océano se han detectado recientemente mediante altimetría por satélite [4].



Fig.5 Representación gráfica de ondas planetarias en la atmósfera. [2]

La dificultad en la detección de las ondas de Rossby en el océano estriba en que son ondas que se manifiestan muy débilmente, produciendo variaciones en la elevación del agua de pocos centímetros, a pesar de tener longitudes de onda de cientos de kilómetros. La diferencia entre las escalas vertical y horizontal es de muchos órdenes de magnitud, lo que dificulta su observación. Aun así, son capaces de transportar una enorme cantidad de calor, por lo que se cree que juegan un papel relevante en la variabilidad del clima.

De hecho, se presupone que tienen efectos importantes en la circulación oceánica a gran escala, y por lo tanto el tiempo y el clima. Quizás el efecto más importante de estas ondas es en las corrientes de borde Oeste, como la Corriente del Golfo. Las ondas de Rossby pueden intensificar las corrientes, así como desplazarlas de su

curso habitual. Si tenemos en cuenta que las corrientes transportan enormes cantidades de calor, podemos entender fácilmente que incluso un pequeño cambio en la posición de la corriente puede afectar dramáticamente el clima en grandes áreas del globo. En el Pacífico Norte, por ejemplo, una onda de Rossby, después de los 10 años más o menos que se tarda en recorrer la cuenca, puede empujar a la corriente de Kuroshio norte actuales y afectar el tiempo en el continente de América del Norte. Esto podría haber ocurrido ya en 1993, y se conjetura que una onda Rossby pudo ser responsable de El Niño de 1982-83.

Otra característica importante de las ondas de Rossby es que siempre viajan de Este a Oeste, siguiendo los paralelos. La velocidad de propagación es lenta, típicamente de unos pocos centímetros por segundo, y depende de la latitud aumentando hacia el ecuador. Una onda de Rossby puede tardar meses o años en cruzar un océano de lado a lado.

Las ondas de Rossby en el océano son responsables de establecer la intensificación hacia el oeste de los giros de circulación oceánicos, siendo la Corriente del Golfo un ejemplo de esto. También son el mecanismo dinámico mediante el cual el océano se ajusta a los cambios en la atmósfera a gran escala, por ejemplo, transmitiendo perturbaciones desde los océanos tropicales hasta medias y altas latitudes.

### **1.2.2 Formulación teórica**

Las ondas de Rossby se pueden entender, en cierto sentido, como olas de gran escala en el océano o la atmósfera cuya fuerza de recuperación es el efecto de la variación latitudinal del componente vertical local de vector angular de rotación de la Tierra, es decir, la fuerza de Coriolis. En esto se diferencia del resto de ondas presentes en el océano, cuya fuerza restauradora es fundamentalmente la gravedad.

Una manera de abordar teóricamente el estudio de las ondas de Rossby que nos permita obtener algunas de sus principales características (velocidad de propagación, longitud de onda, etc) es a través de una de las leyes de conservación más importante en el océano: la conservación de la vorticidad potencial. Esta se define como

$$VP = \frac{\zeta + f}{H} \quad (1)$$

donde  $\zeta = \nabla \times \mathbf{u}$  es la vorticidad relativa del fluido,  $f = 2\Omega \sin\varphi$  es la vorticidad planetaria o parámetro de Coriolis, y  $H$  es la altura de la columna de fluido, o profundidad local. Dicha magnitud debe conservarse, y por lo tanto

$$\frac{D}{Dt} \left( \frac{\zeta + f}{H} \right) = 0 \quad (2)$$

Si consideramos que tenemos un número de Rossby pequeño, el flujo en rotación cumple que  $\zeta \ll f$ , y la ecuación anterior se reduce a

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{DH}{Dt} \times \frac{f}{H} \quad (3)$$

Tenemos que tener en cuenta que si  $DH/Dt < 0$  se tiene en la dirección vertical que  $\frac{D\zeta}{Dt} < 0$ , por lo que se induce una vorticidad anticiclónica. Del mismo modo, si  $DH/dt > 0$ , tendremos que  $\frac{D\zeta}{Dt} > 0$  y se inducirá una vorticidad ciclónica.

Ahora tomando  $y$  para que sea la coordenada en la dirección de disminución de la profundidad, tendremos que:

$$cp = \frac{\omega}{k} = -\frac{\beta}{K^2} \quad (4)$$

Por tanto, sustituyendo en la ecuación 3 y teniendo en cuenta las componentes verticales, tenemos:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \beta v \quad (5)$$

donde

$$\beta = \frac{dH}{dy} \frac{f}{H} \quad (6)$$

Aquí  $\beta = (\text{gradiente de profundidad del tanque}) \times f / H$ . Esto es análogo de  $\beta = df/dy$ , que la variación con la latitud del parámetro de Coriolis como ya se comentó anteriormente.

Introduciendo una función de corriente para el flujo,  $\psi$ , en la ecuación 6, obtendremos la ecuación de onda de Rossby:

$$\frac{\partial(\nabla^2 \psi)}{\partial t} + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

donde  $x$  indica la dirección este-oeste a una profundidad constante.

Aquí  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  es operador laplaciano actuando sobre el plano horizontal

Buscando la solución en forma de onda armónica, del tipo  $\psi = \tilde{\psi} e^{i(kx + ly - \omega t)}$ , volvemos a la ecuación 2 de la relación de dispersión  $\beta^* = \beta$ .

Teniendo que  $k = l$ ,  $\lambda = 2\pi/k$ , derivamos la expresión para la fase de velocidad, la cual podremos aplicar a nuestro experimento:

$$C_p = \frac{\frac{dH}{dy}}{H} f \frac{\lambda^2}{4\pi^2} = \frac{\beta}{k^2} \quad (8)$$

### **1.2.3 Mecanismo físico**

La atmósfera y el océano se encuentran girando a una determinada velocidad debido a al sistema de rotación de la Tierra, por ello se verán afectados (suponiendo que el fluido sea barotrópico, es decir, que  $\rho = \rho(p)$ ) por el Teorema de Taylor-Proudman [9]:

$$(\Omega \cdot \nabla) \mathbf{u} = 0 \quad (9)$$

Donde  $\Omega$  es el vector del movimiento de rotación,  $\mathbf{u}$  es el vector de flujo,  $\rho$  es la densidad y  $p$  la presión. Por tanto  $\mathbf{u}$  no variara en la dirección paralela a  $\Omega$  en las condiciones descritas.

Por la ecuación (9) sabemos que las columnas de Taylor no pueden cambiar su longitud, por lo tanto las columnas señaladas en la figura 8 (Fig.8) se pueden mover fácilmente de este a oeste (al menos en ausencia de límites meridionales). Sin embargo debido a la esfericidad de la Tierra las columnas no pueden moverse de norte a sur ya que esto supondría un cambio de longitud.

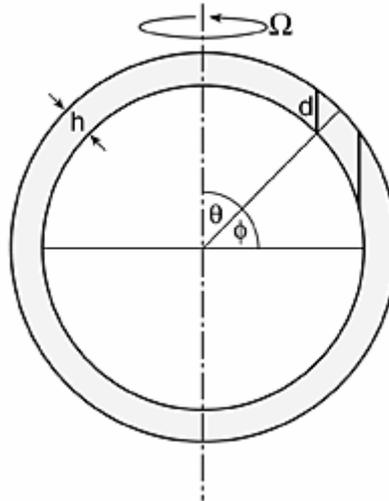


Fig.6 Un ejemplo de Taylor-Proudman en una esfera giratoria. Dibujamos una célula esférica de fluido homogéneo y espesor constante  $h$ . La longitud de las columnas de Taylor,  $d$ , alineado en paralelo a  $\Omega$  aumenta a medida que se acerca a la línea ecuatorial.[8]

Supongamos que una columna de la figura 6 (o en el tanque con el plano inclinado) se desplaza hacia los polos, es decir hacia la parte menos profunda del tanque. La longitud de la columna de Taylor debería ser reducida, por tanto la columna se vería aplastada, por lo que se induciría una vorticidad anticiclónica. Si se desplaza la columna hacia el ecuador se genera una vorticidad ciclónica, y por tanto la columna se estiraría.

El desplazamiento de estas columnas de Taylor del polo al ecuador dan como resultado un patrón ondulante hacia el oeste (ver Fig.7). Este patrón se conoce como Ondas de Rossby.

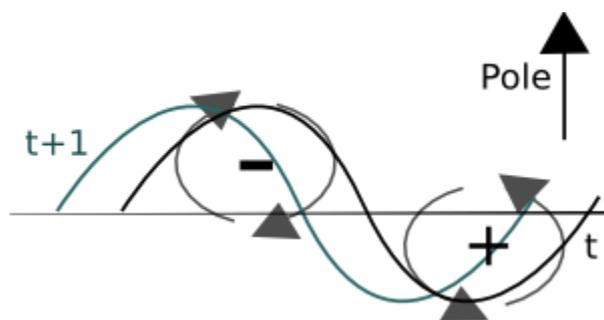


Fig.7 El sentido de la vorticidad relativa inducida por el desplazamiento meridional de columnas de Taylor. El "+" representa la vorticidad asociada con una columna estirada Taylor, y el "-" representa que asocia con una columna aplastada Taylor. La fase del patrón de vorticidad ondulante se propaga hacia el oeste. [8]

Se puede demostrar, como ya hemos explicado anteriormente, que en la esfera, las ondas de Rossby satisfacen la relación de dispersión (ecuación 4)

## 1.3 EJEMPLOS EN LA ATMÓSFERA Y OCÉANO

### 1.3.1 Ejemplos en la atmósfera

En la atmósfera, la generación de ondas planetarias es análoga a la formación en el océano. El flujo de aire sobre las montañas se ve afectado por la esfericidad de la Tierra y su rotación. Las longitudes de ondas pueden llegar a ser de hasta 500km generadas en latitudes medias bajo las cordilleras. En la figura 8 se observan las ondas planetarias en la atmósfera.

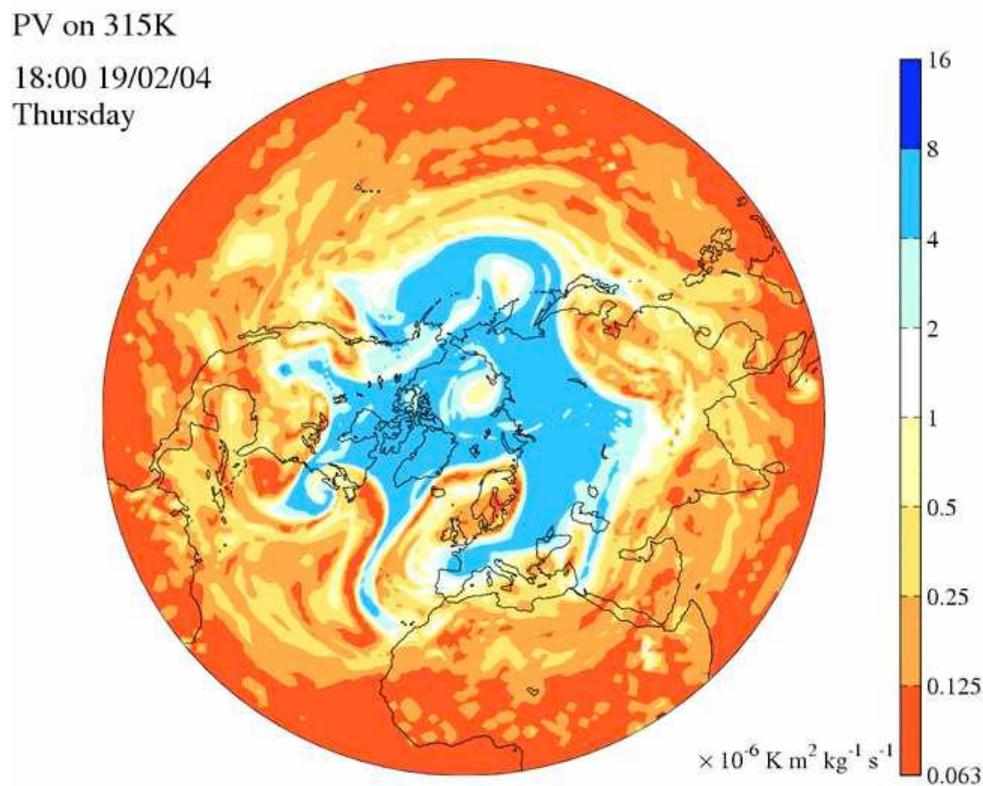


Fig. 8 Ejemplo de ondas de Rossby en la atmósfera. [5]

### 1.3.2 Ejemplos en el océano

El interés del estudio de estas ondas se reavivó cuando descubrieron que por medio de la altimetría por satélite permitía la observación de dichas ondas planetarias.

Existen observaciones en el océano de ondas de Rossby que alcanzan una longitud de onda de más de 200 km, detectadas a través de estudios de altimetría [6],

También se observaron dichas ondas por medio de observaciones de alta frecuencia con la utilización de un perfilador Doppler, con el cual se observaron ondas de Rossby con una longitud de onda de 100 km.

Se observó además que dichas ondas se propagan hacia el oeste a velocidades de 10cm/s o menos, lo cual requiere de meses a décadas en cruzar de una cuenca oceánica a otra [4].

La estructura espacial de las ondas de Rossby se puede observar a partir de los mapas globales en la figura 9.

La forma de dispersión característica de dichas ondas es debido a la variación latitudinal de la velocidad de fase de la onda.

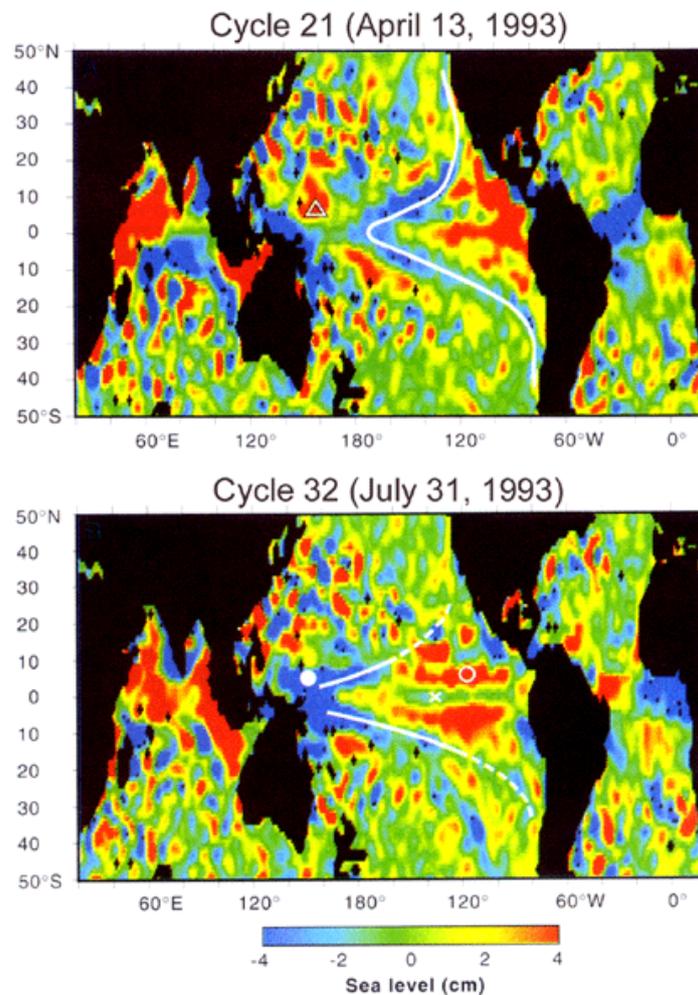


Fig. 9 Mapa global donde se muestra la distribución espacial de las ondas de Rossby. Datos filtrados de TOPEX/POSEIDON (1993).

### **1.3.3 Formación de eddies**

La formación de eddies suele ir asociada con los vórtices oceánicos creados por las ondas de Rossby, pero requieren una alta resolución para poder ser detectados.

Estos eddies son de vital importancia ya que juegan un papel crucial en el transporte de masa, calor, nutriente, clorofila y zooplancton.

Una tendencia destacada de los eddies, es que al igual que las ondas de Rossby, tienen una tendencia de propagación hacia el oeste.

Se ha podido observar, que en las zonas más ecuatoriales la velocidad de los eddies es mucho menor que la velocidad de propagación de las ondas de Rossby. [8] En otras zonas, la velocidad de los eddies es similar a la de las ondas de Rossby.

Las velocidades y direcciones de propagación observadas son consistentes con las observaciones realizadas y las teorías no lineales, las cuales predicen la propagación de los eddies hacia el oeste.

## CAPÍTULO 2: TRABAJO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describirá los experimentos realizados en el laboratorio y el material requerido. Estos experimentos consistirán en la generación de ondas de Rossby a pequeña escala en un medio con condiciones controladas y conocidas con el fin de caracterizar la longitud de onda de la onda, así como su velocidad de propagación y su proceso de formación.

### 2.1 MATERIAL Y MÉTODOS

#### 2.1.1 Dispositivo experimental.

Las pruebas se realizan en una tabla giratoria (Fig. 10) diseño del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). La plataforma giratoria es 0.46x 0.60 m y puede hacerse girar en un rango de velocidad de entre 1rpm (revoluciones por minuto) hasta 30 rpm.



Fig. 10 Dispositivo experimental. Tabla giratoria.

El impulso para el giro se consigue mediante una rueda de fricción en la parte posterior de la plataforma que es impulsada por un motor de velocidad variable, la cual se puede cambiar manualmente.

Consta además de un tacómetro (Fig. 11) que hace uso de la función de cadencia de un velocímetro y no necesita ser calibrado. La velocidad de rotación se lee en la esquina inferior del velocímetro. Esto está ligado a una serie de diez sensores de imán alineados en la parte inferior de la plataforma giratoria con los que se marca la velocidad de rotación en el tacómetro.



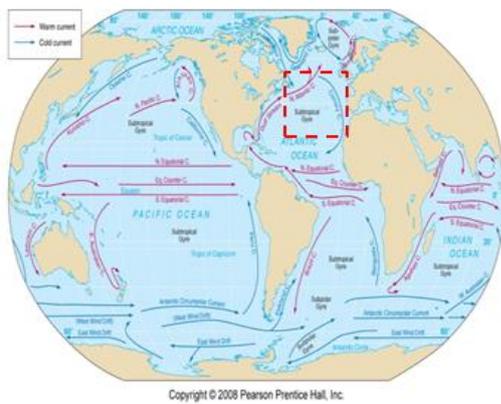
Fig. 11. Imagen del tacómetro instalado en la tabla giratoria.

Sobre la plataforma se coloca un tanque acrílico transparente de 0.40 x 0.40 m en el cual se introduce el agua.

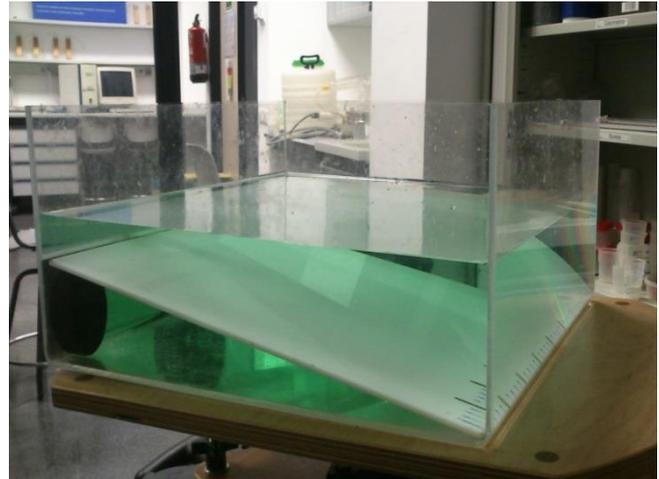
Como se ha explicado anteriormente, para la formación de ondas de Rossby es necesario que se cumplan una serie de características en el medio, entre ellas, que exista una determinada velocidad de rotación y una diferencia latitudinal.

Existen dos maneras de representar a pequeña escala dichos parámetros en función de la zona que se quiera estudiar. Todo depende de la colocación del punto de referencia.

Si se pretende estudiar una sección del océano con unos márgenes delimitados y una latitud concreta, se instalará una base acrílica plana blanca que haga la función de falso fondo y a la que se le dará cierta inclinación para simular las diferencias de latitud del planeta. La figura 12 a) muestra un ejemplo de una posible zona de estudio y la figura 12 b) muestra la simulación de esa sección a pequeña escala en nuestro laboratorio.



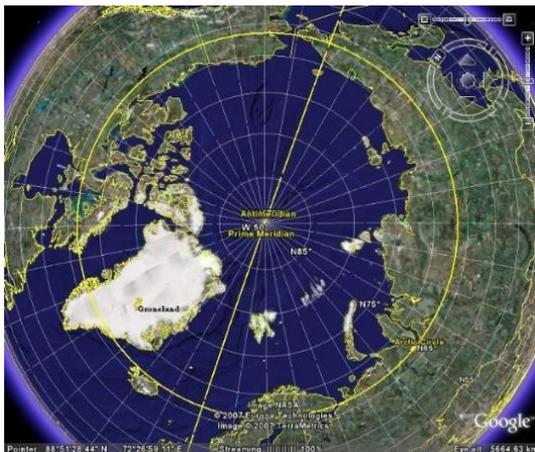
a)



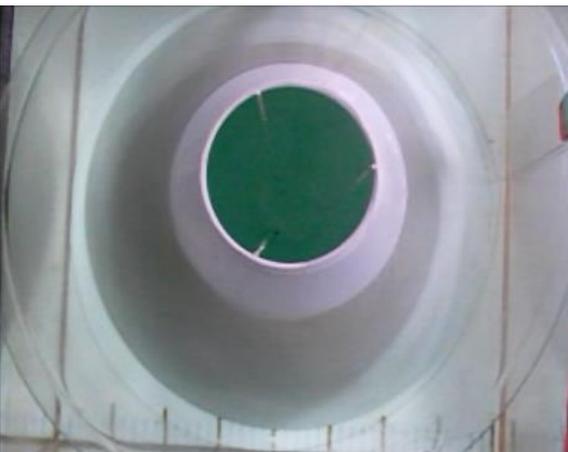
b)

Fig.12 a) Selección de zona de estudio, marcada con línea de puntos roja. B) Tanque de PVC con base acrílica plana blanca de falso fondo inclinado, donde se realizará la simulación del estudio.

Si se pretende estudiar las ondas a través de una corriente a altas latitudes, como la corriente circumpolar, se necesitará obtener una visión de la Tierra en la que el centro de observación sea el Polo Norte. En este caso se utilizará una base cónica en vez del plano inclinado, en la que el centro de la base coincidirá con el centro del Polo Norte, obteniendo la diferencia latitudinal y los efectos de esfericidad del planeta. En la figura 13 a) se muestra la zona de estudio y en la figura 13 b) la simulación de nuestro estudio para dicha zona.



a)



b)

Fig.13 a) Selección de la zona de estudio, zona entre las líneas amarillas (Fuente: Google Earth) b) . Tanque de PVC con cono donde se realizará el ensayo de laboratorio.

### **2.1.2 Mecanismo de generación**

Para poder observar la formación de las ondas de Rossby es necesario tener un contraste de color en el agua. Para ello se utilizarán cubos de hielo con colorante. Estos cubos proporcionaran el contraste de temperatura necesario, ya que se colocaran en la parte superior del tanque donde la pendiente es mayor, es decir en nuestro supuesto Polo Norte y en la parte este, ya que como hemos comentado con anterioridad las ondas se propagan de este a oeste.

El material necesario para formar estos hielos consiste en una cubitera y diferentes colorantes (Fig. 14). El tamaño del cubo es de aproximadamente 0,05 x 0,05 m. Se hicieron pruebas de colorantes para seleccionar el que mejor contraste diese, y se llegó la conclusión que el mejor colorante para observar el fenómeno es un colorante alimenticio de color rojo y verde. Además se utilizará permanganato potásico ( $KMnO_4$ ), sustancia química que proporciona un color morado y por su densidad suele tender a caer al fondo, lo cual facilita la observación de las ondas en el fondo del tanque.



Fig. 14 Imágenes de los colorantes alimenticios de color rojo y verde. Permanganato potásico y hielos teñidos.

### **2.1.3 Sistema de captura de imágenes y vídeo**

El agua, al caracterizarse por una superficie clara, transparente y de bajo contraste, es difícil fotografiar y filmar sin la ayuda de una iluminación adecuada, ya que la luz es reflejada por la superficie del agua.

Además, como el objetivo es capturar y filmar la formación de las ondas, es importante generar una iluminación que incida de tal manera que aumente el contraste y mejore y optimice su percepción.

Para ello se utilizan dos sistemas de captura de imagen y vídeo diferentes, una cámara de grabación de video de alta definición situada en la parte superior del tanque, fijada a una estructura metálica que facilitará su colocación centrada en dicho tanque y que recoja en la imagen la totalidad del dispositivo, que tomará imágenes y vídeos en planta, y una cámara fotográfica que permitirá obtener igualmente imágenes y vídeos en este caso del perfil transversal de las ondas y su distribución.

## **CAPÍTULO 3: RESULTADOS EXPERIMENTALES**

A lo largo de este capítulo se describen los trabajos llevados a cabo en el laboratorio y los resultados obtenidos a partir de ellos. Estos estudios consisten en la generación de ondas de Rossby a pequeña escala, en condiciones controladas y conocidas para poder observar su propagación, velocidad y longitud de onda y poder comparar y contrastar los resultados con los estudios teóricos.

### **3.1 EXPERIMENTO CON PLANO INCLINADO**

Utilizando el dispositivo experimental que hemos descrito en el capítulo anterior, se colocará en el tanque de la mesa giratoria el plano inclinado para realizar el estudio de una zona concreta del océano mediante la simulación a pequeña escala, en un ambiente controlado y conocido.

Las ondas de Rossby se generan gracias al movimiento de rotación de la Tierra y a la variabilidad de latitud. Además se ha podido observar a través de altimetrías y de imágenes a satélite que estas ondas tienen un desplazamiento de este a oeste.

Por tanto, en este trabajo se pretende demostrar dicha teoría generando ondas a pequeña escala. Para ello se proponen una serie de casos para comprobarlo.

El primer caso se plantea el experimento sin rotación y sin plano inclinado, es decir sin latitud. En el segundo caso se seguirá sin rotación pero esta vez se le añadirá el plano inclinado. En el tercero se realizará el experimento con una cierta velocidad de rotación y sin plano inclinado, y por el último, el cuarto caso se tendrá rotación y plano inclinado.

Teóricamente el cuarto caso sería el ideal para la formación de las ondas de Rossby.

Se detallará cada caso en particular en las siguientes secciones.

Se ha de tener en cuenta que los experimentos fueron realizados en el mes de agosto en el laboratorio sin aire acondicionado, lo cual supuso un problema ya que la duración del hielo fue mucho menor que los ensayos de prueba realizado en julio con aire acondicionado.

**Caso 1:  $\Omega = 0$  y  $\beta = 0$**

En este caso la velocidad de rotación de la tabla es nula y no hay plano inclinado, es decir, que  $\Omega = 0$  y  $\beta = 0$ . La altura del agua en el tanque es de 8 cm.

A continuación se presentan una serie de imágenes que muestran el transcurso del tiempo. El tiempo viene marcado por la duración del cubo de hielo (Fig. 15). El cubo de hielo es introducido en la zona derecha del tanque, lo que correspondería con la zona este del planeta.

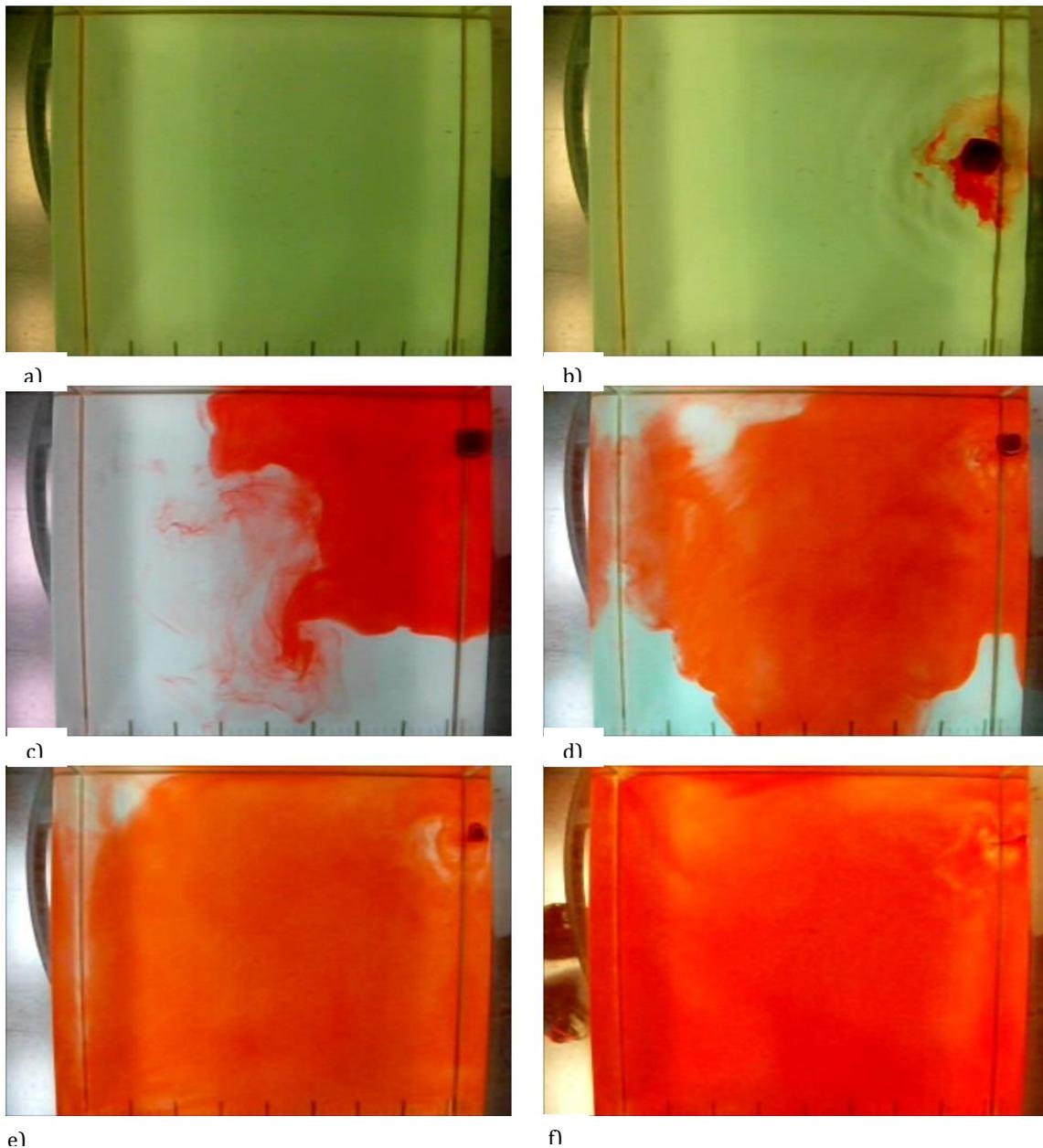


Fig. 15 A) Se muestra la situación del caso. Plano sin inclinación y sin velocidad. B) Captura del momento inicial minuto 00:00. C) Captura minuto 01:00. D) Captura minuto 02:00. E) Captura minuto 03:00. F) Captura minuto 04:00.

Se observa como en el proceso el hielo no tiene ningún desplazamiento y se obtiene una difusión isotrópica del colorante, sin observar corrientes ni ondas. El cubo de hielo a penas sufre desplazamiento.

**Caso 2:  $\Omega = 0$  y  $\beta \neq 0$**

En el caso número 2, las condiciones del experimento son velocidad  $\Omega = 0$  y  $\beta = 15^\circ$ . Por lo tanto ya estamos ante un caso de plano inclinado. La altura del agua en el tanque en este caso es de 8 cm.

Al igual que en el caso 1 se realiza una grabación de video y se obtienen las siguiente serie de imagines en función del transcurso del tiempo (Fig. 16).

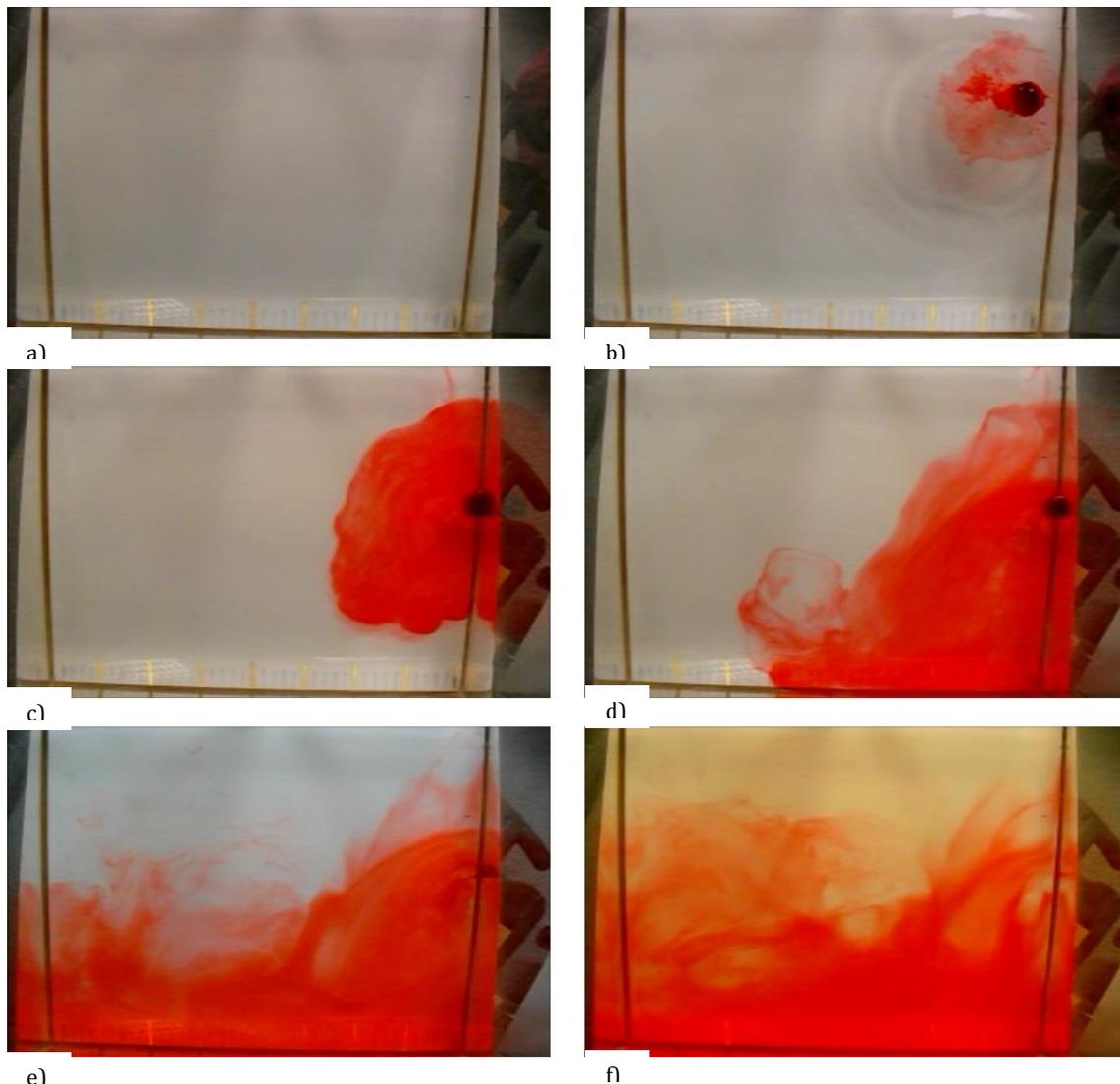


Fig.16 A) Se muestra la situación del caso. Plano con inclinación ( $\beta = 15^\circ$ ) y sin velocidad. B) Captura del momento inicial minuto 00:00. C) Captura minuto 02:00. D) Captura minuto 04:00. E) Captura minuto 06:00. F) Captura minuto 08:00

La altura del agua en la parte más inclinada es de 8 cm y el ángulo que forma el plano  $\beta$  es de  $15^\circ$ .

En este caso se observa que la dispersión de la masa de agua del hielo se realiza hacia la parte más ecuatorial, pero no se forma ningún tipo de onda, ya que ocurre como en el caso anterior, en el que no existe ninguna velocidad de rotación.

### **Caso 3: $\Omega = 15\text{rpm}$ y $\beta = 0$**

En el experimento número 3 (caso 3), se tiene una altura de agua del tanque de 8 cm, la superficie será plana, es decir,  $\beta = 0$ , pero en este caso se introducirá una velocidad de rotación al tanque, que será de 15 rpm. Se han de esperar de unos 15 a 20 minutos para que el sistema entre en equilibrio antes de introducir el hielo.

Una vez pasado el tiempo estimado, se introduce el hielo al igual que en los casos anteriores y se toma el video en el transcurso de tiempo que el hielo tarda en derretirse. A través del video se capturan una serie de secuencias en imágenes de la trayectoria del fluido (Fig. 17).

Se puede observar en la figura 17, que con estas características del medio se generan columnas de Taylor. Esto es debido a que ante un fluido homogéneo en presencia de rotación y para el cual los efectos no lineales son despreciables a los efectos de rotación se verifica la ecuación 1 (ver ec. 1) en el apartado 1.3 mecanismo físico. Por tanto el flujo no puede tener gradientes en dirección paralela al eje de rotación, y al tener la condición de fondo plano la velocidad vertical es nula en el fondo y por tanto en toda la columna del fluido. En estas condiciones el fluido no puede estrecharse ni contraerse, se comporta como si fuera rígido. En la Fig. 16 d) se puede observar como empiezan a generarse las columnas de Taylor.

### **Caso 4: $\Omega = 15\text{rpm}$ y $\beta \neq 0$**

Tenemos que la velocidad de rotación es de 15 rpm, una altura de agua máxima de 13 cm y un plano inclinado con  $\beta = 15^\circ$ . Al igual que en el caso anterior, se ha de esperar un tiempo estimado de entre 15 y 20 minutos para que el sistema entre en equilibrio.

La secuencia obtenida de la grabación es la siguiente (Fig.18).

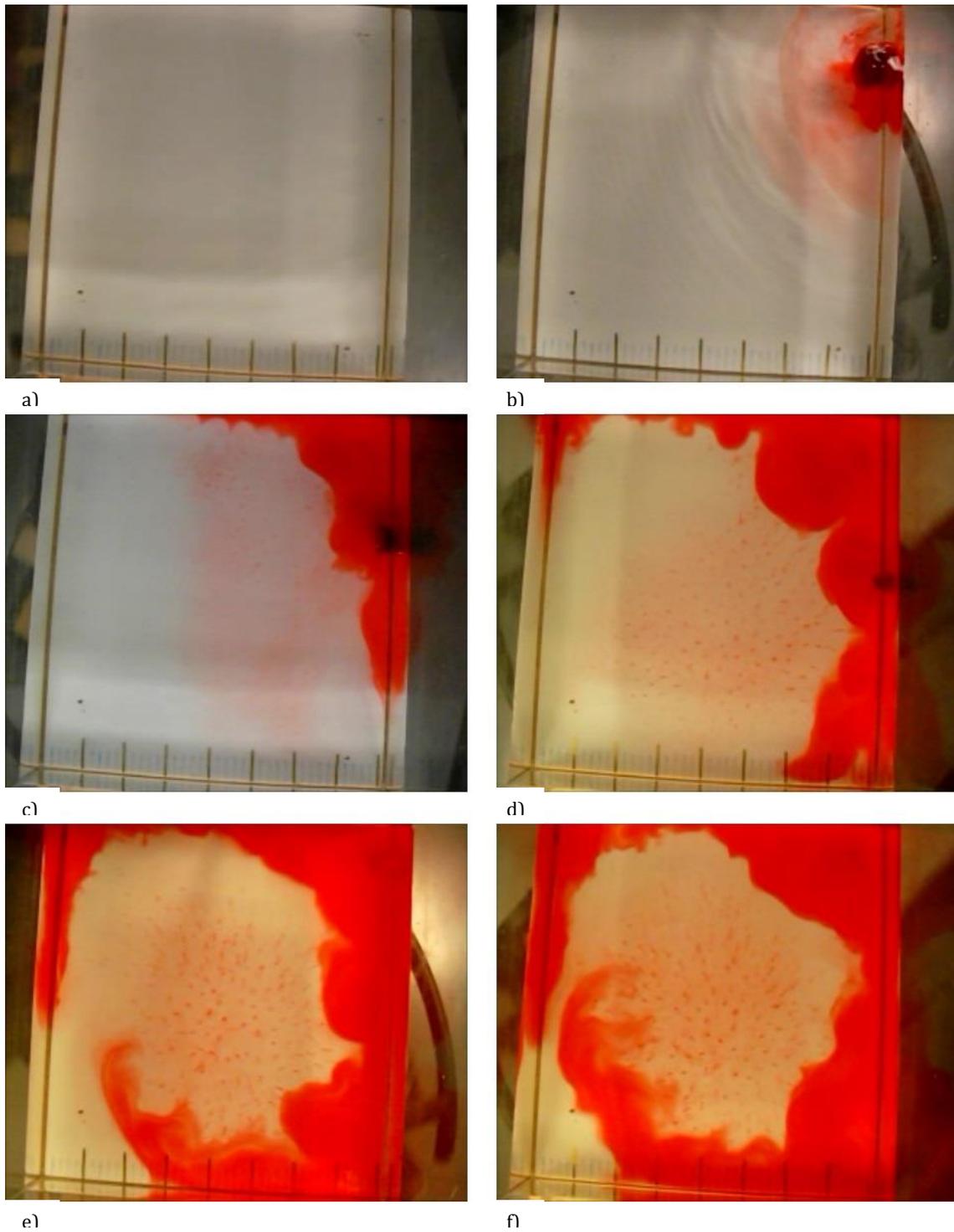


Fig.17. A) Se muestra la situación del caso. Plano sin inclinación ( $\beta = 0^\circ$ ) y con velocidad ( $\Omega = 15$  rpm). B) Captura del momento inicial minuto 00:00. C) Captura minuto 02:00. D) Captura minuto 04:00. E) Captura minuto 06:00. F) Captura minuto 08:00

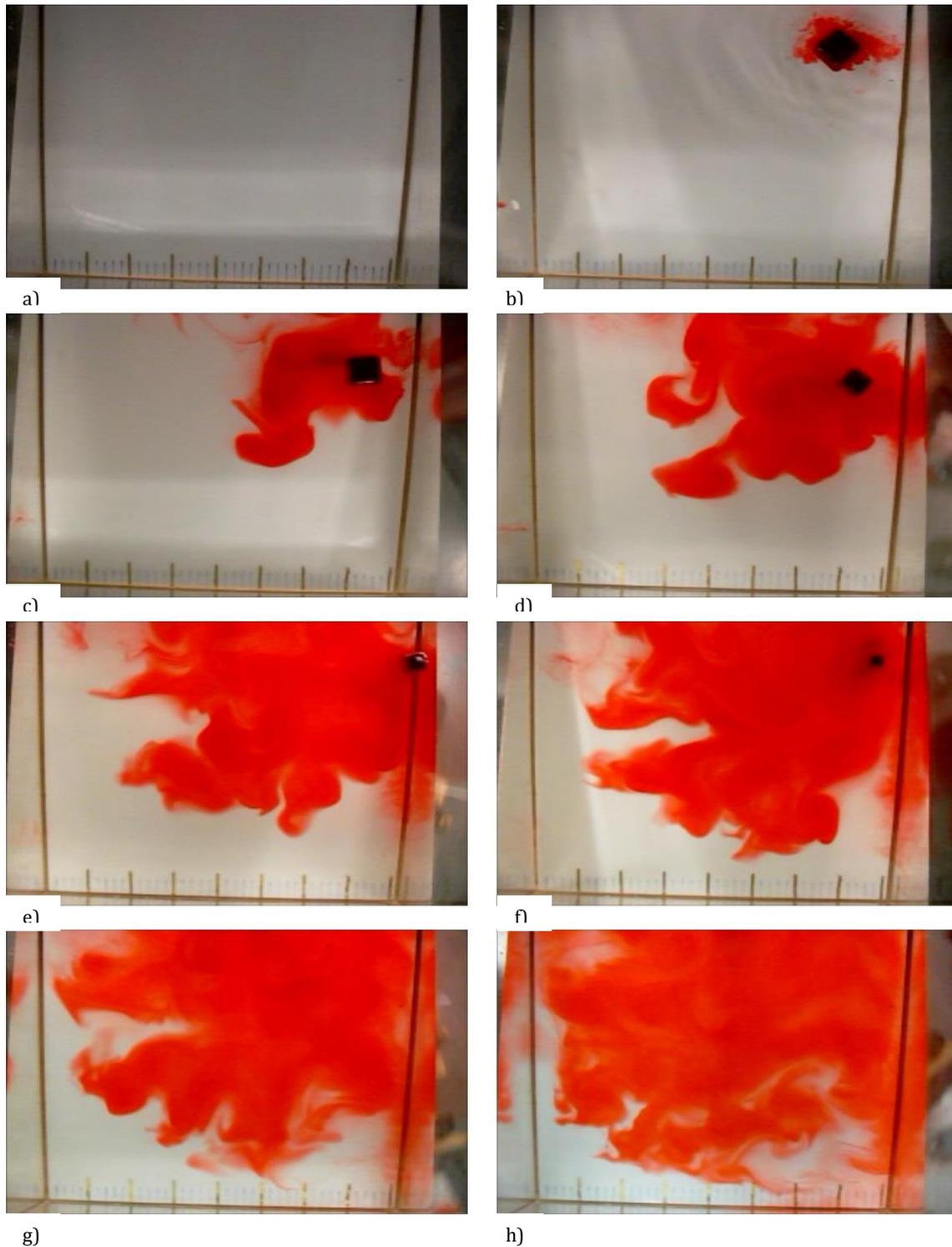


Fig.18 A) Se muestra la situación del caso. Plano con inclinación ( $\beta = 15^\circ$ ) y con velocidad ( $\Omega = 15$  rpm). B) Captura del momento inicial minuto 00:00. C) Captura minuto 01:00. D) Captura minuto 02:00. E) Captura minuto 03:00. F) Captura minuto 04:00 G) Captura minuto 05:00 H) captura minuto 06:00.

En estas condiciones de experimento ya se puede observar la formación de ondas, a partir del minuto 3 (Fig.18 d)).

La trayectoria del desplazamiento de las ondas es de este a oeste como se presentó en la teoría inicial, y por otro lado, una trayectoria vertical de norte a sur, es decir desde los polos hacia el ecuador.

Si nos fijamos detalladamente en la Fig. 17 f), correspondiente a la captura del minuto 4 de grabación, se puede ver como ya existe un patrón de ondas con una longitud de onda  $\lambda$  determinada. Extrayendo dicho fotograma (Fig. 18) podemos obtener la medida de la longitud de onda.

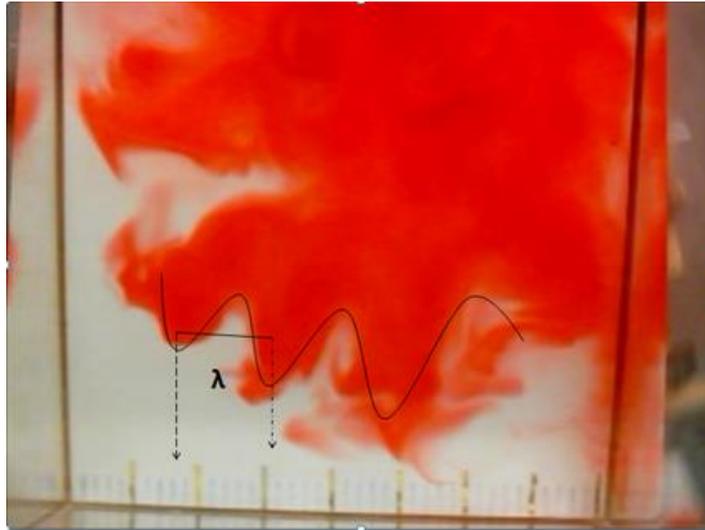


Fig. 19 Captura minuto 4 de grabación. Se observa las ondas de Rossby y el tamaño de su longitud de onda  $\lambda$ .

Podemos ver en la Fig. 19, que el tamaño de la longitud de onda de las ondas generadas en el experimento es de aproximadamente 6 cm a una altura de fluido  $H$  de 7 cm. Observando el video (ver anexo 1 en el CD) obtenemos que la velocidad de propagación de la onda es de 0,08cm/s, aproximadamente, se obtiene midiendo el espacio desplazado por la onda y el tiempo que tarda en desplazarse dicho espacio.

Teóricamente, sabiendo que el gradiente de profundidad del tanque es de 0,5,  $\lambda = 6,6\text{cm}$ ,  $H = 7\text{cm}$  y la velocidad de rotación pasada a radianes por segundo  $\Omega = 0,5\pi$ , sustituimos en la ecuación 8 (ver eq. 8), obtenemos que la velocidad de propagación es de 0,12cm/s.

Por tanto, comparando los resultados teóricos con los observados tenemos que las velocidades son prácticamente iguales.

### 3.2 EXPERIMENTO CON CONO

Esta parte del estudio se realiza en la misma tabla giratoria que en la parte del experimento del plano inclinado, pero en esta ocasión se introduce en el tanque un cono con un ángulo de inclinación de  $60^\circ$  aproximadamente, que como ya hemos comentado anteriormente, nos dará otra perspectiva del estudio.

En estos ensayos no se han obtenido resultados numéricos ya que no se han desarrollado las fórmulas, pero sí que se ha llegado a generar ondas de Rossby.

Se estudian dos casos diferentes, uno sin velocidad de rotación en el sistema, y otro con velocidad de rotación.

#### **Caso 1: $\Omega = 0$**

En este caso la velocidad de rotación del tanque es nula, por tanto solo se tiene en cuenta la inclinación del cono que es de aproximadamente  $60^\circ$ .

Se introduce el hielo en el sistema y se realiza la grabación del periodo de tiempo que el hielo tarda en deshacerse.

Se obtiene de la grabación la siguiente secuencia de imágenes (Fig.19).

En este caso se observa como el hielo sufre un desplazamiento alrededor del cono, no se observa la formación de ninguna onda, ya que no existen corrientes en el fluido. Se habría de investigar en líneas futuras por qué el hielo sufre un desplazamiento alrededor del cono, ya que no existe ninguna aceleración que le impulse a iniciar el movimiento.

El hielo se va deshaciendo y se puede ver como simplemente se difunde isotrópicamente hacia el fondo.

#### **Caso 2: $\Omega = 15\text{rpm}$**

En este caso, igual que en el anterior, disponemos del sistema con cono pero esta vez sí que tiene velocidad de rotación.

Una vez se tiene el tanque en rotación con una velocidad de 15 rpm, se ha de esperar de 15 a 20 minutos a que el sistema entre en equilibrio. Una vez en equilibrio, se introduce el hielo y se realiza la grabación, de la cual al igual que en

casos anteriores se extraen los fotogramas para poder observar su desplazamiento y la formación de las ondas.

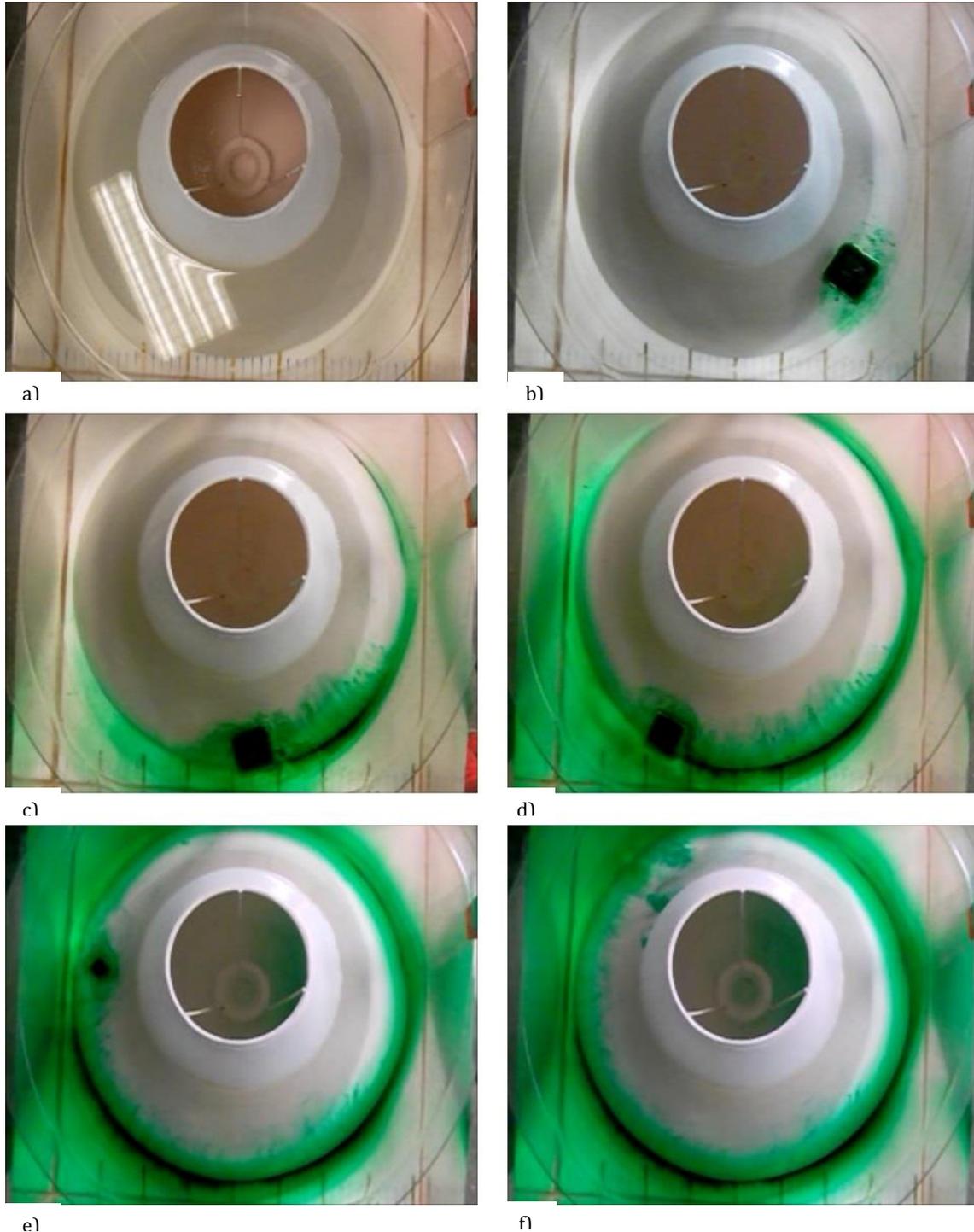
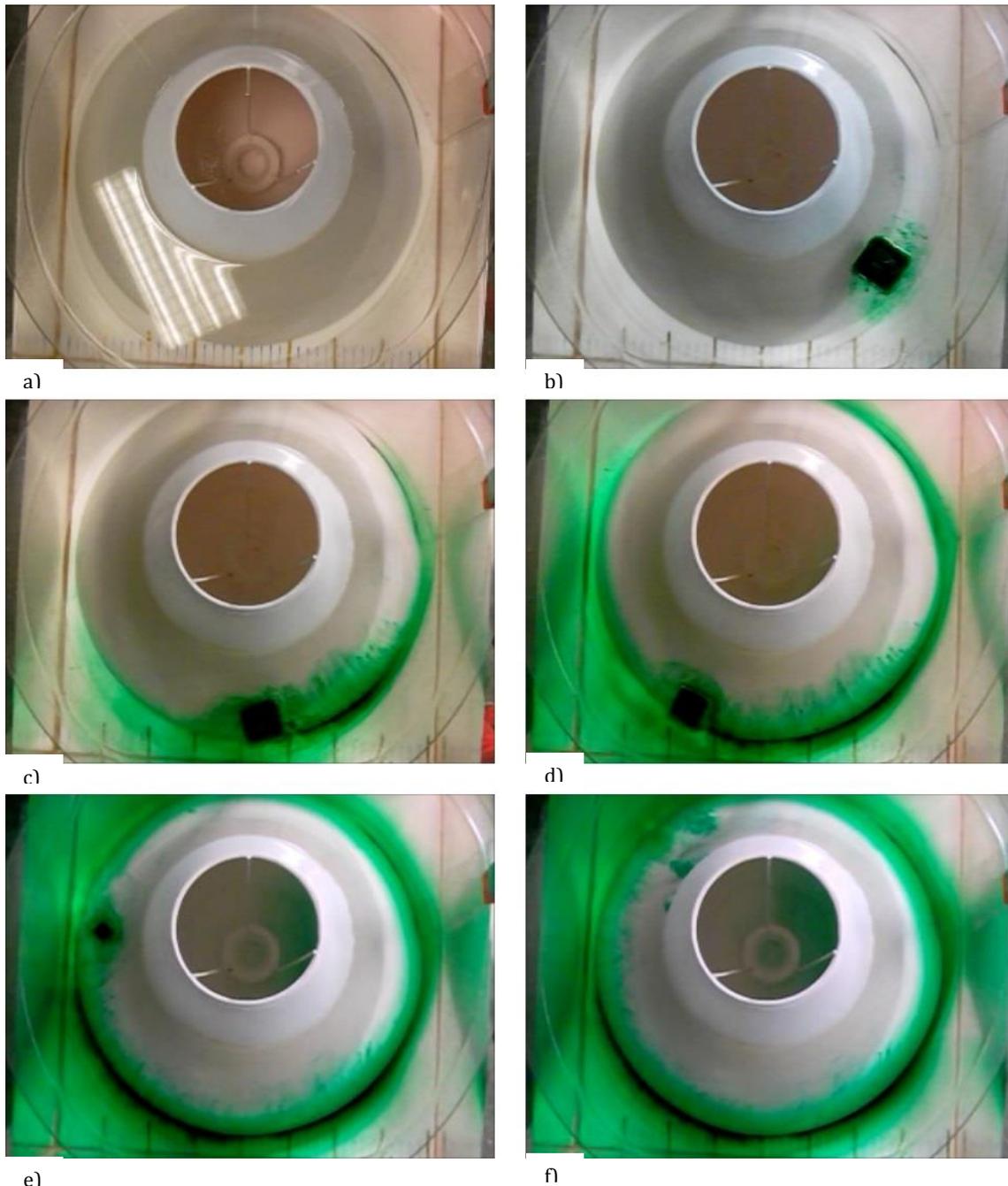


Fig.19 A) Se muestra la situación del caso. Tanque con cono inclinación  $60^\circ$  y sin velocidad. B) Captura del momento inicial minuto 00:00. C) Captura minuto 01:00. D) Captura minuto 02:00. E) Captura minuto 03:00. F) Captura minuto 04:00.

En la Fig.20 se muestra la secuencia de fotogramas de la grabación realizada.



e) Fig. 20. A) Se muestra la situación del caso. Tanque con cono inclinación  $60^\circ$  y con velocidad 15 rpm. B) Captura del momento inicial minuto 00:00. C) Captura minuto 01:00. D) Captura minuto 02:00. E) Captura minuto 03:00. F) Captura minuto 04:00.

En este caso se puede observar como el fluido de color verde no se difunde uniformemente, si no que empieza a formar una serie de ondas alrededor del cono, estas ondas son las ondas de Rossby.

Se selecciona la imagen D) de la Fig. 20 y se observa detalladamente la onda y su longitud de onda  $\lambda$  (Fig. 21).

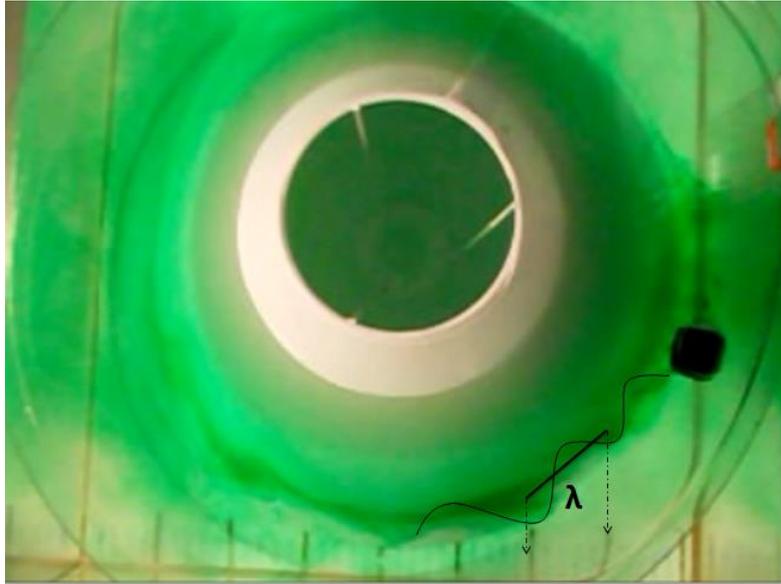


Fig.20. Captura del minuto 2 de grabación. Se observan las ondas de Rossby y el tamaño de la longitud de onda.  $\lambda = 6$  cm.

Obtenemos una longitud de onda de 6 cm y tenemos una velocidad de 15 rpm,  $\Omega = 0,5\pi$  rad/s,  $H = 13$ cm y  $r = 8$ cm. No se han obtenido datos numéricos ya que no se han desarrollado las fórmulas del caso.

Para poder observar con mayor detalle la onda, lo ideal del ensayo sería poder perturbar el sistema añadiendo un obstáculo al cono, y modificando la velocidad de rotación en un instante, lo cual generaría una inestabilidad mayor que provocaría la formación de las ondas para estabilizar el sistema.

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

En este trabajo se pretendía estudiar la generación y propagación de ondas de Rossby a pequeña escala, ya que son de vital importancia porque son las ondas que se encargan de la distribución del calor entre distintas latitudes, y en general del clima del planeta, y no se han realizado hasta la actualidad ningún estudio en profundidad, ya que son muy difícil de observar en la naturaleza por sus características.

Se ha logrado muchos de los objetivos principales marcados al inicio del proyecto. Se ha conseguido en primer lugar crear un dispositivo experimental capaz de reproducir las condiciones del medio marino a pequeña escala, gracias al sistema de rotación instalado en dicho dispositivo, el cual, simula la rotación de la Tierra. Además, se ha logrado simular las diferencias latitudinales del planeta, lo que permite observar diferentes fenómenos que ocurren debido a ese cambio de latitud.

Con todo ello, hemos llegado a generar ondas de Rossby a pequeña escala en el laboratorio y ser capaces de observar y estudiar su propagación. Se han estudiado varios casos con condiciones del medio diferentes para poder afirmar las condiciones idóneas para la generación de estas ondas.

En los resultados del experimento con el plano inclinado, se consiguió uno de los objetivos principales marcados, la generación de ondas de Rossby. Además de ello, una de las conclusiones más importantes que hemos obtenido es que los resultados numéricos de propagación en el experimento se aproximan a los resultados obtenidos sobre la parte teórica. Lo que confirma que, las ondas de Rossby se generan por una perturbación en el medio, que ha de existir una diferencia latitudinal y una velocidad de rotación del sistema, es decir, la rotación de la Tierra y que las ondas se propagan de este a oeste.

No se ha podido realizar un estudio numérico de los resultados obtenidos en el caso del cono, ya que no se ha llegado a desarrollar las fórmulas correspondientes, y para que fuese más preciso habría que instalar un obstáculo en la base del cono y provocar un cambio de velocidades en el sistema para poder generar una mayor perturbación. Esta situación podrá ser investigada en posteriores estudios.

Paralelamente al estudio, se han observado otros fenómenos que se dan con unas determinadas condiciones, como en el caso 3 de nuestro proyecto, en el que se ha logrado generar columnas de Taylor. Como línea de investigación futura, se pretende realizar un estudio más exhaustivo de este fenómeno.

## **AGRADECIMIENTOS**

Ante todo dar las gracias a mi director y tutor, Víctor Sánchez Morcillo, por la dedicación y ayuda que me ha brindado, por la confiada depositada en mí, y sobre todo, por contagiarme de su entusiasmo y ganas de trabajar e investigar.

También dar las gracias a todo el equipo del laboratorio de física de la EPSG por su ayuda y asesoramiento, y en especial a Sabela, compañera del máster, con la que he compartido horas de estudio e investigación.

Finalmente dar las gracias a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de este trabajo, y a mi familia, que aun estando lejos puedo contar con todo su apoyo y confianza.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Alan P. Trujillo Harold V Thurman Upper Saddle River: "Essentials of oceanography". Pearson Prentice Hall. Comp 2008 9<sup>th</sup> ed.

[2] Marshall J. y R. A. Plumb, "Atmosphere, ocean and climate dynamics", Ed. Academic Press Inc. (2007).

[3] Wikipedia. (2013, Mar.) Carl-Gustaf Rossby. [Online].

[http://es.wikipedia.org/wiki/Carl-Gustaf\\_Rossby](http://es.wikipedia.org/wiki/Carl-Gustaf_Rossby)

[4] Chelton, D. B., and Schlax, M. G. "Global observations of oceanic Rossby waves". Science, vol. 272, pp. 234-238.(1996)

[5] [http://www.atm.ox.ac.uk/user/read/downloads/Marshall\\_fgfd/lecture3.pdf](http://www.atm.ox.ac.uk/user/read/downloads/Marshall_fgfd/lecture3.pdf)

[6] Chavanne et Al., "Observations of Vortex Rossby Waves Associated with a Mesoscale Cyclone", University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii. (2010).

[7] Chelton, D.B.,\_Schlax,M. G., "Global obserbation of large oceanic eddies". Geophysical Research Letters, vol. 34. (2007).

[8] Rossby theory : Theory. Weather in a Tank. Massachussets Institute of Technology. (MIT)

[http://paoc.mit.edu/labguide/rossby\\_theory.html](http://paoc.mit.edu/labguide/rossby_theory.html)

[9] Taylor columns: theory. Weather in a Tank. Massachussets Institute of Technology. (MIT)

<http://paoc.mit.edu/labguide/taylor.html>