



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Estudio experimental de la circulación abisal a escala de
laboratorio

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Evaluación y Seguimiento Ambiental de
Ecosistemas Marinos y Costeros

AUTOR/A: Gómez González, Covadonga

Tutor/a: Sánchez Morcillo, Víctor José

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

RESUMEN:

La circulación termohalina describe el movimiento global de las masas de agua a lo largo de todo el planeta, jugando un papel determinante en el clima. Además del sistema de corrientes superficiales, bien conocido, la circulación termohalina se completa con la circulación abisal o profunda, de la que tenemos mucha menos información a pesar de representar el 80% de la masa de agua total. El modelo de Stommel-Arons considera que la circulación abisal se inicia con el hundimiento de aguas frías superficiales en zonas localizadas del planeta, y esta fluye por el fondo siguiendo un recorrido hacia el hemisferio contrario, con un patrón particular determinado por la rotación de la tierra. Dada la poca información disponible para contrastar la validez de estos modelos, los experimentos a escala de laboratorio son clave para visualizar y comprender las características de esta parte tan importante de la circulación.

En este trabajo se pretende diseñar un sistema experimental, y acompañarlo del marco teórico correspondiente, que permita reproducir las características fundamentales de la circulación abisal, predicha por el modelo de Stommel-Arons, y hacer un análisis sistemático del comportamiento de estas corrientes frente a la modificación de algunos parámetros físicos como el flujo de agua entrante, o velocidad de rotación del sistema.

Palabras clave: circulación termohalina; modelo experimental a escala

ABSTRACT:

Thermohaline circulation describes the global movement of water masses through the planet, playing a determining role in climate. In addition to the well-known system of surface currents, the thermohaline circulation is completed by the abyssal or deep circulation, about which we have much less information despite representing 80% of the total water mass. The Stommel-Arons model considers abyssal circulation starts with the sinking of cold waters in localized areas of the planet, and it flows through the bottom following a route towards the opposite hemisphere, with a particular pattern determined by the rotation of the earth. Giving the little information available to test the validity of these models, laboratory-scale experiments are key to visualizing and understanding the characteristics of this important part of the circulation.

In this work we intend to design an experimental system, and accompany it with the corresponding theoretical framework, which allows reproducing the fundamental characteristics of the abyssal circulation, predicted by Stommel-Arons, and make a systematic analysis of the behavior of these currents against the modification of some physical parameters such as the incoming water flow, or the system rotational speed.

Key words: thermohaline circulation; experimental scale model

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS DE LA CIRCULACIÓN

TERMOHALINA	1
1.1. INTRODUCCIÓN:	1
1.2. CIRCULACIÓN TERMOHALINA	3
1.2.1. Corriente Circumpolar Antártica.....	4
1.3. IMPORTANCIA DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA	5
1.3.1. Transporte de calor e influencia en el clima.....	6
1.3.2. Reservorio de CO ₂	8

CAPÍTULO 2: MODELOS TEÓRICOS

2.1. RESPUESTA DEL INTERIOR OCEÁNICO A LOS MOVIMIENTOS VERTICALES	9
2.2. INTERPRETACIÓN EN TÉRMINOS DE CONSERVACIÓN DE LA VORTICIDAD POTENCIAL.....	11
2.3. MODELO DE STOMMEL ARONS E INTENSIFICACIÓN DEL OESTE DE LA CORRIENTE PROFUNDA.....	13

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA A ESCALA DE LABORATORIO

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL DE SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA	16
3.1.1. Introducción al protocolo experimental de simulación	16
3.1.2. Material	19
3.2. FORMULACIÓN TEÓRICA PARA EL MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO:	20

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES.....

4.1. TANQUE CUADRADO.....	22
4.1.1. Experimento de la circulación profunda en un tanque cuadrado con un ángulo de inclinación pequeño.....	22
a) Metodología	22
b) Conclusiones experimentales.....	23

4.1.2. Experimento de la circulación profunda en un tanque cuadrado con un ángulo de inclinación mayor	25
a) Metodología	25
b) Conclusiones experimentales.....	25
4.1.3. Formulación del modelo experimental a escala de laboratorio:	26
4.2. TANQUE CIRCULAR	28
4.2.1. Experimento de la circulación profunda en un tanque cilíndrico.....	28
a) Metodología	28
b) Conclusiones experimentales.....	29
4.2.2. Experimento de la circulación profunda en un tanque cilíndrico con una barrera	31
a) Metodología	31
b) Conclusiones experimentales.....	31
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN.....	33
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	35
BIBLIOGRAFÍA.....	37

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTOS DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA

En primer lugar, se procederá a la descripción y explicación del esquema de la circulación profunda oceánica, también denominada circulación termohalina, para poder determinar las variables que influyen en su proceso y poder hacer una aproximación posterior en el laboratorio.

1.1. INTRODUCCIÓN:

En el océano se pueden distinguir distintas masas de agua dispuestas en capas a lo largo de la columna de agua, desde la superficie hasta el fondo. La capa que se encuentra en la superficie está afectada por procesos atmosféricos, su profundidad se encuentra entre 100-150 metros, es la denominada capa de Ekman. Debajo de ella se encuentra la termoclina estacional, cuya estratificación vertical de sus aguas depende de la época del año por la influencia de las temperaturas y mezcla de vientos. Debajo se encuentra la termoclina permanente, siempre se encuentra estratificada. Por último, el resto de la columna de agua hasta el fondo es lo que se denomina océano profundo, esta parte del océano es alimentado por convección profunda en zonas polares. [1]

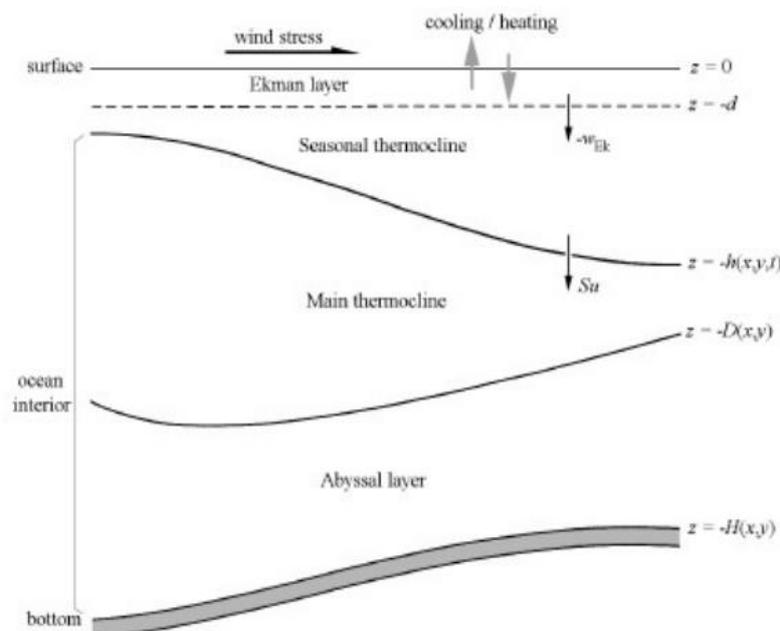


Figura 01. Capas verticales de la columna de agua. [1]

La circulación termohalina es aquella, dentro de todas las corrientes oceánicas, inducida por la pérdida de flotabilidad y hundimiento de las aguas superficiales en latitudes polares. Este proceso se produce en dos localizaciones concretas, en el Atlántico Norte se produce la zona del Mar del Labrador y el mar de Groenlandia; y en el Hemisferio Sur en el Mar de Weddell. El resultado de estos procesos de convección resulta en unos patrones de circulación a nivel global, llegando a pasar el ecuador y comunicando ambos hemisferios, denominándose también Corriente de Retorno Meridional (MOC). [2]

El proceso se inicia con el hundimiento de aguas superficiales hasta las denominadas aguas de fondo o aguas profundas, en función del lugar de convección. Gran parte de la circulación termohalina a nivel global tiene lugar en zonas profundas del océano, donde las velocidades de corrientes son muy lentas y las escalas temporales muy amplias, dificultando con ello la observación y entendimiento de su proceso. [2]

Debido a estas dificultades, la comprensión de los mecanismos y patrones de circulación profunda están basados en gran medida en estudios teóricos. En concreto, es importante mencionar la aportación de Henry Stommel con su esquema de la circulación de la corriente termohalina, este servirá de guía para la comprensión de la corriente a lo largo de este trabajo. [2]

El transporte de calor asociado a esta corriente hace que juegue un papel muy importante en el clima, Se ha utilizado su respuesta no lineal y potencialmente abrupta al forzamiento para explicar los cambios climáticos glaciares. Su estudio es importante por los efectos que podría tener el cambio climático en un futuro. [3]

Este trabajo pretende aplicar las ideas teóricas de Stommel sobre la circulación profunda a un marco práctico dentro del laboratorio, con ello se quiere observar y comprender las predicciones teóricas hechas por Stommel sobre el esquema de circulación de la corriente profunda oceánica. Se han hecho trabajos similares con el mismo objetivo, este trabajo también aspira a ser una mejora y ampliación de estos, tanto en el marco teórico como práctico.

1.2. CIRCULACIÓN TERMOHALINA:

Para comprender la circulación termohalina primero se discutirá el mecanismo que la impulsa. El océano se encuentra estratificado en diferentes capas de masas de agua diferenciadas por su densidad, siendo las más densas las más profundas, es por ello que el hundimiento de aguas superficiales, provocado por una pérdida de flotabilidad debido al aumento de densidad con respecto a las capas inferiores, se produce en zonas polares, aquellas característicamente más frías y donde la estratificación de la columna de agua es pequeña. [2]

En estas zonas el aumento de la densidad de la capa superficial de agua se produce por dos motivos, la disminución de su temperatura debido al frío atmosférico que aumenta su densidad; y por un aumento en su salinidad, debido al proceso de formación de hielo oceánico en el que se prescinde de la salmuera del agua para la formación, aumentando con ello su concentración en el agua. [2]

La combinación de estas causas es necesaria para el hundimiento de las aguas profundas, por ejemplo, en el Pacífico Norte no se produce este proceso de convección a pesar del enfriamiento de las aguas superficiales, ya que son aguas con menor salinidad, y, por tanto, no adquieren la densidad suficiente. [2]

El hecho de que estas zonas estén caracterizadas por poseer una columna de agua poco estratificada también juega un papel importante en el proceso de convección. En latitudes de zonas subtropicales también se puede observar una disminución de la densidad de las aguas superficiales, pero esta pérdida de flotabilidad no llega a ser suficiente como para superar la densidad de capas inferiores y poder producirse un proceso de convección al tener una estratificación más marcada. [2]

Esta débil estratificación de las capas inferiores permite que las masas de agua de estas capas profundas salgan a la superficie después de estos procesos de convección, donde se repetirá el proceso de pérdida de flotabilidad. Esta última condición está favorecida por la circulación ciclónica asociada a la densidad de superficie, que sube a la superficie, atraída por la succión de Ekman sobre los giros subpolares. Estas zonas donde ocurren los procesos de convección se observa unos gradientes verticales de flotabilidad débiles y las isopícnas ascienden a la superficie. [2]

No se puede realizar una confirmación de la existencia de estos procesos de convección por la mera observación directa, pero se han podido realizar ciertas observaciones indirectas de los mismos. Por ejemplo, el uso del oxígeno disuelto constituye un buen trazador de masas de agua, al encontrarse las masas superficiales en un estado de saturación de este compuesto. [2]

Al producirse la convección de estas aguas superficiales ya no se encuentran en contacto con el oxígeno atmosférico, por lo que la concentración del mismo disminuirá progresivamente a medida que el agua se hunda, disminuyendo también por su necesidad en procesos biológicos que se producen en el agua. Se ha podido observar como las aguas profundas en el Atlántico disminuyen su concentración de oxígeno a medida que se acercan al Ecuador y se alejan de zonas polares, es decir, el agua profunda viaja hacia latitudes al sur desde su zona de origen. [2]

La dificultad para hacer estudios de la circulación abisal basados en la observación directa hace que su comprensión se base principalmente en la deducción teórica. [2]

1.2.1. Corriente Circumpolar Antártica

Dentro de la circulación profunda, la Corriente Circumpolar Antártica (ACC) juega un papel importante al transportar masas de agua profundas e intermedias entre los océanos Atlántico, Índico y Pacífico; y porque el bombeo de Ekman impulsado por el viento del oeste en esta corriente es un importante impulsor de la circulación profunda. [4]

Esta corriente está caracterizada por tres frentes, el Frente Subantártico, el Frente Polar y el Frente Sur del ACC. Esta corriente transporta una mayor masa de agua que las corrientes intensas del oeste por abarcar mayores dimensiones ya que sus corrientes llegan hasta el fondo marino. [4]

El centro de la corriente está compuesto por Agua Profunda Circumpolar, que consiste en una mezcla de agua profunda de los océanos. La masa superior a esta contiene agua pobre en oxígeno procedente de todos los océanos; y la inferior y más profunda contiene agua de gran salinidad procedente del Atlántico, incluyendo contribuciones de aguas profundas del Atlántico con aguas saladas del Mar Mediterráneo. [4]

A medida que las diferentes masas de agua circulan alrededor de la Antártida estas se mezclan con otras masas de agua de densidad similar. Esta corriente consiste, en cierto

sentido, en una gran mezcla que coge aguas profundas de cada océano y las mezcla entre ellas, para después redistribuirlas de vuelta al océano. [4]

El agua más fría y salada del océano se produce en la plataforma continental alrededor de la Antártida en invierno, principalmente de los mares poco profundos de Weddell y Ross. Esta agua salada fría se drena de las plataformas, arrastrando consigo un poco de agua profunda y se esparce por el fondo marino. Esta agua de alta densidad se filtra en todos los fondos oceánicos. [4]

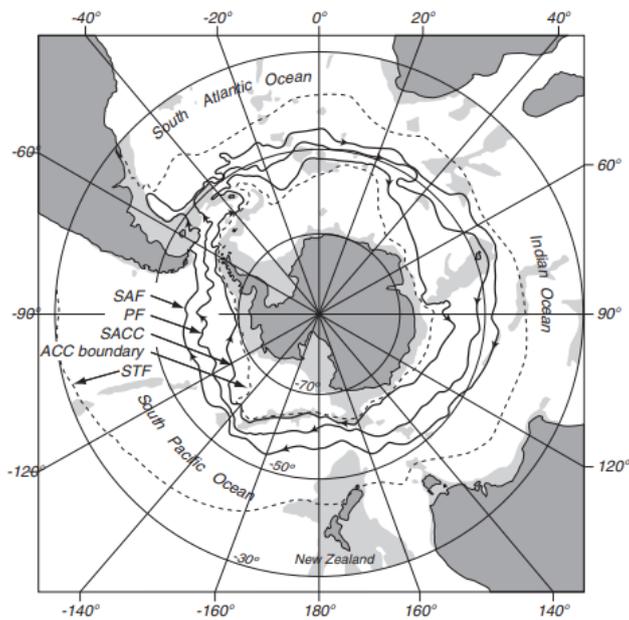


Figura 02. Mapa de la Corriente Circumpolar Antártica y sus frentes [4]

1.3. IMPORTANCIA DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA

La circulación profunda lleva calor, salinidad, oxígeno, CO₂ y otras propiedades desde altas latitudes en invierno hacia latitudes menores a lo largo de todo el planeta, con consecuencias muy importantes. El contraste entre las aguas profundas frías y las aguas superficiales calientes determina la estratificación del océano, influyendo a las dinámicas oceánicas. El transporte que se produce en aguas profundas es comparable con el que se produce en superficie a pesar de la lentitud de sus corrientes al tener un volumen tan grande. [4]

Por último, los flujos de calor y otras variables transportadas por la circulación profunda influyen en la temperatura del planeta y en el clima. [4] El océano afecta al clima a través de su alta capacidad calorífica en relación con la tierra circundante, moderando de forma

diaria, estacional e interanual las fluctuaciones térmicas, y a través de su capacidad de transportar calor de una zona a otra a través de las corrientes. [5]

1.3.1. Transporte de calor e influencia en el clima

El océano Atlántico es un componente importante en el sistema climático de la Tierra, el transporte de calor en el Océano Atlántico que se produce en dirección norte, esto se debe a la estructura de tipo cinta transportadora originada por la corriente termohalina que dirige el transporte de calor globalmente, siendo conocida la corriente termohalina también como la corriente de retorno meridional (MOC) (Figura 03). [6]

El hundimiento de aguas profundas en el Atlántico Norte es compensado por una corriente superficial cálida en dirección norte procedente de la corriente del golfo, gracias a este transporte se modera el clima en el noroeste de Europa. [6] El transporte de aguas cálidas hasta zonas de altas latitudes en el Atlántico Norte aumenta en las capas superiores a medida que aumenta la intensidad de la circulación meridional. [7]

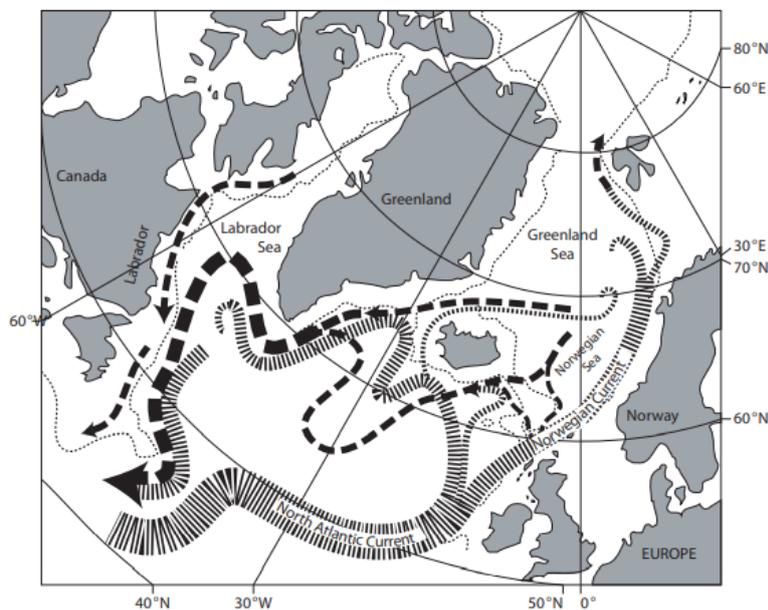


Figura 03. Esquema de corrientes en el Atlántico Norte [6]

Las observaciones indican una tendencia al enfriamiento en el Atlántico norte, que, si continuase podría llegar a contribuir con el debilitamiento de la corriente termohalina en el Atlántico. Un debilitamiento en la formación de esta masa de agua tendría grandes impactos en los ecosistemas marinos, el nivel del mar y el clima en aguas superficiales.

Se considera que un colapso de la corriente termohalina es un riesgo de “baja probabilidad-alto impacto” asociado al calentamiento global. [3]

Aunque el papel de esta corriente de retorno meridional es reconocido desde hace décadas, sigue constituyendo un desafío la correcta simulación de un modelo realista de su estructura y el transporte de calor meridional del Atlántico. [8]

La formación de las masas de agua profunda del Atlántico Norte (NADW) y su conexión con esta corriente de retorno dificultan el modelado del Atlántico. Esta deficiencia en el modelado de la estructura principal de la corriente de retorno meridional atlántica conlleva a un sesgo importante de la temperatura en superficie del Atlántico Norte en muchos modelos generales de circulación. Esta restricción a la hora de modelar la corriente general dificulta el estudio de la Variabilidad Multidecadal del Atlántico (AMV), es decir, la variabilidad teórica de la temperatura en superficie del Atlántico Norte. [8]

La corriente termohalina tiene un papel importante en muchos fenómenos relacionados con el AMV a escala regional y hemisférica, como pueden ser los monzones, los huracanes del Atlántico, ENSO, el clima en Europa, Norte América y Asia; el hielo marino y la temperatura del aire en el Ártico o la temperatura global en la superficie. [8]

No solo la circulación oceánica es importante para el cambio climático, sino que la incertidumbre en la respuesta de la corriente de retorno aumenta la dispersión entre las proyecciones de temperatura, precipitación y circulación de vientos en diferentes modelos. Se ha comprobado que los sesgos en el modelado de la simulación del clima están vinculados con la amplitud de la respuesta de AMOC. [9]

Es fundamental la mejora en el modelado de la estructura de la corriente de retorno meridional, así como de la salinidad y temperatura en superficie del Atlántico Norte, para de esta forma poder obtener vínculos más realistas y fiables entre esta corriente de retorno, AMV y los impactos climáticos asociados a ellos. [8]

1.3.2. Reservorio de CO₂

El océano es el principal reservorio de CO₂, un importante gas de efecto invernadero, pero este carbono se encuentra encerrado, es difícil de intercambiar con el carbono de otros reservorios. Este gas se disuelve mejor en aguas frías, por lo que el mayor reservorio dentro del océano son las aguas profundas frías. [4]

Cuando el CO₂ se libera a la atmósfera el 48% se disuelve rápidamente en el océano, gran parte de este porcentaje va a las aguas profundas. El futuro del cambio climático depende en gran medida de cuánto CO₂ se pueda almacenar en el océano y durante cuánto tiempo. [4]

La cantidad de gas disuelto depende de la temperatura del agua profunda, el tiempo de almacenamiento en el océano profundo depende en la velocidad a la que el agua profunda se renueva. Un incremento en la ventilación de las capas profundas del océano y el calentamiento de las aguas superficiales podría conllevar la liberación de grandes concentraciones de CO₂ a la atmósfera. [4]

CAPÍTULO 2: MODELOS TEÓRICOS

Este apartado se va a centrar en la explicación teórica de los procesos físicos que explican el sistema de circulación profunda y la intensificación de las corrientes de borde oeste.

2.1. RESPUESTA DEL INTERIOR OCEÁNICO A LOS MOVIMIENTOS VERTICALES

Consideraremos que el interior del océano, cuyo movimiento queremos describir, es la masa de agua que se encuentra por debajo de la capa de Ekman, la zona aislada de la influencia del viento. Esta frontera viene fijada también por termoclina permanente, siendo los límites del océano profundo el fondo oceánico, y la termoclina. Por debajo de ésta, salvo en el fondo, los efectos de fricción son despreciables y podemos considerar que las corrientes que existan estarán en equilibrio geostrófico. [1]

Esta masa de agua en equilibrio geostrófico responde a los cambios en la velocidad vertical. Este puede ser debida a varias causas.

- El bombeo de Ekman debido a los vientos.
- Entrada de agua al interior del océano por hundimiento (pérdida de flotabilidad)

En el primer caso, los vientos producen convergencia, por lo que el bombeo se produce en el centro del giro, y es hacia el interior del océano.

En el segundo caso, que es el que nos interesa para el modelo de circulación termohalina, también hay un flujo hacia el interior, pero éste está muy localizado en determinadas zonas geográficas, próximas a los polos. El modelo actual sugiere que este hundimiento localizado de aguas tiene su retorno en forma de surgencia (movimiento vertical, hacia arriba) a través de la termoclina, a lo largo de la mayor parte de la superficie del océano, como se ilustra en la figura siguiente [2]:

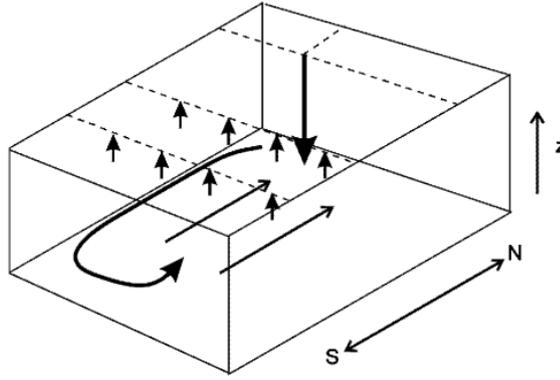


Figura 04. Esquema del sistema de circulación profunda (propuesto por Stommel-Arons) [2]

Las ecuaciones de movimiento, en el caso de equilibrio geostrófico, se expresan como

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - f v_g &= 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f u_g &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde p es la presión hidrostática de la columna de agua, ρ la densidad, f el parámetro de coriolis, y (u, v) has dos componentes horizontales de la velocidad. De estas ecuaciones se pueden resolver las velocidades. Expresado vectorialmente, el campo de velocidades geostróficas es:

$$\vec{u}_g = \left(-\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Tomando la divergencia del flujo geostrófico, y usando la ecuación de continuidad aplicada al flujo interior, encontramos que

$$\nabla \cdot \vec{u}_g = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = -\frac{\beta}{f} v_g \quad (3)$$

donde

$$\beta = \frac{df}{dy} = \frac{1}{R} \frac{df}{d\phi} = \frac{2\Omega}{R} \cos\phi \quad (4)$$

es el parámetro β que representa la variación del efecto coriolis con la latitud.

De lo anterior se deduce que, como el parámetro de coriolis depende de la latitud, el flujo

geostrófico es horizontalmente divergente. Pero, por otra parte, la ecuación de continuidad establece que

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_g = -\frac{\partial w}{\partial z} \quad (5)$$

Combinando ambas se obtiene

$$\beta v_g = f \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

que relaciona la velocidad meridional (norte-sur) con la velocidad vertical (surgencias). Esta ecuación es conocida como ecuación de conservación de la vorticidad potencial del océano, y es uno de los modelos fundamentales para comprender la dinámica a gran escala.

Expresando las derivadas de la ecuación anterior en diferencias, obtenemos que

$$\beta v_g = f \frac{\Delta w}{\Delta z} = f \frac{w - w_0}{H} = f \frac{w}{H} \quad (7)$$

Donde w es la velocidad vertical en la termoclina (a una profundidad intermedia), y w_0 la velocidad vertical en el fondo, que es nula por definición. H es la profundidad entre el fondo y la termoclina. Como $w > 0$ (el agua retorna a la superficie) la ecuación predice un movimiento meridional hacia el norte ($v_g > 0$), coincidente con lo observado. [2]

2.2. INTERPRETACIÓN EN TÉRMINOS DE CONSERVACIÓN DE LA VORTICIDAD POTENCIAL

Veamos este resultado en más detalle considerando que las columnas tienden a conservar la vorticidad potencial. Para explicar esto primero es necesario entender el concepto de vorticidad, este consiste en la rotación de un fluido, existen dos tipos de vorticidad relacionados con dos procesos diferentes [4]:

- Vorticidad planetaria: todo cuerpo existente en la Tierra gira con ella, a esto se le denomina vorticidad planetaria, siendo su valor 2 veces la velocidad local de rotación de la Tierra, coincidiendo su valor con el parámetro de Coriolis (f).
- Vorticidad relativa: el océano no gira exactamente a la misma velocidad que la Tierra, sino que tiene una rotación relativa relacionada con las corrientes y

vientos, (ζ). Cuando esta vorticidad es positiva las corrientes se mueven en sentido ciclónico, contrario a las agujas del reloj.

La suma de estas dos vorticidades es lo que se denomina vorticidad absoluta, de la que deriva la vorticidad potencial (VP). La vorticidad potencial tiene en cuenta la altura de la columna de agua (D), ya que la velocidad de rotación de un fluido varía si se extiende o contrae la columna de agua, de forma que [4]:

$$VP = \frac{\zeta + f}{D} \quad (8)$$

Esta vorticidad potencial sigue la ley de la conservación a lo largo de la trayectoria de un fluido, es decir, el momento angular de cualquier cuerpo que gire se conserva. La profundidad, vorticidad relativa y latitud afectan al valor de la vorticidad potencial, un cambio en uno de estos aspectos conlleva al cambio de otro, los tres interaccionan entre sí. [4]

Las columnas de agua, paralelas al eje de rotación terrestre Ω , deben moverse en un casquete esférico, haciendo que las columnas tengan mayor longitud d cerca del ecuador. Por lo tanto, si se supe a las columnas con fluido desde arriba (debido al bombeo de Ekman, o al hundimiento o surgencia de agua) una columna puede expandir o contraer su volumen sin expandir su radio si se mueve hacia otra latitud. En la figura 05 se representa el caso del bombeo de Ekman en el centro de un giro, las columnas reducen su longitud y por tanto se moverán hacia el sur a la velocidad necesaria para mantener su altura y así conservar la vorticidad potencial.

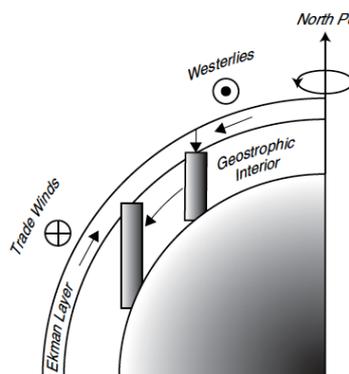


Figura 05. El bombeo de Ekman que produce una velocidad vertical hacia el interior causa un movimiento de la columna hacia el ecuador. La altura de la columna $d = H/\sin\phi$, donde H es el espesor de la capa. [4]

En el caso de la surgencia de la circulación profunda ocurre lo contrario: la surgencia implica un aumento de la longitud de la columna de agua que es compensada con un desplazamiento hacia el polo para conservar la vorticidad.

Entonces, la ecuación $d(f/H)/dt=0$ nos dice que la columna de agua por debajo de la termoclina debe moverse hacia los polos a los efectos de conservar la vorticidad potencial cuando existe una surgencia de aguas desde el fondo hacia arriba.

Por tanto, la ecuación (6) nos da la velocidad v a la cual debe moverse la columna a los efectos de conservar la vorticidad potencial.

2.3. MODELO DE STOMMEL ARONS E INTENSIFICACIÓN DEL OESTE DE LA CORRIENTE PROFUNDA

La teoría expuesta hasta ahora implica que la masa de agua del interior del océano se mueve hacia los polos en respuesta al surgimiento de aguas a profundidades intermedias, que es necesaria para compensar el hundimiento de las aguas por la convección de las zonas polares. [2]

El surgimiento de aguas se produce en toda la cuenca hacia latitudes mayores, mientras que las aguas generadas por convección van hacia el ecuador definidas por una corriente intensa de borde oeste. La existencia de corrientes de oeste intensificadas fue predicha por Stommel y Arons, y es similar al comportamiento de las aguas superficiales (como por ejemplo en la corriente del Golfo) salvo en que el sentido del flujo es opuesto. Ambas corrientes superficial y profunda son dos ramas de la conocida como cinta transportadora global.

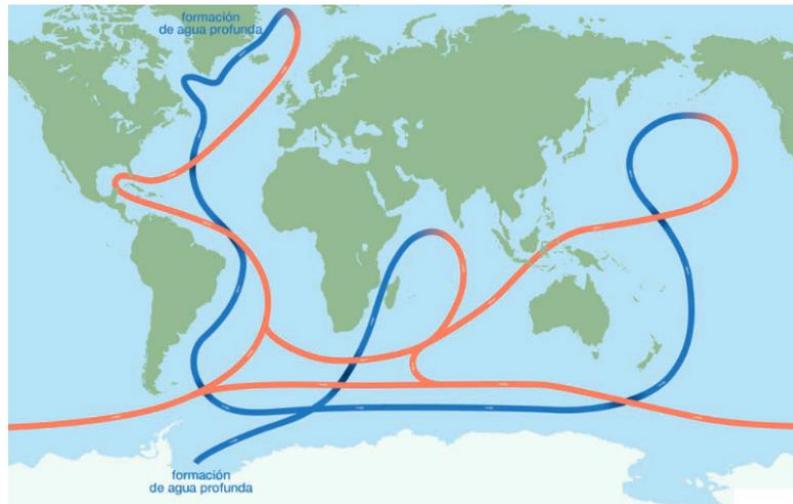


Figura 06. Cinta transportadora global (circulación termohalina) [10]

Estas corrientes que se mueven hacia los polos en el Atlántico Norte regresan a latitudes ecuatoriales junto con las aguas que se hunden por convección en una corriente de borde oeste. Estas consideraciones son las que llevaron a Henry Stommel a su esquema de circulación termohalina originada por el hundimiento de aguas en el Atlántico Norte y el Mar de Weddel en la Antártida. Se ve claramente en su esquema el recorrido de las corrientes de agua originadas por convección por el borde oeste de la cuenca oceánica. [2]

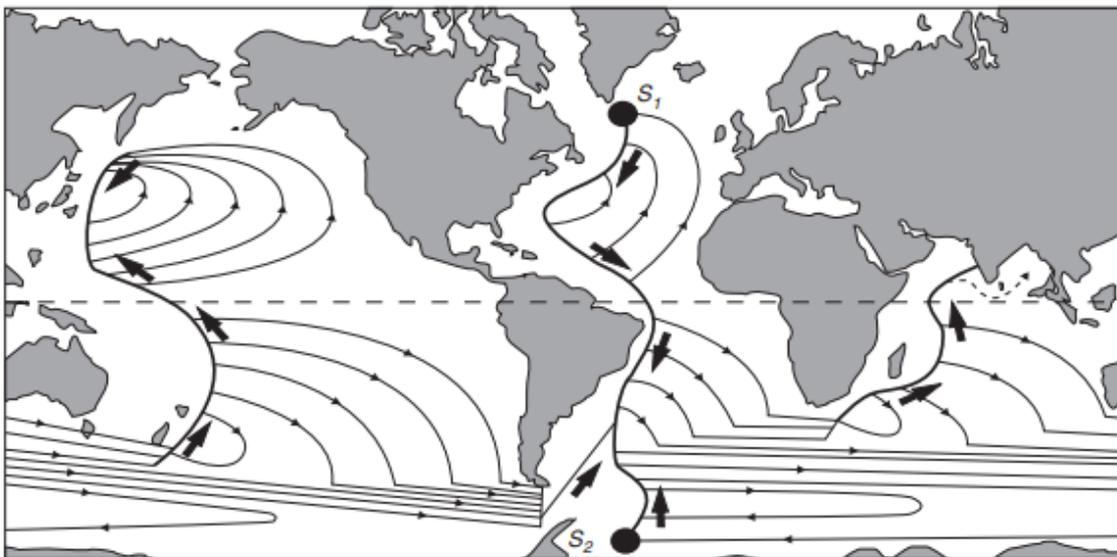


Figura 07. Esquema de la circulación global propuesto por Stommel [4]

Para comprender la razón de esta intensificación de la corriente, primero predicha para Corrientes superficiales, como la del golfo (Stommel, 1948), y posteriormente para

Corrientes profundas (Stommel y Arons, 1961), se ha de tener en cuenta, por un lado, la presencia de fricción entre la masa de agua y los bordes continentales, y por otro lado, que esta fricción genera vorticidad relativa a la masa de agua, ζ . La conservación de la vorticidad potencial implica que la intensidad de la corriente oeste sea mayor que la de la corriente este, tal como se observa.

Estas corrientes profundas son difíciles de medir debido a sus flujos lentos y las dificultades técnicas para monitorizar corrientes a profundidades tan grandes, sin embargo, se puede confirmar la existencia de esta corriente oeste mediante diversas evidencias. [2]

Mediante la dispersión de trazadores pasivos como, por ejemplo, de CFC-11, este compuesto aumento mucho su concentración atmosférica en el siglo XX disolviéndose en aguas superficiales. Estas aguas superficiales con CFC-11 llegaron a latitudes polares donde, mediante convección, pasaron a formar aguas profundas. En la década de los 80 se pudieron monitorizar las concentraciones de este compuesto a 2 km de profundidad, observándose claramente como seguía una trayectoria por el borde oeste de la cuenca del océano Atlántico. [2]

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA A ESCALA DE LABORATORIO

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL DE SIMULACIÓN DE LA CIRCULACIÓN TERMOHALINA

3.1.1. Introducción al protocolo experimental de simulación

El objetivo principal de los experimentos realizados en este trabajo es reproducir algunas de las características observadas en la circulación profunda oceánica real, a escala planetaria, pero a escala de laboratorio para poder reconocer las predicciones teóricas hechas ante la falta de observaciones directas.

El principal factor que se debe tener en cuenta para diseñar el protocolo a seguir en el proceso experimental es determinar las principales variables que afectan a la circulación termohalina, siendo la rotación de la Tierra el primer factor a tener en cuenta, la esfericidad del planeta y la variación del parámetro de Coriolis con el cambio de latitud; y la introducción constante de agua en la capa profunda del océano desde capas superiores por procesos de convección.

Para simular la rotación de la Tierra se pudo contar con una plataforma giratoria sobre la que se colocaron los tanques acrílicos que simulan la cuenca oceánica en cada uno de los experimentos.

Para representar la esfericidad planetaria y en concreto la variación del parámetro de Coriolis, se colocaron unas láminas en los tanques que generaran una inclinación en el fondo y con ello una diferencia de profundidades, esta inclinación en el tanque creando una variación progresiva en la profundidad del agua es lo que permite simular la esfericidad planetaria, de tal forma que en el tanque cuadrado la parte superior en la que se dispuso el difusor se correspondería con zonas de latitudes polares y la parte inferior del tanque, que cuenta con una mayor profundidad, se correspondería con zonas ecuatoriales.

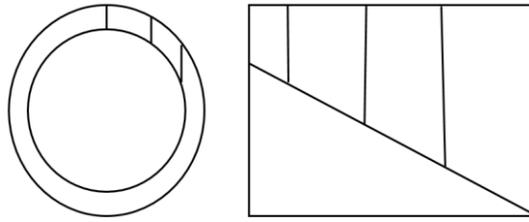


Figura 08. Esquema de representación de la esfericidad planetaria. **Fuente:** elaboración propia

Por último, para simular el proceso de convección que hace que las aguas en superficie se hundan hasta las capas profundas de la cuenca oceánica se utilizó un difusor, este se colocó en la parte del tanque de menor profundidad e iba conectado hasta otro tanque que serviría como fuente de entrada de agua continua.

Adyacente al tanque principal en el que se realizaron las simulaciones se colocaron dos tanques estrechos, uno encima del otro, para permitir que la altura del tanque estrecho, considerado como la fuente de agua, fuera superior a la altura del tanque cuadrado, para así permitir el efecto sifón y el paso del agua desde la fuente hacia el difusor. Para poder seguir la trayectoria de la columna de agua se utilizaron colorantes para teñir el agua del tanque considerado fuente, de tal forma que se apreciara su introducción y recorrido en el tanque.

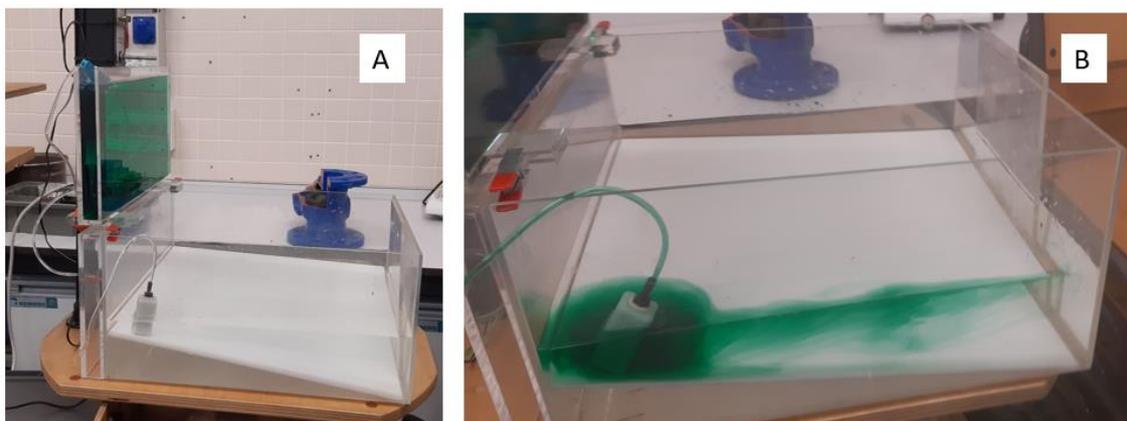


Figura 09. Difusor, **a:** el difusor colocado en la punta norte y el tanque con el agua coloreada que sirve de fuente; **b:** primeros minutos en los que el difusor va aportando agua gracias al efecto sifón. **Fuente:** elaboración propia

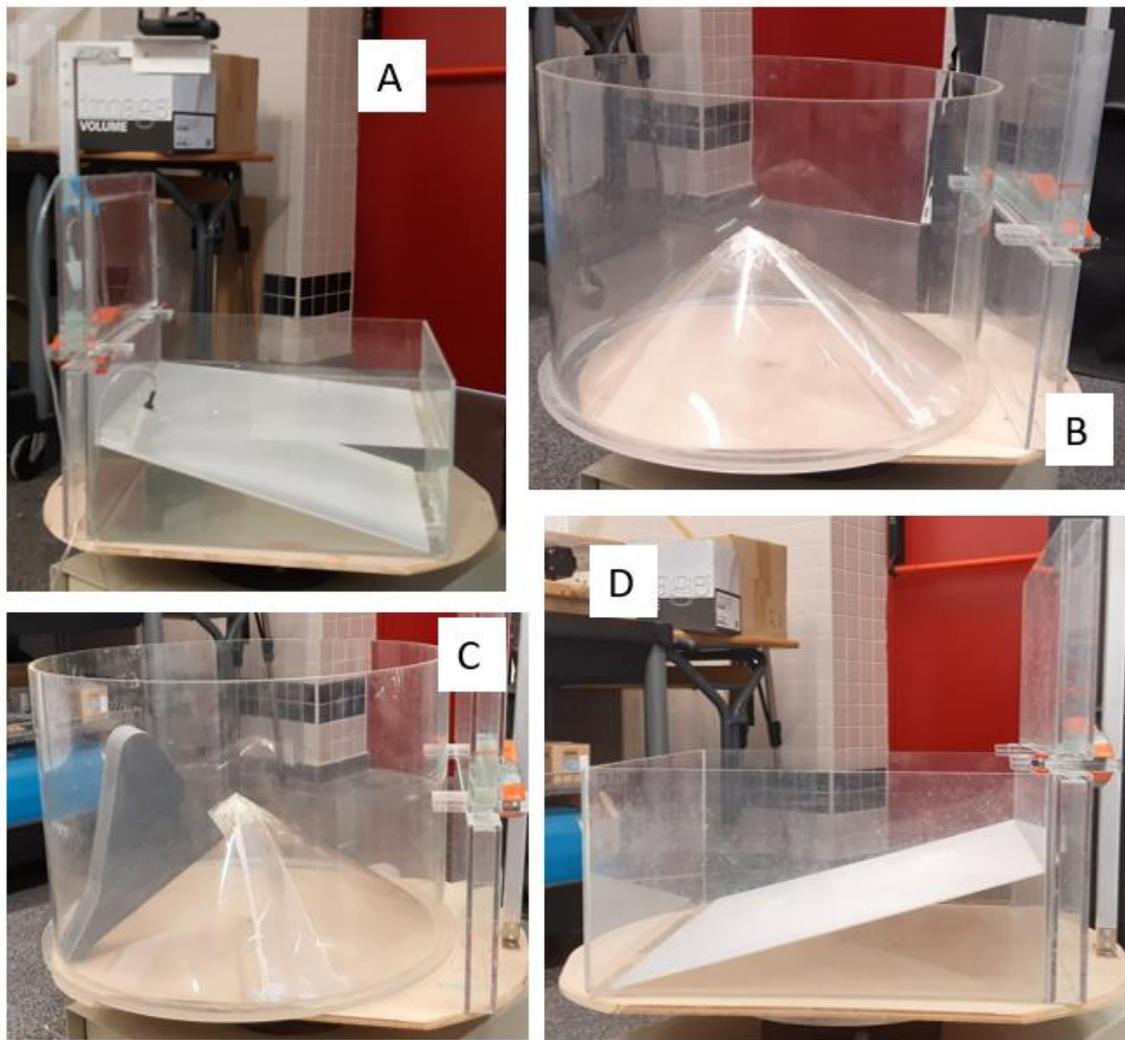


Figura 10. Montajes de laboratorio, **a:** montaje tanque cuadrado con ambos tanques llenos de agua; **b:** montaje tanque cilíndrico solo con el fondo; **c:** montaje tanque cilíndrico con barrera; **d:** montaje tanque cuadrado con un gran ángulo de inclinación. **Fuente:** elaboración propia

Se realizaron varios experimentos sobre la circulación profunda oceánica con posibles variaciones en los parámetros que le afecten, llevando a cabo un total de cuatro experimentos diferentes:

- Experimento de la circulación profunda en un tanque cuadrado con un ángulo de inclinación pequeño
- Experimento de la circulación profunda en un tanque cuadrado con un ángulo de inclinación mayor
- Experimento de la circulación profunda en un tanque cilíndrico
- Experimento de la circulación profunda en un tanque cilíndrico con una barrera que corta la trayectoria

3.1.2. Material

Los materiales que fueron necesarios para realizar las diferentes simulaciones son comunes para muchas de ellas, por lo que en este apartado se realizará la descripción de cada uno de los materiales y en la explicación de cada experimento se detallará cuáles de ellos fueron necesarios para cada caso.

- **Plataforma giratoria:** para poder simular la rotación de la Tierra se contó con una plataforma giratoria. Esta plataforma cuenta con una tabla de madera que gira sobre la que se puede colocar un tanque acrílico de agua.
- **Tanque acrílico cuadrado:** para las primeras simulaciones se utilizó un tanque cuadrado transparente de 40 cm de diámetro.
- **Tanque acrílico cilíndrico:** para las últimas simulaciones se utilizó un tanque transparente cilíndrico para evitar los límites geométricos del tanque cuadrado.
- **Colorantes alimentarios:** para poder observar la masa de agua introducida se utilizaron colorantes de distintos colores para poder estudiar el comportamiento de la columna de agua.
- **Lámina blanca cuadrada:** para poder simular diferentes profundidades se necesitó una lámina blanca de 40 cm para poder simular el fondo inclinado en las primeras simulaciones.
- **Lámina circular de forma cónica:** para poder tener un fondo inclinado en las simulaciones del tanque cilíndrico fue necesario una lámina con forma cónica, que situara la punta en el centro del tanque.
- **Bloque de plástico grueso:** este fue necesario para la última simulación proporcionara una barrera para el paso de la columna de agua.
- **Dos tanques acrílicos estrechos:** se necesitaron dos tanques para poder situar uno encima del otro, dejando el de posición superior a mayor altura que el tanque cuadrado o circular. Este tanque estrecho fue el que contenía agua coloreada que se fue introduciendo en los otros tanques.
- **Difusor:** para poder pasar el agua coloreada de un tanque a otro de forma constante y continua fue necesario un difusor que permitió el flujo de agua gracias al efecto sifón.

Para cuantificar el flujo se realizó el mismo montaje que en el experimento, pero sin estar sobre la tabla giratoria. El tanque estrecho se rellenó con 1,5 L de agua y gracias al efecto sifón se fue transportando el agua hacia el tanque cuadrado.

Pasado un tiempo, 231 segundos cronometrados, se midió el agua que se había transportado, siendo esta 250 ml. Por lo que el flujo fue de alrededor de 1,52ml/s. Para comprobar que la velocidad no variase mucho se volvió a realizar el mismo proceso, pasados 4 minutos se habían transportado 375 ml de agua, con un flujo de aproximadamente 1,56 ml/s. Por lo que se pudo asumir que el flujo del agua coloreada a través del difusor fue de una media de 1,54 ml/s, o si se prefiere, un flujo de 1,54 cm³/s.

- **Teléfono móvil:** que permitiese grabar todo el proceso gracias a un soporte.

3.2. FORMULACIÓN TEÓRICA PARA EL MODELO EXPERIMENTAL A ESCALA DE LABORATORIO:

La preferencia hacia una corriente de oeste y la variación en la velocidad de la columna de agua se pueden explicar con la teoría y desarrollo dinámico de Taylor y Proudman. El agua coloreada fue impulsada al tanque, de longitud lateral L, con una velocidad de fluido S, por lo que la altura, h, del agua del tanque se vio aumentada progresivamente de forma que, [2]

$$\frac{dh}{dt} = \frac{S}{L^2} \quad (1)$$

Al estar el agua del tanque en rotación las columnas de agua deben mantener su altura por la teoría de Taylor y Proudman, al aumentar la altura del agua del tanque para que estas columnas se mantengan con su altura original deben moverse por la masa de agua. La velocidad vertical del agua, w, será:

$$w = \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{S}{L^2} \quad (2)$$

Como el desplazamiento de la columna de agua debe coincidir con la geometría de la masa de agua del tanque definida por la superficie y el fondo inclinado, su velocidad horizontal, v, dependerá del ángulo de inclinación de la pendiente del fondo, α

$$\frac{w}{v} = \frac{dz}{dy} = \alpha \quad (3)$$

De esta relación se puede resumir que a velocidad horizontal de la columna de agua será [2]:

$$V = \frac{1}{\alpha} \frac{S}{L^2} \quad (4)$$

Siendo directamente proporcional a la velocidad de flujo e inversamente proporcional al área de la cuenca y del ángulo de inclinación que tenga el fondo sobre el que circulará la columna de agua

CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. TANQUE CUADRADO

La primera parte del trabajo consistió en la realización y observación de una serie de experimentos en un tanque cuadrado. Se tuvieron en cuenta dos situaciones diferentes, en las que las características se mantuvieron constantes, exceptuando la inclinación de la lámina del fondo, aumentando en el segundo experimento el ángulo de la pendiente del fondo.

4.1.1. Experimento de la circulación profunda en un tanque cuadrado con un ángulo de inclinación pequeño

a) Metodología

Para la realización de este experimento primero fue necesario colocar y realizar el montaje sobre la tabla giratoria. En primer lugar, se llenó de agua el tanque cuadrado cubriendo toda la lámina que simula el fondo, se saturó también de agua el tanque estrecho superior que funciona como fuente.

Se colocó el difusor en el rincón superior con menor profundidad que se corresponde con el punto noreste de la tabla. Una vez asegurado el efecto sifón y cerrando su flujo, se coloreó el agua del tanque estrecho. Para la realización de este experimento la lámina se colocó de forma que creara una pendiente pequeña, con un ángulo de inclinación de 9° .

Se puso en marcha la tabla giratoria, girando en el sentido antihorario y realizando un giro completo cada 9,58 segundos. Se dejó transcurrir entre 15 y 20 minutos hasta que el agua del tanque girase a la misma velocidad de rotación que la tabla para asegurar que, en el marco de referencia del sistema rotante, la masa de agua está en reposo en ausencia de forzamiento externo. Una vez transcurrido ese tiempo se abrió el flujo del difusor para que el agua coloreada pasara al tanque cuadrado y observar así su trayectoria. Todo el proceso fue grabado desde que se abrió el flujo del difusor, el experimento se realizó varias veces para asegurar de esta forma la repetitividad de los resultados.

Posterior al desarrollo del experimento se comprobó que el movimiento observado del agua coloreada estuviera producido por la entrada constante de agua, aumentando con ello la altura de la columna de agua del tanque y con ello afectando a la trayectoria

recorrida por la columna de agua, y no simplemente por la rotación del tanque. Para ello se realizó el mismo procedimiento anteriormente explicado, pero en lugar de introducir continuamente agua coloreada a través del difusor aumentando con ello la altura del agua del tanque, simplemente se introdujeron unas gotas de agua coloreada y se observó su circulación (Figura 10).

Pasado un tiempo se pudo apreciar claramente como no seguía el movimiento esperado para el experimento con difusor, sino que, pasado un tiempo en el lugar donde se había introducido, se desplazaba hacia la zona con mayor profundidad, demostrando con ello que el desplazamiento hacia el borde oeste observado en el experimento fue debido al cambio en la altura de la columna de agua por la inyección constante de un fluido.

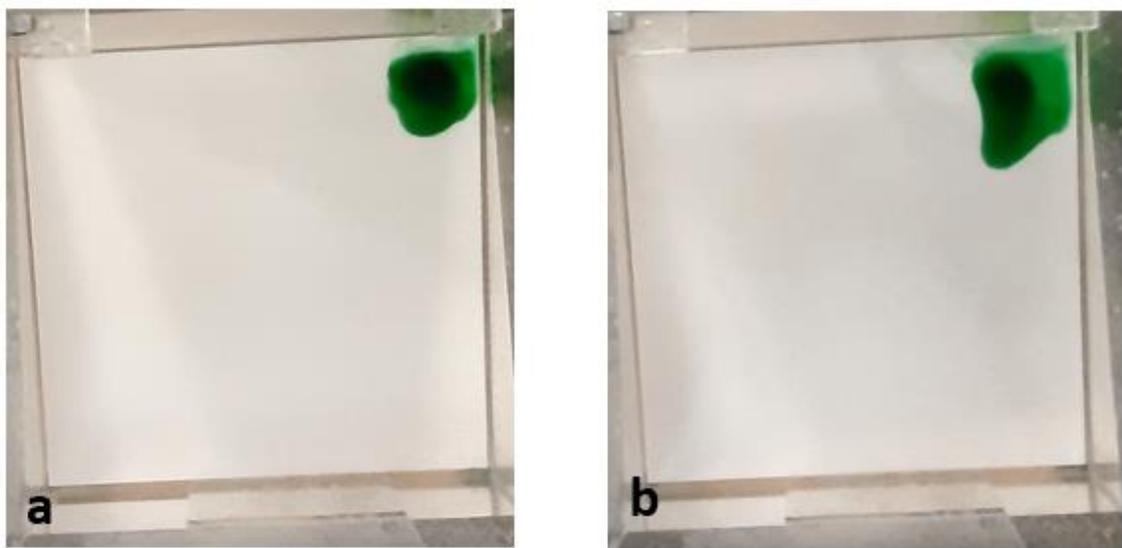


Figura 11. Grabaciones. a: Minuto uno; b: Minuto 3. Fuente: elaboración propia

b) Conclusiones experimentales

Se grabó todo el proceso durante 20 minutos, gracias a ello se pudo observar la trayectoria de agua coloreada se producía hacia el lado del tanque que se correspondería con el lado oeste de la cuenca oceánica, hasta llegar al límite del tanque donde se tuvo que desviar hacia la zona de mayor profundidad, que se correspondería con zonas ecuatoriales, al ser imposible continuar con la trayectoria hacia el oeste.

En la figura 11 se puede observar la trayectoria del agua coloreada, se aprecia claramente como la dirección del flujo es hacia el oeste y al llegar a los límites geométricos del tanque se acumula siguiendo hacia lo que sería las zonas con mayor profundidad. Se pudo

observar claramente la preferencia por una corriente intensificada de borde oeste, transportándose el fluido siempre que sea posible hacia ella.

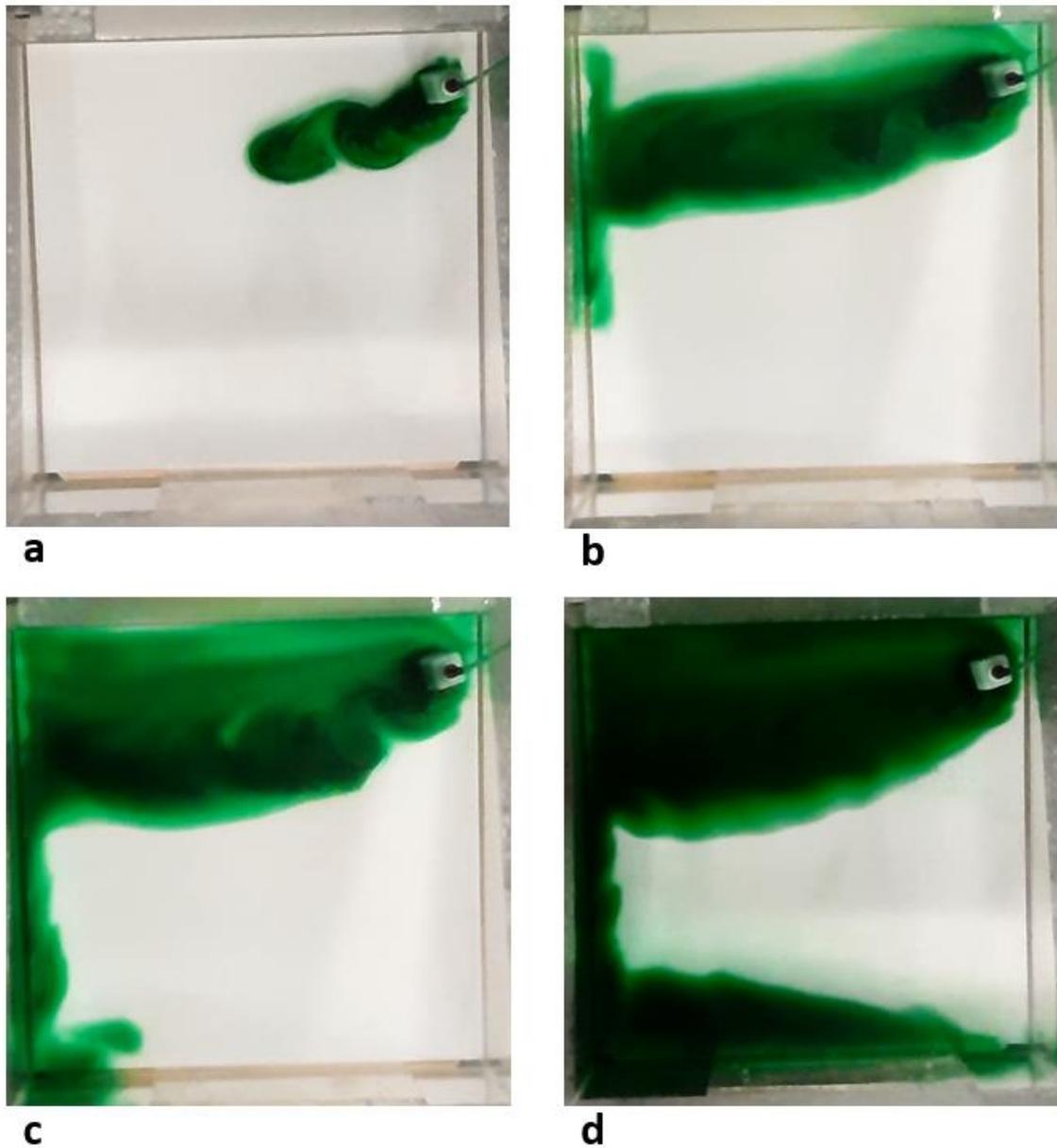


Figura 12. Grabaciones experimento 1. **a:** Minuto 1; **b:** minuto 4; **c:** minuto 7; **d:** minuto 16.

Fuente: elaboración propia

4.1.2. Experimento de la circulación profunda en un tanque cuadrado con un ángulo de inclinación mayor

a) Metodología

Este experimento constituye una variación del experimento anterior, su procedimiento experimental fue el mismo que en el caso anterior, pero en esta ocasión se cambió la variable de la inclinación del fondo, aumentando la inclinación de la pendiente a un ángulo de 17° . Se repitieron las mismas condiciones que en el caso anterior.

b) Conclusiones experimentales

Todo el proceso fue grabado, se pudo comprobar que la trayectoria de la masa de agua fue igual al caso anterior, dirigiéndose en todo momento hacia el oeste hasta llegar al límite del tanque, donde se acumuló previamente a continuar su recorrido hacia el sur.

En ambos casos se ha podido apreciar claramente la preferencia de la columna de agua de dirigirse hacia una corriente más estrecha e intensificada de borde oeste, pudiendo confirmar la existencia de esta corriente de borde oeste.

Respecto a las diferencias observadas entre este experimento y el anterior, se puede apreciar claramente en la figura 12 como la trayectoria sigue la misma dirección que en el caso anterior, pero en esta ocasión la columna de agua necesitó de un mayor periodo de tiempo para poder realizar la misma trayectoria, de lo que se puede concluir que la velocidad ha disminuido en esa ocasión habiendo variado únicamente la pendiente del fondo, que fue aumentada.

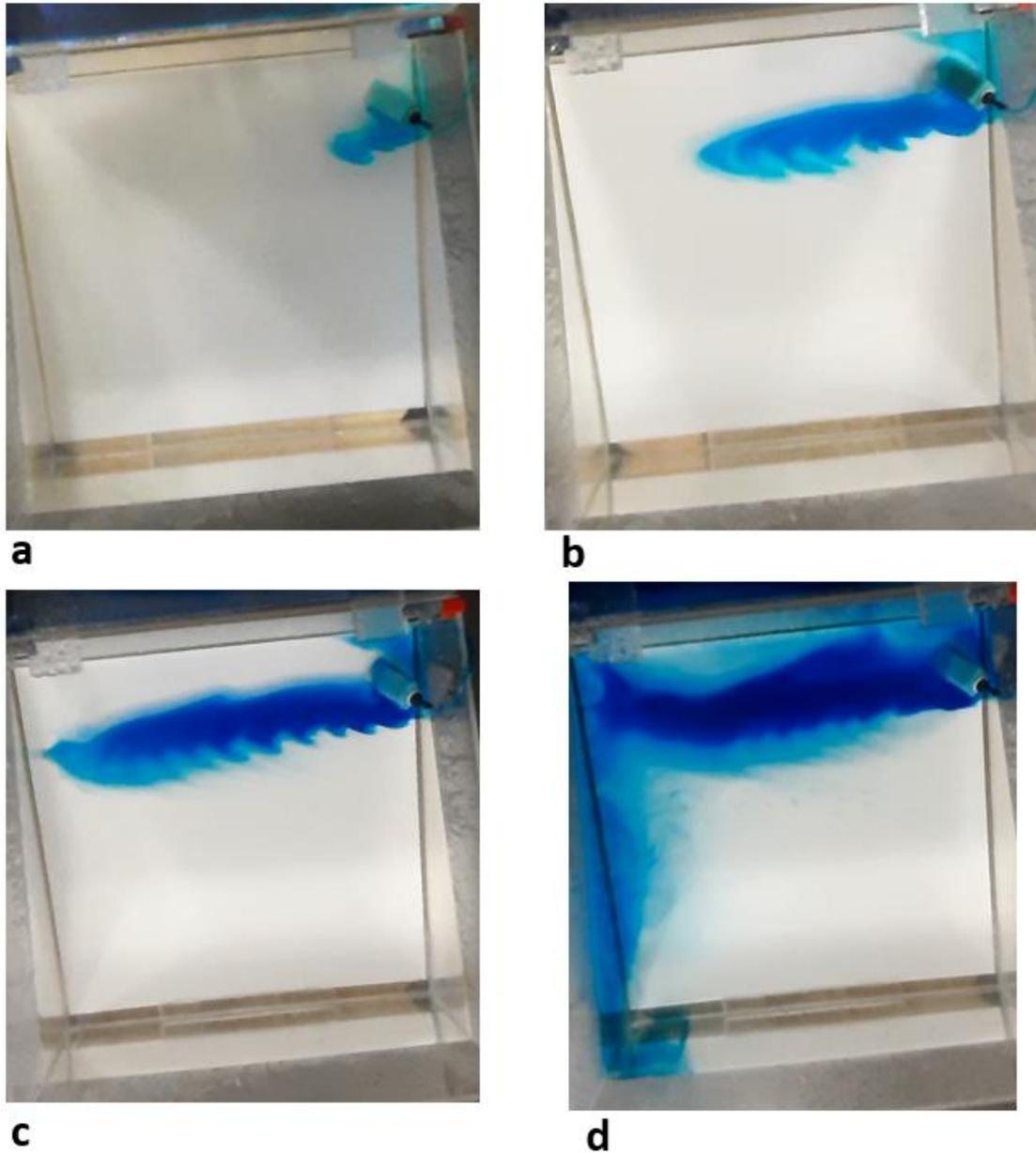


Figura 13. Grabaciones experimento 2. **a:** Minuto 1; **b:** minuto 4; **c:** minuto 7; **d:** minuto 16.

Fuente: elaboración propia

4.1.3. Formulación del modelo experimental a escala de laboratorio:

En las dos primeras simulaciones se pudo confirmar la clara trayectoria que seguían las columnas de agua hacia el borde oeste del tanque y se observó como en la segunda simulación el recorrido tuvo una velocidad menor que en la primera simulación. En este apartado se va a profundizar en la explicación de por qué varía la velocidad de la columna de agua al variar el ángulo de inclinación del fondo.

La preferencia hacia una corriente de oeste y la variación en la velocidad de la columna de agua se puede explicar con la ecuación (4) explicada en el capítulo 3:

$$v = \frac{1}{\alpha} \frac{S}{L^2} \quad (4)$$

Donde S es el flujo al que se introdujo el agua coloreada, L el ancho del tanque y α es el ángulo de inclinación del fondo del tanque.

En ambos casos se mantuvieron constantes los valores del ancho del tanque y de la velocidad a la que era introducida el agua coloreada, siendo los valores de cada parámetro:

$$L = 40 \text{ cm}$$

$$L^2 = 1600 \text{ cm}^2$$

$$S = 1,54 \text{ ml/s} = 1,54 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Se varió el ángulo de inclinación, teniendo en el primer experimento una inclinación menor, de:

$$\alpha = 9^\circ$$

De esta forma, conociendo todos los datos necesarios, se puede calcular la velocidad horizontal que sigue la columna de agua en el primer experimento, de tal forma que,

$$v = \frac{1}{9} \times \frac{1,54 \text{ cm}^3/\text{s}}{1600 \text{ cm}^2} = 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (5)$$

En el segundo experimento se mantuvieron constantes los valores de velocidad de entrada del fluido y el área del fondo del tanque, sin embargo, se varió la inclinación del fondo, aumentando su pendiente y por lo tanto cambiando el valor de α a,

$$\alpha = 17^\circ$$

Por lo tanto, la velocidad horizontal de la columna de agua debe variar en función de este cambio en la inclinación:

$$v = \frac{1}{17} \times \frac{1,54 \text{ cm}^3/\text{s}}{1600 \text{ cm}^2} = 5,7 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (6)$$

En esta segunda ocasión la velocidad horizontal de la columna de agua fue mucho menor que en el primer caso realizado, habiendo variado únicamente el ángulo de inclinación del fondo.

Al ser la pendiente inversamente proporcional al valor de la velocidad horizontal de la columna de agua, es lógico que el valor de la velocidad en el segundo caso haya sido menor al aumentar el valor de α . Es por ello que en el segundo experimento la columna de agua necesitó de un mayor tiempo para realizar el recorrido que en el primer experimento, aunque siguieran la misma dirección de trayectoria y el resto de las variables que afectasen a su recorrido se mantuvieran constantes.

4.2. TANQUE CIRCULAR

En la segunda mitad del trabajo se realizó un experimento muy similar a los casos anteriores, pero en esta parte en lugar de utilizar un tanque de agua cuadrado se utilizó uno cilíndrico para observar las posibles diferencias al eliminar los bordes geométricos. En esta parte también se tuvieron en cuenta dos variantes, en la primera se realizó el experimento sin ningún obstáculo que influyera en el flujo, y en la segunda simulación se introdujo una barrera en la trayectoria de la columna de agua.

4.2.1. Experimento de la circulación profunda en un tanque cilíndrico

a) Metodología

En la segunda mitad del estudio se realizaron una serie de pruebas con un tanque cilíndrico, en el que también se tuvieron en cuenta dos situaciones diferentes, la primera sin limitaciones geométricas en todo el tanque más allá del límite del mismo y en la segunda con un bloque que sirviera de barrera a mitad de la trayectoria que pudiera seguir la columna de agua.

Se realizó el montaje de la tabla de forma similar a los experimentos previos, con un tanque cilíndrico que contuviera una lámina cónica que proporcionara una inclinación del fondo, en esta primera ocasión sin barreras que pudieran limitar la trayectoria de la columna de agua. Adyacente al tanque cilíndrico se utilizaron los mismos tanques estrechos para poder tener una fuente constante de agua, se siguió el mismo procedimiento para el efecto sifón que en los experimentos del tanque cuadrado.

Se puso la tabla rotatoria a girar, completando una vuelta al cabo de 10,11 segundos. Tras los 15 minutos necesarios de espera para que el agua rotara a la misma velocidad que el

tanque y así evitar posibles turbulencias, se abrió el flujo de agua coloreada a través del difusor y se grabó todo el proceso.

Para esta parte del estudio también se quiso comprobar que el trayecto recorrido por la masa de agua coloreada se debía a la introducción constante de agua aumentando con ella la altura de la masa de agua y no únicamente a la rotación de la masa de agua. De la misma manera que con el experimento del tanque cuadrado se dispuso todo de la misma forma en el tanque cilíndrico, pero en esta ocasión el agua coloreada se introdujo por una pipeta y únicamente unas gotas una vez se hubo esperado 15 minutos a que el agua rotara a la misma velocidad que la tabla.

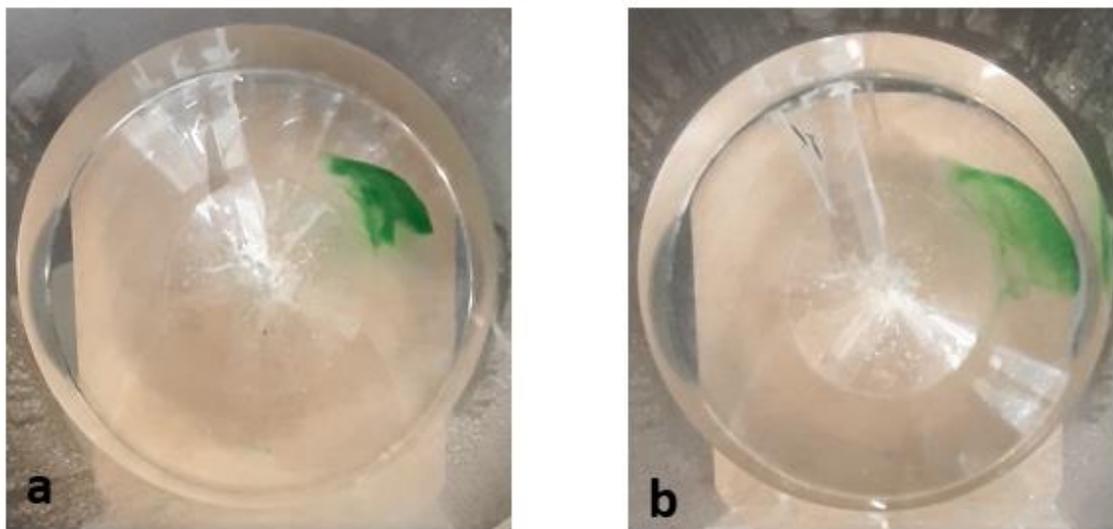


Figura 14. Grabaciones. a: Minuto uno; b: Minuto 2. Fuente: elaboración propia

Al igual que en el caso del tanque cuadrado, se pudo observar claramente como la dirección de la trayectoria es diferente en comparación con la introducción constante de agua coloreada, en esta ocasión el agua coloreada tiende a ir hacia las zonas donde hay una mayor profundidad de agua mientras se dispersa. Se pudo confirmar que la trayectoria de la columna de agua coloreada se mantiene en los experimentos anteriores en una misma profundidad por la variación de la altura de la columna de agua gracias al aporte continuo de agua coloreada.

b) Conclusiones experimentales

La grabación del proceso permitió la comprobación de como la columna de agua coloreada trazaba una trayectoria que se dirigía una vez más hacia el oeste y no hacia

zonas de mayor profundidad, manteniendo su trayectoria siempre en zonas de igual profundidad.

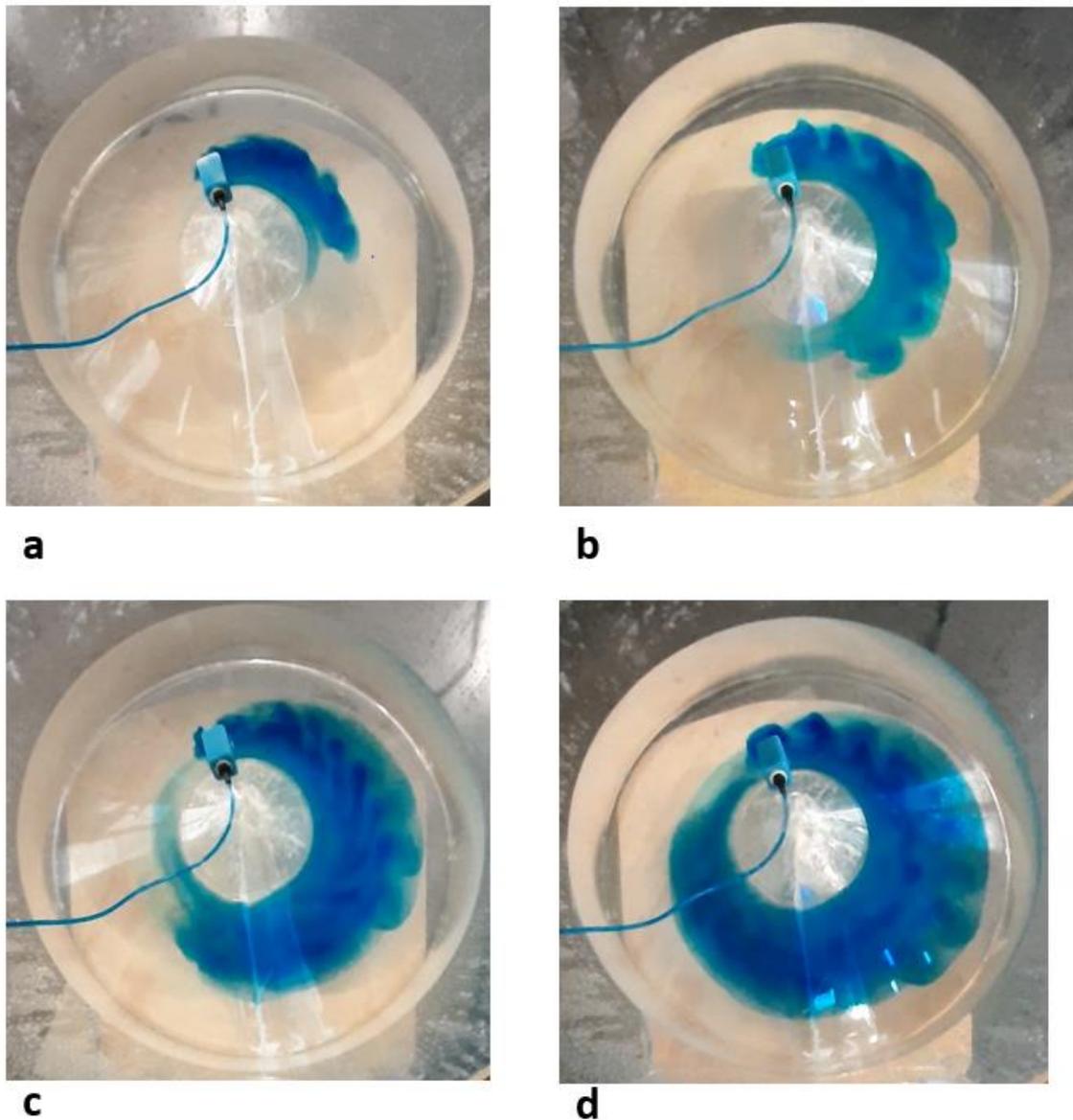


Figura 15. Grabaciones experimento 3. **a:** Minuto 1; **b:** minuto 2; **c:** minuto 3; **d:** minuto 4.

Fuente: elaboración propia

En la figura 14 se observa el recorrido realizado por la columna de agua. La asimetría que se observa en su trayectoria, donde aparece una mayor acumulación en una zona, pudo deberse a que la lámina cónica que permitía la inclinación del fondo no era simétrica, y aunque la punta se encontraba cerca del centro del tanque, no llegaba a situarse en el punto céntrico exacto, teniendo un lado una mayor inclinación que el otro lado y pudiendo afectar a la distribución del agua.

A pesar de esta asimetría se puede apreciar que la columna de agua se mantiene en zonas de igual profundidad, manteniendo su altura original a la vez que se dirige su flujo hacia el oeste.

4.2.2. Experimento de la circulación profunda en un tanque cilíndrico con una barrera

a) Metodología

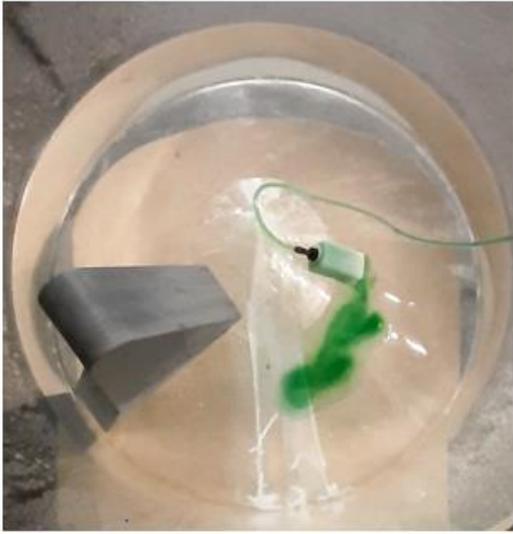
En esta última simulación se quiso observar el recorrido de la columna de agua en el mismo caso anterior, pero en esta ocasión incluyendo una barrera que impidiera el paso de la columna de agua en su recorrido.

Se realizó el mismo montaje añadiendo en este caso un bloque que actuase como impedimento para el paso del fluido, la velocidad de rotación de la tabla fue similar al caso anterior, completando una vuelta en 10,77 segundos. Tras los correspondientes 15 minutos de espera se comenzó el proceso.

b) Conclusiones experimentales

En la figura 15 se pudo observar como la masa de agua coloreada se comportaba como en el experimento anterior, siguiendo su trayectoria hacia el oeste a una misma profundidad, pero en esta ocasión al llegar a la barrera se vio obligado a desviar su dirección hacia las zonas de mayor profundidad, pero siempre manteniéndose el agua coloreada pegada al borde del bloque que se correspondería con una corriente de borde oeste, comportamiento idéntico al que se observó en la primera parte del estudio en el tanque cuadrado.

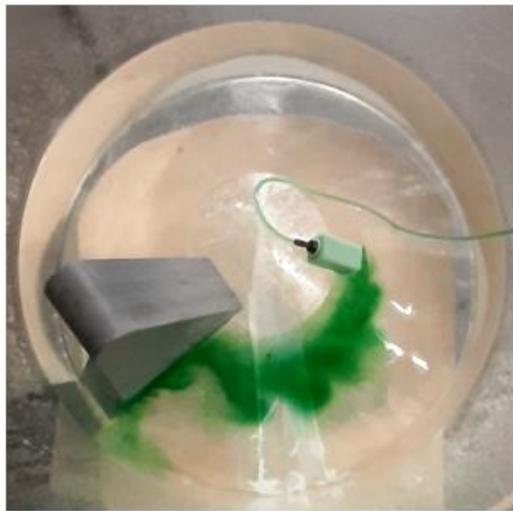
La columna de agua se dirige hacia el oeste y únicamente varía su dirección cuando se encuentra con un límite geométrico, de hecho, en la última imagen se puede observar como el agua al llegar al límite del tanque con la barrera, la cual no llega a limitar en su totalidad el paso del agua hasta el borde del tanque, sino que deja pasar agua en esa zona limitante, por esta zona el agua coloreada trata de colarse y continuar su recorrido hacia el oeste, existiendo claramente una preferencia por las corrientes del oeste.



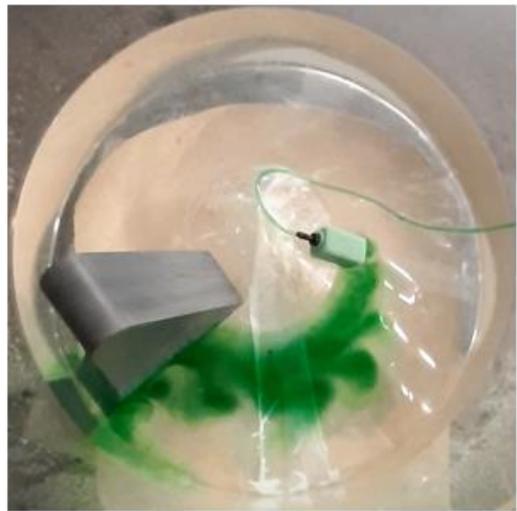
a



b



c



d

Figura 16. Grabaciones experimento 4. a: Minuto 1; b: minuto 2; c: minuto 3; d: minuto 4.

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

Este trabajo comparte una gran similitud con el trabajo realizado por Mediavilla et al (2009) que fue realizado para un congreso con la función de servir para la formación de oceanógrafos y meteorólogos desde aplicaciones en el laboratorio. Ambos trabajos buscan dar una explicación teórica del sistema de circulación profunda y los factores que intervienen en ella, además de realizar en el laboratorio una serie de experimentos en una tabla rotante que simulara un sistema en rotación que permitiera la visualización de esta circulación.

Desde el punto de vista del marco teórico ambos trabajos parten de las predicciones teóricas hechas por Henry Stommel y el teorema de Taylor-Proudman en la esfera para la explicación del modelo de circulación y la observación de una corriente de borde oeste intensificada.

El trabajo tomado como referencia, aunque tiene las explicaciones necesarias, no llega a ser del todo preciso para la comprensión de estos fenómenos al no tener una extensión necesaria para poder explicar todos los procesos involucrados en la circulación, por lo que en este trabajo se ha pretendido tener un marco teórico más extenso y aclarativo que supliera esas carencias. [11]

Respecto al diseño experimental ambos trabajos siguen el mismo método y tienen en cuenta las principales variables que afectan a la circulación termohalina, utilizando una tabla rotante, con un tanque acrílico que sirva como simulación de una cuenca oceánica con un fondo inclinado para representar la esfericidad planetaria y la utilización de un difusor para la simulación de una entrada continua de agua. Sin embargo, los experimentos realizados en ambos trabajos difieren, Mediavilla et al realizaron tres experimentos:

- En el primer experimento utilizaron un tanque cuadrado al que añadieron un fondo inclinado con rotación
- En el segundo experimento eliminaron la variable del fondo inclinado, representando lo que sería una Tierra cilíndrica y no esférica
- El tercer experimento volvió a contar con un plano inclinado, pero eliminaron la rotación dentro del sistema

El primer experimento fue muy similar al realizado en un tanque cuadrado en este trabajo, ambos coinciden en los resultados respecto a la trayectoria del flujo. Destacar únicamente

que en el trabajo realizado por Mediavilla et al cambiaron lo que serían las coordenadas del tanque, siendo la parte con menos profundidad y donde colocan el difusor la punta sureste de la cuenca; al contrario que en este trabajo donde hemos tomado la punta noreste. Este cambio no afecta a los resultados, se sigue viendo una clara preferencia hacia una corriente de borde oeste, y aunque en este caso la corriente se dirigiría a latitudes norte, podríamos suponer que, en vez de tomar el Atlántico Norte como cuenca oceánica, se refirieron al Atlántico Sur donde las aguas profundas se originan en latitudes polares y viajan hacia el norte hasta el Ecuador, aunque no especificaron esto en el trabajo lo que hubiera sido conveniente para una mejor comprensión de los resultados.

Los otros dos experimentos que realizaron en este trabajo de referencia no se llevaron a cabo en esta memoria al no considerarse necesarios para la explicación y comprensión del sistema de circulación de la corriente profunda, ya que son simulaciones de procesos en un sistema no esférico y en un sistema en el que no existe la rotación, siendo ninguno de ellos casos que puedan ocurrir en el océano.

Como última diferencia, en este trabajo se realizaron otro tipo de experimentos ya explicados que se considera podrían ser una mejor aportación para la comprensión de los procesos implicados en la circulación termohalina.

La realización de dos experimentos en tanques cuadrados variando la inclinación del fondo ayudan a la comprensión del teorema de Taylor-Proudman al visualizar de forma manifiesta como una variación en el ángulo de inclinación del fondo sobre el que realiza su recorrido la columna de agua influye en la velocidad horizontal de la misma. De la misma forma, al haber realizado los experimentos en el tanque cilíndrico, también se ha podido comprobar de forma diferente esa tendencia a una corriente intensificada de borde oeste.

Por lo que se podría concluir, que el trabajo realizado por Mediavilla et al es importante al establecer las bases con las que realizar experimentos en el laboratorio que ayudan a la comprensión de la circulación profunda, y esta memoria se puede considerar una ampliación teórica con nuevas propuestas para la realización de experimentos a escala de laboratorio.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo ha pretendido ser un estudio que sirviese para la comprensión teórica de ciertos principios sobre la circulación general oceánica propuestos por Henry Stommel, además de su demostración experimental a escala de laboratorio. Se han conseguido los objetivos iniciales propuestos.

En primer lugar, se ha conseguido elaborar los dispositivos experimentales necesarios que fuesen capaces de reproducir las condiciones necesarias para la circulación oceánica a escala de laboratorio.

Gracias a ello se pudieron simular diferentes procesos de circulación profunda, modificando ciertas variables para poder conseguir un estudio más completo de los procesos físicos que explican la circulación. De esta forma se han realizado varios experimentos, pudiendo dividirlos en dos grandes bloques, las simulaciones realizadas en un tanque cuadrado y en un tanque cilíndrico.

Los experimentos realizados en el tanque cuadrado variando el grado de inclinación del fondo y la contabilización de sus parámetros, como el flujo de entrada, el grado de inclinación y el área del fondo, han permitido la demostración de cómo la velocidad horizontal de la columna de agua es inversamente proporcional al grado de inclinación del fondo por el que circula la misma.

Dentro de estos experimentos se ha evidenciado la clara preferencia de la columna de agua hacia una corriente de borde oeste, predicha por Henry Stommel. Además, se ha podido confirmar como este flujo de corriente se produce como respuesta a una entrada constante de agua que cambia la altura del agua del tanque, y no únicamente por la rotación del sistema.

Los experimentos realizados en el tanque cilíndrico, con y sin barrera en la trayectoria, confirman a su vez la clara preferencia de la columna de agua en dirigirse hacia el oeste.

Este tipo de trabajos tienen una gran importancia para la comprensión de los procesos relacionados con las corrientes profundas ante la carencia de observaciones directas, siendo las simulaciones a escala de laboratorio una herramienta muy útil para la demostración práctica de las explicaciones teóricas propuestas por Henry Stommel.

Se puede concluir finalmente que es necesario continuar con el estudio de la corriente termohalina, estudio que se vio incrementado desde el siglo XX, por la importancia de su comprensión y la de todos los fenómenos climáticos asociados a él, además, de intentar modelizar la estructura de la corriente para poder prevenir cambios futuros relacionados con el cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Cushman-Roisin & J. Beckers, (2009), “Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Physical and Numerical Aspects”, *Academic Press*
- [2] Marshall J. & R. A. Plumb, (2008), “Atmosphere, ocean and climate dynamics”, *Ed. Academic Press Inc*
- [3] S. Rahmstorf, (2006), “Thermohaline Ocean Circulation”, *Encyclopedia of Quaternary Sciences*, S. S. Elias
- [4] R. H. Stewart, (2009), “Introduction to Physical Oceanography”, *Department of Oceanography, Texas A&M University*
- [5] P. U. Clark, N. G. Pisias, T.F. Stocker & A. J. Weavers, (2002), “The role of the thermohalina circulation in abrupt climate change”, *Nature*, Vol. 415
- [6] M. Vellinga & R. A. Wood, (2002), “Global Climatic Impacts of a Collapse of the Atlantic Thermohaline Circulation” *Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Climatic Change* 54: 251-267
- [7] V. A. Bagatinsky & N. A. Diansky, (2021), “Variability of the North Atlantic Thermohaline Circulation in Different Phases of the Atlantic Multidecadas Oscillation from Ocean Objective Analyses and Reanalyses”, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, Vol. 57, n° 2: 208-219
- [8] R. Zhang, R. Sutton, G. Danabasoglu, Y. Kwon, R. Marsh, S. G. Yeager, D. E. Amrhein & C. M. Little, (2019), “A Review of the Role of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in Atlantic Multidecadas Variability and Associated Climate Impacts”, *Reviews of Geophysics*, 57, 316–375
- [9] K. Bellomo, M. Angeloni, S. Corti & J. von Hardenberg, (2021), “Future Climate Change Shaped by Inter-model Differences in Atlantic Meridional Overturning Circulation Response”, *Nature Communications*
- [10] M. Gulis, “¿Una Europa congelada? El paradójico desenlace del calentamiento global” *Ciencia para llevar, El blog del CSIC* (2015) < <https://blogs.20minutos.es/ciencia-para-llevar-csic/tag/circulacion-termohalina/> > [Consulta: Septiembre de 2022]
- [11] D. Mediavilla, L. Ruiz Etcheverry, M. C. Nieva Tamasiunas, M. L. Clara Tejedor, D. Moreira & C. G. Simionato, (2009), “Circulación Termohalina en el Océano”, *TallEx: Experimentos de Laboratorio en la Formación de Oceanógrafos y Meteorólogos, XI Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET XI), XIII Congreso Ibérico y Latinoamericano de Meteorología (CLIMET XIII)*