

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

MODELO MULTICAPAS PARA ESTIMAR MODOS NATURALES DE  
OSCILACIÓN EN EMBALSES TROPICALES

*José Daniel Vélez Castaño<sup>1</sup>, Andrés GómezGiraldo<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Estudiante de Maestría, Ingeniero Sanitario, jdvelezc@unal.edu.co, <sup>2</sup> Ph.D – Profesor Asociado, eagomezgi@unal.edu.co. Universidad Nacional de Colombia. -Escuela de Geociencias y Medio Ambiente-. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.*

RESUMEN:

Las ondas internas son cruciales en los procesos de mezcla en cuerpos de agua estratificados. Para entender cuáles son los efectos y sus consecuencias para el equilibrio del cuerpo de agua se hace necesario entender la estructura de las ondas internas y modifican la estratificación. En las regiones tropicales la estratificación térmica en la columna de agua no es tan marcada como en las regiones que se presentan estaciones climáticas. En éstos lugares la estratificación puede ser descrita con modelos de pocas capas, pues el metalimnio es fácilmente diferenciable, mientras que en las regiones tropicales éste no se diferencia tan fácilmente por lo que describirla con pocas capas puede llevar a aproximaciones poco confiables. De acuerdo a lo anterior, en este trabajo se presenta un esbozo del desarrollo de un modelo multicapas con fondo plano, cuyo número de capas está condicionado por la estructura de la estratificación del cuerpo de agua. El modelo resuelve el problema de valores y vectores propios que produce el conjunto de modos normales de oscilación y de velocidades de propagación de las ondas en las interfases, los cuales permiten comparar las estructuras de las ondas internas para un caso de 3, 5 y 8 capas. El modelo es aplicado para aproximar al embalse alargado Porce II, donde resultados que se presentan son las velocidades de propagación y los periodos de las ondas.

ABSTRACT:

Internal waves are crucial in mixing of stratified water bodies. To understand what are the effects and their implications for the balance of the water body, it is necessary understand the structure of internal waves and how this is modified by the stratification. In tropical zones thermal stratification in the water column are not as marked as in region with seasons. In this regions the stratification can be described by of few layers, since the metalimnion is easily distinguishable, while in tropical zones this metalimnion is not distinguishable so easily and described it with a few layers can yield unreliable approaches. This paper presents an outline of the development of multilayer model that approaches the real shape of reservoir basin to one rectangular shape basin, with a number of layers conditioned by the stratification structure of the water body. The model resolves the eigenvalues and eigenvectors problem that produces a set of the free modes of oscillation and of the internal wave celerities of propagation at the interfaces, which allow compare the internal waves structure for a case study of 3, 5 and 8 layers. The model is applied to the elongated reservoir PorceII . The results presented are the celerities of propagation and wave periods.

PALABRAS CLAVES

Modelo multicapas, ondas internas, cuerpo de agua estratificado.

## INTRODUCCIÓN

Una de las respuestas de un cuerpo de agua a la fuerza que ejerce el viento sobre su superficie es la generación de ondas estacionarias que ocurren en toda la dimensión del éste. Estas pueden ser superficiales (barotrópicas) o internas (baroclínicas) (Lorke y Wüest 2005) y son cruciales en los procesos de mezcla en cuerpos de agua estratificados, puesto que ellas inducen esfuerzos cortantes en el interior de la masa de agua y en la interfase con los sedimentos. Las ondas estacionarias internas causan mayores desplazamientos de agua que las ondas superficiales y por esto se les ha dado más relevancia en la limnología física (Rajasekara 2002).

Es por lo anterior que la dinámica de las ondas estacionarias internas han sido tratadas extensivamente mediante observaciones y modelos durante las últimas décadas (Saggio e Imberger 1998). Para esto se han desarrollado modelos bidimensionales para describir la dinámica de éstas ondas, entre ellos, los modelos por capas en donde se asumen lagos que tienen forma rectangular y en los que no tienen importancia los efectos de rotación de la tierra. Estos modelos simplificados permitieron realizar estimaciones adecuadas del periodo de los modos naturales de oscilación pero de una manera aproximada.

Dentro de los modelos simplificados el más sencillo para describir los movimientos de las ondas internas es el modelo de 2 capas y fondo plano (e.g., Heaps y Ramsbottom 1966). Este modelo tiene bastantes simplificaciones: divide la columna de agua en 2 capas las cuales están separadas por una termoclina infinitesimalmente delgada, asume una forma del lago rectangular con profundidad uniforme, no hay movimiento en direcciones transversales, se desprecian efectos geostroficados, la fricción en las fronteras del lago es despreciada, la presión atmosférica es uniforme y constante sobre el agua y ésta es incompresible. En este caso en particular hay dos grados de libertad, que son dos velocidades, una de la onda superficial y la otra de la onda interna que se propaga entre la interfase de ambas capas.

En este contexto la dinámica podía ser separada en dos componentes: la primera correspondiente a un fluido completamente homogéneo y la segunda totalmente dependiente de la estratificación. Esta separación reduce el sistema de seis ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan la dinámica de las 2 capas a uno mucho más simple de tres que pueden ser aplicadas tanto al movimiento barotrópico como al baroclínico (Schwab 1977).

Por su configuración, el modelo sólo puede describir el primer modo de oscilación vertical. Esto es una gran limitación, pues se sabe de modos de oscilación más altos presentes en muchos sistemas. A pesar de que es muy raro encontrar lagos cuya estratificación pueda ser descrita de manera correcta mediante 2 capas, en la mayoría de los estudios experimentales las estratificaciones consideradas han sido descritas mediante este modelo, sin importar que la presencia de una interfase infinitamente delgada entre 2 capas pueda tener fuertes efectos sobre la respuesta del lago a un forzamiento externo (Monismith 1985).

A partir del modelo de 2 capas se fueron desarrollando modelos más detallados de estratificación adicionando capas. Cada adición permite la representación de un modo vertical adicional y por consiguiente mejorando la aproximación (Monismith 1985). Por lo tanto se fueron desarrollando modelos de 3 y 4 capas que permitirían una mejor aproximación a la dinámica de los cuerpos de agua y que se utilizaban de acuerdo al espesor del metalimnio.

Los modelos con pocas capas se ajustan bastante bien a cuerpos de agua donde la estratificación térmica es muy marcada y los gradientes de temperatura varían fuertemente en un metalimnio con un espesor relativamente pequeño en donde el epilimnio, metalimnio e hipolimnio son fácilmente

diferenciables y es posible describir el comportamiento del gradiente de temperatura en el metalimnio con pocas capas.

Este comportamiento es común en latitudes donde existen estaciones climáticas para las cuales se han desarrollado los modelos de 2, 3 y 4 capas. Sin embargo, en regiones tropicales no son tan comunes las situaciones donde se presenten una marcada estratificación y lo que sucede es que el cuerpo de agua se estratifica con gradientes de temperatura que varían poco en un metalimnio con un espesor relativamente grande. Este comportamiento causa que el epilimnio, metalimnio e hipolimnio no se diferencien tan fácilmente como en los extratropicales y debido a que el grosor del metalimnio aumenta, la descripción de los gradientes de temperatura mediante pocas capas puede no ser adecuado y generar aproximaciones de gradientes.

Debido a esto, en este trabajo se desarrolló un modelo multicapas para lagos alargados que puedan representarse mediante una geometría rectangular. El número de capas utilizado depende de que tan extensa sea la termoclina, utilizando muchas capas cuando es gruesa y pocas capas cuando es delgada.

## DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS LAS ONDAS ESTACIONARIAS INTERNAS.

Las ondas internas estacionarias son una característica ubicua de los lagos que se generan debido a la acción forzante del viento sobre una columna de agua estratificada, donde la estratificación generalmente es debida a la temperatura. Estas ondas se originan cuando el viento ejerce un esfuerzo cortante sobre la superficie de la masa de agua lo suficientemente fuerte como para moverla en la dirección del viento e inclinar la superficie libre. Este desnivel de la superficie libre es balanceado por una inclinación del metalimnio en sentido opuesto. Cuando el viento deja de ejercer dicho esfuerzo la inclinación cesa y la superficie del cuerpo de agua entra en oscilación alrededor de la posición de equilibrio, lo que se conoce como ondas superficiales o barotrópicas. Así mismo, el metalimnio también comienza a oscilar, lo que se conoce como ondas estacionarias internas o baroclínicas. Los dos movimientos ocurren al mismo tiempo pero pueden considerarse desacoplados y forman soluciones ortogonales de la ecuación de onda (Antenucci e Imberger 2003).

Estas ondas se asemejan a osciladores mecánicos viscosamente amortiguados y poseen un espectro de modos libres o naturales de oscilación, que son definidos por las dimensiones del lago, su morfometría y la distribución de densidad en un cuerpo de agua particular. Estos modos libres o naturales de oscilación de las ondas en un lago pueden ser tanto verticales como horizontales. Los primeros están determinados por la distribución de densidad y los segundos, además de la distribución de densidad, también están determinados por la batimetría del lago (Lemmin 1987). De estos modos naturales los que más se reportan son el primer y el segundo modo vertical. Sin embargo, se presentan también modos más altos pero estos poseen escasos reportes, muchas veces porque el estudio de las ondas internas se ha enfocado en la profundidad de la termoclina y otras veces debido a que la superposición de diferentes modos pueden causar que modos más altos sean interpretados, de manera equivocada como modos verticales 1 o 2 (Pérez et al. 2003). La respuesta entonces de estos movimientos al forzamiento provocado por el viento depende no sólo de la amplitud de la fuerza aplicada, si no también, del grado de coincidencia entre la frecuencia forzante y las frecuencias de los modos naturales de oscilación y del grado de amortiguamiento impuesto por la fricción.

## IMPORTANCIA DE LAS ONDAS ESTACIONARIAS INTERNAS.

Las ondas internas constituyen el primer nivel en la cascada de energía en los lagos. Estas son las que distribuyen la energía cinética a grandes distancias, desde la fuente hasta el punto en el cual son disipadas, generan frentes cortantes y turbulencia que contribuye a la mezcla y dispersión (Ostrovsky et al. 1996). Como consecuencia, se presenta resuspensión de sedimentos y materia orgánica,

afectación de la distribución espacial de organismos microscópicos y macroscópicos, afectando la variación periódica de la intensidad de la luz solar que reciben (Münnich 1996); contribuyen a la formación de una capa límite bentónica, la cual aumenta las disoluciones, resuspensión y transporte de contaminantes, nutrientes y sedimentos (Mac-Manus y Duck 1988 en Fricker y Nepf 2000), además del transporte vertical y horizontal de los diferentes elementos presentes en el cuerpo de agua.

Gran parte de la energía de las ondas estacionarias internas se pierde en las orillas del lago, donde es una gran fuente de energía para varios fenómenos que ocurren allí. La mezcla turbulenta en estas orillas puede producirse por el rompimiento de las ondas estacionarias internas cerca del fondo del lago y por los esfuerzos cortantes inducidos por los gradientes de velocidad. Además, existen estudios que sugieren que cerca de las orillas, la actividad de las ondas estacionarias internas afecta la productividad del lago aumentando la circulación de nutrientes desde el hipolimnio hasta el epilimnio (Ostrovsky et al. 1996).

Por todo lo anterior, se hace necesario la caracterización de estos movimientos oscilatorios para una correcta interpretación de la dinámica del agua, las partículas y nutrientes.

## ECUACIONES GOBERNANTES DE LAS ONDAS ESTACIONARIAS INTERNAS

Por motivos de espacio, solo se presentan aquí algunos lineamientos del desarrollo del modelo. Más detalles de la derivación podrán observarse en la próxima edición de la revista Avances en Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia.

Se adopta un modelo de capas homogéneas donde la densidad no varía dentro de cada capa pero sí lo hace entre capas. El punto de partida de los modelos para ondas estacionarias internas por capas son las leyes básicas que gobiernan la dinámica de un fluido incompresible, estas son:

- Conservación de momentum en x, y, z.

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla \bar{p} + \bar{F} \quad [1]$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla \bar{p} + \bar{F} \quad [2]$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho_n} \nabla \bar{p} + \frac{\rho'}{\rho_n} g + \bar{F} \quad [3]$$

donde el término  $\frac{\rho'}{\rho_n} g$  es la boyancia que cuantifica la energía potencial debido al desplazamiento vertical de masas de agua de diferente densidad.

- Conservación de masa.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [4]$$

Las ecuaciones de momentum y conservación de masa deben ser aplicadas para cada capa uniforme, por lo tanto el tamaño del sistema de ecuaciones que describen los movimientos dependen de las capas que se vayan a considerar.

Para simplificar el problema se hacen algunas suposiciones:

- Los movimientos ondulatorios son considerados comúnmente como perturbaciones alrededor de un punto de referencia, usualmente un estado en reposo. Esto implica que  $\rho$  es constante en los planos perpendiculares a  $g$ .
- Se desprecian los cambios de la densidad en el fluido, excepto donde esta se multiplica por el término de la gravedad (aproximación de Boussinesq).
- Se asume una forma del lago rectangular con fondo plano (Figura 1).

Las ecuaciones de movimiento para ondas internas en modelos de estratificación por capas se obtienen integrando las ecuaciones básicas de la dinámica de fluidos para cada capa bajo las suposiciones ya mencionadas cuando la superficie del cuerpo de agua empieza a oscilar debido a la acción del viento, causando desplazamientos verticales de las interfaces. Una vez cesa el efecto del viento, las partículas desplazadas oscilan alrededor de un punto de equilibrio por efecto de fuerzas restauradoras como son la gravedad y la boyancia.

También se asume que los desplazamientos verticales de las interfaces son lo suficientemente pequeños para despreciar los términos no lineales que aparecen en las ecuaciones.

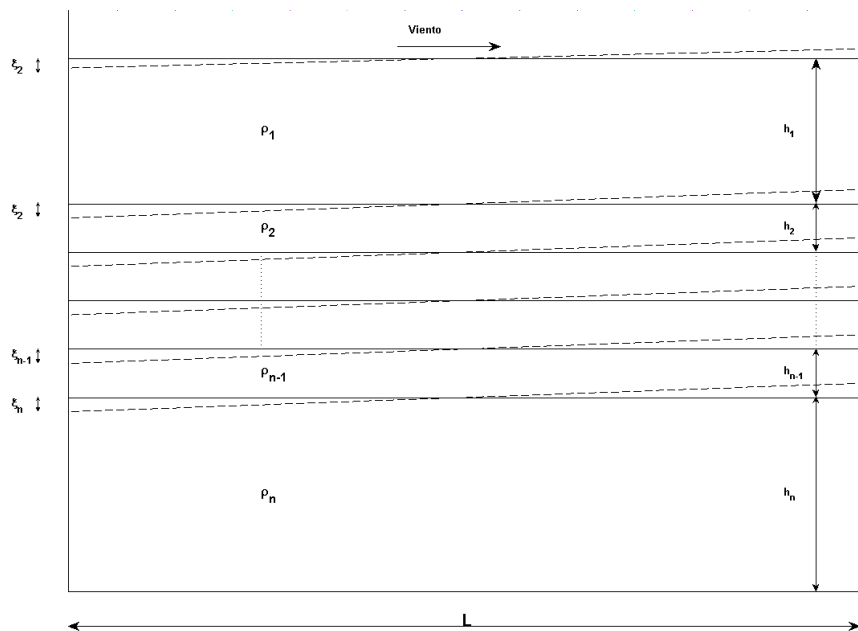


Figura 1. Esquema del modelo multicapas en un hipotético lago rectangular.

El sistema obtenido al integrar las ecuaciones básicas de la hidrodinámica, es un sistema acoplado, de tal manera que el movimiento de una interfase afecta el movimiento de las otras, lo que hace que este sistema sea difícil de resolver. Para desacoplarlas se debe encontrar un conjunto de coeficientes que combinen linealmente las velocidades.

#### CASO DE APLICACIÓN: EMBALSE PORCE II.

El embalse Porce II se encuentra localizado al noreste del departamento de Antioquia ( $6^{\circ}48'N$  y  $75^{\circ}38'W$ ) a aproximadamente 120 km de la ciudad de Medellín. Es un lago artificial polimítico (Empresas Públicas de Medellín 2007) ubicado a 924,5 msnm, posee un volumen total de 149,37 millones de  $m^3$ , que inundan un área de 890 hectáreas ( $8,9 \text{ km}^2$ ).

Su principal afluente es el río Porce, que en su recorrido es receptor de aguas residuales e industriales correspondientes al Área Metropolitana del Valle de Aburrá ocasionando el deterioro de la calidad de agua de este embalse. Otros afluentes son la quebrada Guaduas, que junto al río Porce, forman un brazo del embalse y la quebrada La Cancana que forma otro brazo del embalse. Estos brazos presentan un alto grado de colmatación debido a la constante entrada de sedimentos.

Debido a esto, la zona de estudio del embalse se toma desde la confluencia de estos dos brazos hasta la presa (Figura. 2).

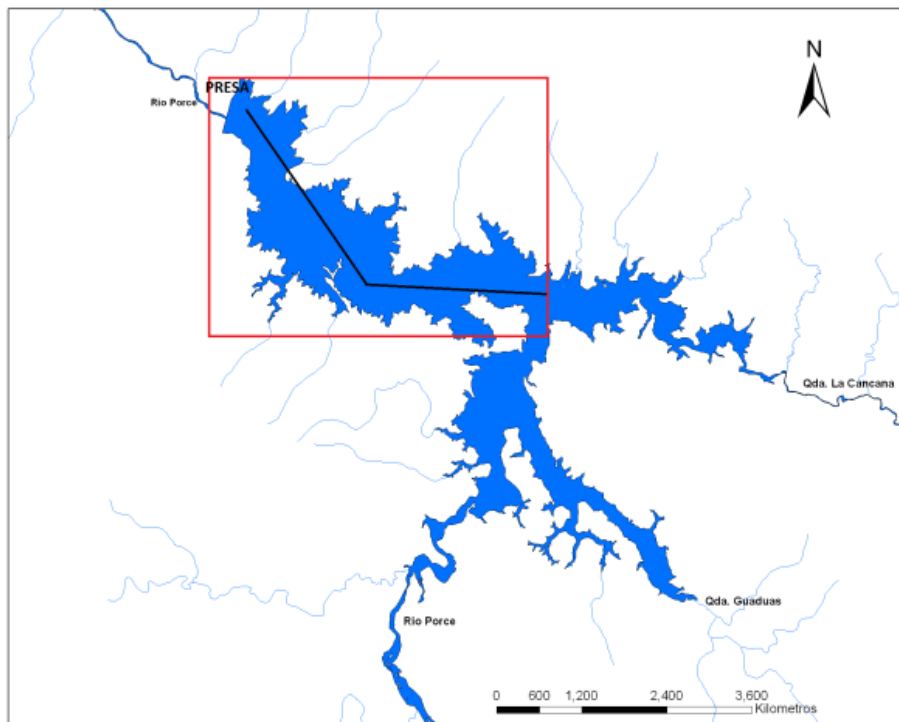


Figura 2. Forma y afluentes principales del embalse Porce II. El recuadro rojo muestra la zona de estudio

El embalse es encañonado, con condiciones climáticas clasificadas en la región subtropical y una precipitación anual promedio de 2000 mm. La temperatura media de la zona es de 24 °C y la velocidad superficial del viento promedio de 3 m/s. Otras características del embalse son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Características morfométricas del embalse Porce II

PARÁMETRO	VALOR
Profundidad Máxima	91.5 m
Longitud	9200 m
Ancho máximo	1250 m
Área embalse	8.9 km <sup>2</sup>
Profundidad promedio	23 m

## METODOLOGÍA.

Para obtener los modos libres de oscilación del embalse Porce II se siguen 4 etapas:

Se construye un modelo que permita calcular los periodos y las velocidades de propagación de los modos libres de oscilación para múltiples capas que pueda ser aplicado a cualquier lago alargado,

asumiendo que el lago tiene forma rectangular (Figura 1). Para la construcción de este modelo se utilizó el software MATLAB. Para la aplicación de este modelo se le debe ingresar la siguiente información:

- El número de capas con las cuales se quiere dividir la columna de agua.
- Profundidad promedio de cada capa.
- Longitud del eje principal del lago en la profundidad a la cual se encuentra la termoclina.
- Las temperaturas promedio de cada capa o la densidad promedio de cada una de ellas.

El código permite obtener los periodos, observar la forma del desplazamiento de las interfaces y la velocidad de propagación de la onda en cada capa para cada modo.

#### DATOS UTILIZADOS.

Los datos que se utilizaron en el modelo descrito anteriormente fueron suministrados por las Empresas Públicas de Medellín. Estos datos fueron perfiles de temperatura del embalse, profundidad y longitud del eje principal. La información está comprendida entre el 15 de diciembre de 2008 hasta el 30 de diciembre de 2008. Las temperaturas fueron medidas cada 30 minutos con una cadena de termistores, cada termistor estaba ubicado a 0.5m, 1.5m, 1.0m, 2.0m, 2.5m, 3.5m, 5.5m, 8.0m, 10.0m, 15.0m, 25.0m, 30.0m, 40.0m y 50.0m. Para el periodo donde se obtuvieron los datos de temperatura la velocidad promedio del viento fue de 2.750 m/s.

El espesor y la temperatura de las capas se obtienen del promedio de temperatura del periodo en el que se tomaron los datos (Figura 3).

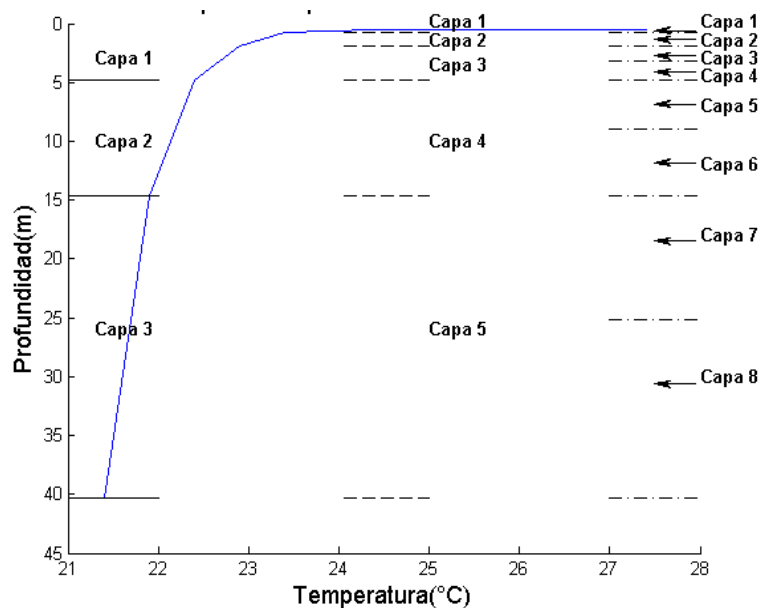


Figura 3. Perfil promedio de temperatura profundidad de cada capa y densidad promedio del embalse Porcel II entre el 15 de diciembre y el 30 de diciembre de 2008.

#### APLICACIÓN DEL MODELO MULTICAPAS.

En la aplicación del modelo multicapas se estudiaron tres casos: 3 capas, 5 capas y 8 capas, según se muestra en la Figura 3, con el propósito de observar las diferencias que se presentan en los modos de oscilación libres en los periodos y las velocidades de propagación entre los modelos que son ampliamente usados como es el de 3 capas y en un modelo multicapas que permite tomar el número de estas de acuerdo a la estructura de la estratificación.

Los grosores, el promedio de temperatura y de densidades de cada capa para cada caso se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Profundidad, temperatura y densidad promedio de cada capa para los casos estudiados

	CAPA	h(m)	T(°C)	ρ(kg/m³)
3 CAPAS	1	4.79	24.65	997.137
	2	9.79	22.15	997.739
	3	25.79	21.62	997.852
5 CAPAS	1	0.77	25.40	996.945
	2	1.10	23.15	997.506
	3	2.92	22.65	997.624
	4	9.79	22.15	997.739
	5	25.79	21.65	997.85
8 CAPAS	1	0.77	25.40	996.945
	2	1.10	23.15	997.506
	3	1.36	22.78	997.593
	4	1.55	22.53	997.651
	5	4.22	22.29	997.707
	6	5.57	22.04	997.764
	7	10.55	21.80	997.818
	8	15.24	21.60	997.863

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

El perfil de temperaturas promediado del embalse Porce II (Figura 3) corresponde a un típico perfil generado por difusión de temperatura, donde no se alcanza a formar una capa mezclada en la superficie con temperaturas iguales hasta una cierta profundidad, es decir el calor que entra en la superficie del embalse es transmitido hacia zonas más profundas del cuerpo de agua mediante difusión térmica. Como el perfil de temperatura no es un perfil típico, se estudia si los vientos que se presentaron en la época son suficientes para crear una capa mezclada de alguna profundidad que teóricamente pueda modificar el perfil de temperatura y encontrar una explicación para que esto no sucediera.

El promedio de vientos para el periodo donde se obtiene el perfil de la Figura 3 de temperaturas indican una velocidad de 2.75 m/s a 10 metros sobre la superficie del embalse. Con estos datos se hizo una estimación teórica acerca de la profundidad que alcanzaría la capa mezclada con esta velocidad de viento utilizando la ecuación 5

$$\frac{hN}{U_s} = 0.5 \tau (N\tau)^{\frac{1}{2}} \quad [5]$$

donde:

$h$  es la profundidad de la capa mezclada.

$N$ , es la frecuencia boyante.

$U_s$ , la velocidad de cizalladura (ecuación 6)

$\tau$ , periodo de duración del viento

$$U_s = \sqrt{\frac{C_d \rho_a u_{10}^2}{\rho_w}} \quad [6]$$



donde:

$C_d$ , coeficiente de arrastre del viento ( $1.3 \times 10^{-3}$ ).

$\rho_a$ , densidad del aire ( $1.2 \text{ kg/m}^3$ ).

$U_{10}$ , velocidad del viento medida a 10 m sobre el nivel de la superficie del agua.

Con un valor promedio estimado de la velocidad de cizalladura de 0.0038 m/s, se obtuvo un valor teórico de la profundidad de la capa mezclada de 2.20 m. Este resultado contrastado con el perfil promediado de temperaturas indica la posible existencia de una barrera física que impida la profundización de la capa mezclada debido a la energía cinética turbulenta generada por la velocidad de cizalladura  $U_z$ .

El embalse Porce II se caracteriza por una alta eutrofización que ha ocasionado que exista una fuerte presencia de macrófitas y algas en la parte superficial del embalse. Esta vegetación es una barrera física muy muy severa que bloquea la penetración directa de la radiación solar en los metros superiores del embalse, causando que gran parte del calor se concentre en la superficie y desde ahí comience un proceso de difusión del calor.

La vegetación existente que también forma una barrera para que la velocidad de cizalladura ocasionada por el viento pueda generar energía cinética turbulenta que penetre y mezcle el agua en capas inmediatamente más abajo de la superficie, la mayor cantidad de energía es disipada en la interacción entre la velocidad de cizalladura y la vegetación. La aplicación del modelo multicapas a los 3 casos (3, 5 y 8 capas), que se realizó con el perfil de temperatura promediado da como resultado diferentes periodos y velocidades de fase para cada caso.

Los modelos aplicados a perfiles de temperaturas donde el gradiente de temperatura varía fuertemente en una profundidad pequeña, tienen la ventaja que las capas son fácilmente discernibles. En embalses con este comportamiento es usual observar modelos de 2 y 3 capas para describir los modos naturales de oscilación, arrojando buenas aproximaciones.

Las celeridades y los periodos de los modos naturales de oscilación interna para cada aproximación presentaron diferencias, siendo los valores que menos variaron entre sí los de las aproximaciones de 5 y 8 capas (Tabla 3)

Tabla 3. Velocidades y periodos de las ondas internas para cada modelo de capas

	Periodo [h]	Velocidad [m/s]	MODOS
Caso 3 capas	0.27	19.90	Barotropico
	31.36	0.19	Baroclinico 1
	63.41	0.08	Baroclinico 2
Caso 5 capas	0.27	19.90	Barotropico
	46.41	0.11	Baroclinico 1
	72.97	0.07	Baroclinico 2
	107.30	0.05	Baroclinico 3
	191.76	0.03	Baroclinico 4
Caso 8 capas	0.27	19.90	Barotropico
	48.30	0.11	vertical1
	75.83	0.07	Baroclinico 2
	103.66	0.05	Baroclinico 3
	132.04	0.04	Baroclinico 4
	170.32	0.03	Baroclinico 5

	231.53	0.02	Baroclinico 6
	321.05	0.02	Baroclinico 7

Por ejemplo, los modos 1, 2 y 3 presentan valores de periodos y celeridades muy aproximadas entre sí, mientras que las predicciones del modelo de 3 capas son bastante diferentes. El modo 4 si presentó una gran variación entre las aproximaciones de 5 y 8 capas, posiblemente debido a la mejor aproximación de la estratificación en lo que correspondería al hipolimnio.

## CONCLUSIONES

El tipo de estratificación típico de un lago o embalse normalmente muestra una tendencia a formar una capa mezclada en los primeros metros desde la superficie del agua debido a la energía cinética turbulenta introducida por el viento. Sin embargo, existen lagos y embalses que no presentan este comportamiento, ya sea porque el viento es muy débil o casi inexistente o por otros factores que limitan la mezcla en la superficie del agua.

El promedio de la velocidad de viento sobre la superficie del embalse Porce II durante el periodo 10 de diciembre de 2008 y el 30 de diciembre del mismo año fue de 2.75 m/s, suficiente para crear una capa mezclada en la superficie de aproximadamente 2.5 m de espesor que modifique el perfil de temperatura de la columna de agua. Sin embargo, esta capa no se formó debido probablemente a la presencia abundante de algas y macrofitas en la superficie del embalse. Esta vegetación es una barrera física muy fuerte que inhibe la transmisión del esfuerzo cortante hacia el interior de la masa de agua. Además, esta vegetación hace que gran parte del calor proveniente de la radiación solar se concentre en la superficie y no se transfiera rápidamente a las capas más internas.

Las descripciones de los modos internos de oscilación mediante 3, 5 u 8 capas presentan diferencias importantes, en especial en la aproximación de 3 capas, esta variación indica que modelo no es suficiente para realizar una buena descripción de la estructura de los modos naturales de oscilación en el embalse Porce II y, posiblemente, en embalses tropicales u otros sistemas con un metalimnio amplio. Estas diferencias se reducen cuando se aumenta el número de capas. Sin embargo, se recomienda estudios posteriores para observar si los modos generados al aumentar el número de capas son de importancia real.

## REFERENCIAS

- Antenucci, J., Imberger, J. (2003). "The Seasonal Evolution of Wind/Internal Wave Resonance in Lake Kinneret". *Limnology and Oceanography*.
- Fricker, P.D. y Nepf, H. (2000). "Bathymetry, stratification, and internal seiche structure". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 105, No C6.
- Heaps, R. y Ramsbottom, A. (1966). "Wind Effects on the Water in a Narrow Two-Layered Lake". *Phil. Trans. R. Soc. London, ser A* 259, 391-430.
- Imboden, D., y Wüest, A. (1995). "Mixing Mechanisms in Lakes". *Physics and Chemistry of Lakes*. Ed. Lerman et al. Springer-Verlag. pp. 85-135
- LeBlond, P. y Mysak, L. (1978). "Waves in the Ocean". *Elsevier Oceanography Series*.
- Lemmin, U. (1987). "The Structure and Dynamics of Internal Waves in Baldeggersee". *Limnology and Oceanography*. Vol. 32 (1987), No. 5.
- Lorke, A. y Wüest A. (2005). "Turbulence and Mixing Regimes Specific to Lakes". *Marine Turbulence: Theories, Observations and models*. Cambridge University Press.

- Monismith, S. (1985). "Wind-Forced Motions in Stratified Lakes and their Effect on Mixed-Layer Shear". *Limnology and Oceanography*, vol. 30, No. 4.
- Mortimer, C. (1974). "Lake Hydrodynamics". *Internat. Verain. Limnol.* 1974
- Münnich, M. (1996). "The influence of bottom topography on internal seiches in stratified media". *Dynamics of atmospheres and oceans*. vol. 23 (1996).
- Münnich, M. (1993). "On the Influence of Bottom Topography on the Vertical Structure of Internal Seiches". Tesis doctoral. Swiss Federal Institute of Technology.
- Ostrovsky, I., Yacobi, Y., Walline, P., Kalikhman, I. (1996). "Seiche-Induced Mixing: Its Impact on Lake Productivity". *Limnology and Oceanography*. Vol. 41 (1996), No. 2.
- Pérez-Losada, J., Roget, E., Casamitjana, X. (2003). "Evidence of High Vertical Wave-Number Behavior in a Continuously Stratified Reservoir: Boadella, Spain". *Notas técnicas*. 2003
- Rajasekara, M. (2002). "Physical limnology of lakes and reservoirs". Symposium on conservation, restoration and management of aquatic ecosystems.
- Saggio, A. y Imberger, J. (1998). "Internal Wave Weather in a Stratified Lake". *Limnology and Oceanography*, Vol. 43 (1998), No. 8.
- Schwab, D. (1977). "Internal Free Oscillations in Lake Ontario". *Limnology and Oceanography*. Vol. 22 (1977), No. 4.
- Wang, Y. et al. (2000). "Wind-Induced Baroclinic Response of Lake Constance". *Annual Geophysicae*. Vol. 18.