

EFFECTOS DE LOS VÓRTICES EN SISTEMAS ACUÁTICOS Y SU RELACIÓN CON LA QUÍMICA, BIOLOGÍA Y GEOLOGÍA

RAÚL CANDELARIO CRUZ GÓMEZ, MARÍA ADELA MONREAL GÓMEZ
y SERGEY NICOLAEVICH BULGAKOV

RESUMEN

Se discute la importancia de los vórtices en el transporte de energía interna (calor), sales, nutrientes y sedimentos en los ecosistemas marinos y continentales. Se presentan los efectos de afloramientos de la termoclina y nutriclina ocasionados por la formación de remolinos ciclónicos, los cuales se resumen en un incremento de nutrientes hacia la zona eufótica, lo que conlleva al aumento en producción biológica. También se discuten los

efectos de los remolinos anticiclónicos en el transporte de clorofillas y sedimentos a grandes distancias comparadas con sus diámetros. El corolario principal es la necesidad de un trabajo conjunto de las diferentes disciplinas, para un completo entendimiento de los fenómenos que coadyuve a predecir y obtener una razonable explotación de los recursos marinos.

En la Tierra, los fluidos tienden a moverse en un patrón circular. En escala global esta tendencia a rotar es reforzada por la fuerza de Coriolis, como consecuencia de la rotación de la Tierra. El efecto de Coriolis se manifiesta en dirección opuesta en ambos hemisferios. En el hemisferio norte, la circulación general en la superficie del océano es en sentido de las manecillas del reloj, mientras que en el hemisferio sur ocurre en sentido contrario, trayendo consigo importantes consecuencias para el ecosistema.

Los vórtices en el océano son de diferentes escalas; algunos son tan pequeños que son dominados por la viscosidad, mientras que otros son tan grandes que “sienten” la curvatura y rotación de la Tierra. Sin embargo, cada uno tiene su propia naturaleza dinámica. El tamaño de los vórtices depende del intercambio entre energía cinética y potencial, lo cual obedece a varios factores tales como latitud, estratificación,

topografía del fondo o a la naturaleza de su generación (Olson, 1991). Independientemente de su tamaño, de su mecanismo y lugar de formación, los vórtices juegan un papel muy importante en el transporte de energía interna (calor), de momento y de las propiedades bioquímicas del agua a lo largo de distancias mucho mayores a su diámetro, que va de algunas decenas a cientos de kilómetros, con un periodo de vida relativamente grande; de meses e incluso años.

Los vórtices en el océano tienen características físicas muy importantes y distintivas. Remolinos cálidos aparecen en la superficie como un domo con movimiento anticiclónico, en cambio un remolino frío se puede ver como una depresión o concavidad en la superficie libre, con movimiento ciclónico. En el hemisferio norte un remolino anticiclónico gira en sentido de las manecillas del reloj y presenta vorticidad negativa, mientras que un remolino ciclónico gira en sentido contrario de las maneci-

llas del reloj con vorticidad positiva (el movimiento es en el mismo sentido de rotación del eje de la Tierra). Contrariamente a lo que sucede en el norte, en el hemisferio sur el movimiento en los remolinos ciclónicos y anticiclónicos es en el mismo sentido y en el sentido contrario de las manecillas del reloj, respectivamente. En el océano los remolinos no solamente se presentan en la superficie; pueden ser sub-superficiales y encontrarse en cualquier profundidad, incluso bajo la termoclina (Wang y Dewar, 2003; Salas de León *et al.*, 2004; Fratantoni y Richardson, 2006).

En cuanto a los giros o remolinos existe una analogía con la atmósfera. Los remolinos en el océano son los responsables del clima interno del mar, ya que atrapan, transportan y dispersan masas de agua con diferente temperatura y salinidad a otros lugares del sistema marino, además de mantener la energía en grandes áreas por largos periodos (Garcon *et al.*, 2001).

PALABRAS CLAVE / Anticiclónico / Ciclónico / Giro / Remolino /

Recibido: 29/05/2007. Modificado: 28/08/2008. Aceptado: 01/09/2008.

Raúl Candelario Cruz Gómez. Maestro y estudiante de Doctorado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Profesor Universidad de Guadalajara (U de G), México. Dirección: Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Circuito exterior S/N, Ciudad Universitaria, México, D.F, C.P. 04510. e-mail: rcruz@ola.icmyl.unam.mx.

María Adela Monreal Gómez. Doctora en Oceanología, Universidad de Lieja, Bélgica. Investigadora, UNAM, México. e-mail: monreal@mar.icmyl.unam.mx

Sergey Nikolaevich Bulgakov. Doctor en Oceanografía Física, Instituto Hidrofísico Marino, Ucrania. Profesor-Investigador, U de G, México. e-mail: sbulgako@cencar.udg.mx.

Como un ejemplo de la gran importancia de los remolinos en aguas oceánicas profundas cabe mencionar que son el medio para distribuir la biota "exótica" de las plumas hidrotermales a una gran parte del océano abisal (Garcon *et al.*, 2001). A escalas más pequeñas, dentro de las regiones costeras los remolinos pueden ser importantes mecanismos dispersores de contaminantes y nutrientes (Rhines, 2001). Sea cual sea el sentido de rotación de los remolinos, estos juegan un papel importante en la productividad biológica. Algunos son tan profundos que alcanzan a remover parte de la columna de agua y acarrear nutrientes desde grandes profundidades, fertilizando las aguas sub-superficiales y superficiales, y provocando importantes florecimientos de fitoplancton en mar abierto, lo que atrae al zooplancton y a otros peces que forman parte de la cadena alimenticia (Lee y Williams, 2000). Otros remolinos son menos profundos y solo alcanzan a fertilizar las capas superficiales, ocasionando un aumento en la producción primaria en la zona eufótica, la cual es definida como la capa hasta donde se puede detectar el 1% de la luz que llega a la superficie del océano (McDonald, 1999).

Al igual que en el océano, en cuerpos de agua continentales o lacustres es posible observar remolinos de muy diferentes escalas y en este caso dependen considerablemente de las dimensiones de la cuenca. La geometría y la batimetría del lago, conjuntamente con el esfuerzo del viento y la descarga de los ríos, repercuten en la estabilidad del cuerpo de agua formando remolinos con diferentes tamaños y sentidos de rotación. Margalef (1994) señaló que, en los lagos, los mecanismos de generación de remolinos son más limitados que en el océano, que los remolinos son capaces de mezclar toda la columna de agua y que su periodo de vida es más corto, desde unas cuantas horas hasta algunos días.

En el océano y en lagos la productividad primaria está limitada por la cantidad de nutrientes en la capa eufótica. Los nutrientes son suministrados desde la capa sub-superficial y profunda mediante un bombeo en el que contribuyen los remolinos (Salas de León y Monreal-Gómez, 2005).

El primer paso para entender el papel que juegan los remolinos en los procesos biogeoquímicos, tanto en el océano como en sistemas lacustres, es cuantificar su variabilidad espacial y temporal. La vida de los remolinos ciclónicos en el océano es relativamente más corta que la de los anticiclónicos (Cushman-Roisin, 1994; McDonald, 1999; Merino y Monreal, 2004), por lo que es de esperarse que las comunidades sean remplazadas a medida que este remolino frío se desintegre.

Existen muy variadas formas de generación de vórtices, entre las que se encuentran la interacción de una corriente

con la costa, la inestabilidad de una corriente bien definida, el hundimiento de grandes masas de agua, la formación de columnas de Taylor sobre un monte submarino o debido a la acción del viento sobre la superficie libre. Frecuentemente, cuando se habla de fluidos geofísicos con movimientos en forma de vórtices, se utilizan indistintamente los términos giro (gyre), anillo (ring) o remolino (eddy). Sin embargo, de acuerdo a Fuglister (1972) y Olson (1986) el término anillo se utiliza para describir vórtices que se desprenden de una corriente y refieren como remolino a cualquier otro vórtice que no sea desprendido de una corriente. Ambos fenómenos tienen prácticamente el mismo significado físico; sin embargo, cada uno tiene su propia dinámica de formación y de productividad. Recientemente se ha precisado el término anillo en torno a la primera etapa de los vórtices que se desprenden de una corriente, en cuyo caso el núcleo central del vórtice presenta muy baja vorticidad relativa; sin embargo, una vez que el núcleo central gana velocidad angular a través de la difusión radial del anillo, se le denomina remolino.

Por otro lado, el término giro se utiliza principalmente al describir las grandes corrientes superficiales que se producen por el sistema de vientos globales, corrientes que están delimitadas por los continentes. En los océanos Pacífico, Atlántico e Índico se observan giros de gran escala, conocidos como giros subtropicales, que se extienden desde 10 a 40° de latitud; a mayores latitudes (~50°) en el Pacífico y el Atlántico se encuentran giros de menor tamaño. La dirección de rotación de los giros esta determinada por los vientos que prevalecen en la región. Los giros subtropicales rotan en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte e inversamente en el hemisferio sur.

Mecanismos de formación de vórtices en cuencas

Formación de vórtices en el océano

Tradicionalmente el proceso de formación de anillos en el océano ha sido relacionado con inestabilidades de frentes y corrientes. Estas inestabilidades producen meandros, es decir, el fluido se comporta como un río sinuoso en mar abierto. Al intensificarse los meandros forman un lazo, el cual posteriormente se cierra y se generan los anillos cuyo núcleo central no presenta vorticidad relativa o es muy baja; cuando el núcleo central gana velocidad angular a través de la difusión radial, se traslada en forma de remolino.

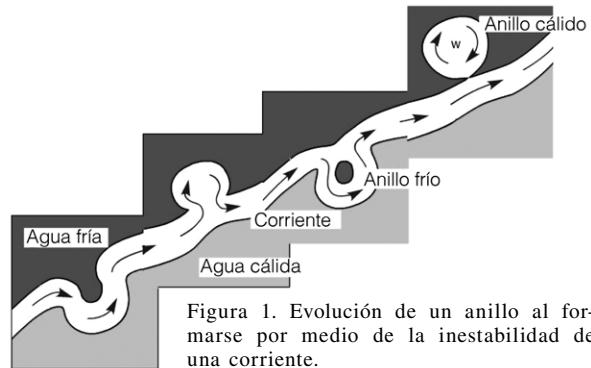


Figura 1. Evolución de un anillo al formarse por medio de la inestabilidad de una corriente.

El sentido de la corriente puede ser ciclónica o anticyclónica y forma núcleos con circulación independiente que contienen agua de características diferentes a cada lado de la posición media de la corriente (Olson, 1991). En la Figura 1 se muestra este mecanismo y la secuencia de formación de un anillo, el cual se transforma en remolino al incrementar la velocidad angular. Como ejemplos se puede mencionar a la Corriente del Golfo y la Corriente de Kuroshio.

El mecanismo anterior expresa la formación de anillos debido a la inestabilidad de una corriente. Sin embargo, existe otro mecanismo de formación de estos vórtices, que consiste en una mezcla de dos factores: la inestabilidad y el esfuerzo del viento, o bien flujos de flotabilidad (Bulgakov *et al.*, 1996; Bulgakov y Meulenert, 2003). El esfuerzo del viento sobre la superficie del océano puede incrementar la frecuencia de desprendimiento de anillos o puede producir inestabilidades de las corrientes en corto tiempo, generando meandros que se estrangulan y forman el vórtice. Como ejemplos de este mecanismo se tiene a la Corriente Norte de Brasil y la Corriente de Agulhas. En estos casos se presenta un retroceso de la corriente, por lo que a los anillos que se forman se les denomina anillos de retroflexión. Estudios sobre este mecanismo muestran que los anillos o remolinos que se forman no siempre se encuentran sobre la superficie del océano; en algunos casos se desprenden y se mueven bajo la superficie, incluso bajo la termoclinia, manteniendo su coherencia por largo tiempo (Wang y Dewar, 2003; Fratantoni y Richardson, 2006).

Resultados de estudios experimentales, de modelación numérica y de observaciones satelitales han puesto en evidencia la influencia de la topografía del fondo sobre la inestabilidad de la corriente que genera el desprendimiento de los anillos (Jochum y Malanotte-Rizzoli, 2003; Cruz y Bulgakov, 2007). Independientemente de lo inestable que sea la corriente de la que se desprenden los anillos, la estructura vertical y horizontal es similar en la mayoría de los casos; por ejemplo, el radio característico en la

superficie es de 75-150km y en algunos casos su dinámica vertical alcanza hasta los 4000m (Fratantoni y Richardson, 2006). En la mayoría de los casos estos tienen un radio en donde la velocidad azimutal alcanza un máximo de $100\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, al interior de la circunferencia con ese radio el anillo se comporta como un cuerpo sólido en rotación ó coherente, fuera de ella su velocidad decae con el inverso del radio (Olson, 1991; Carton, 2001).

Otro mecanismo de formación de remolinos se debe a la intensificación de la corriente de frontera oeste, causada por la variación del parámetro de Coriolis. En este caso es frecuente observar remolinos como resultado de la diferencia de velocidad o del gradiente de la rapidez de la corriente debido a la fricción con la costa. Si esta corriente fluye a lo largo de la costa, al encontrar una punta o península se separa de ella para entrar nuevamente al océano interior, donde la corriente se incrementa y como resultado final se forma un remolino ciclónico (Figura 2). Este mecanismo de formación de remolinos fue observado en las costas del este de Australia (Olson, 1991) y en la costa este de Yucatán, cerca de Cabo Catoche (Cochrane, 1968).

Estudios recientes han mostrado que no solo los remolinos generados por retroflexión pueden existir bajo la superficie. Es posible imaginar el siguiente escenario: un cañón que presenta un talud continental con una pendiente muy abrupta y sobre él fluyen diferentes masas de agua mostrando estratificación vertical, de modo que la masa de agua de mayor densidad se encuentre en la parte interior; entonces la más densa caerá al cañón y se formará una corriente de agua densa fluendo hacia abajo debido a la gravedad, por lo que esta corriente se deflectará por la acción de la fuerza de Coriolis y se formará un remolino anticiclónico (Afanashev y Filipov, 1996). Como ejemplo de remolinos formados mediante este mecanismo se encuentran los *meddies* (*Mediterranean water eddies*), en la salida de agua densa a través del Golfo de Cádiz (Isern-Fontanet *et al.*, 2004).

La formación de remolinos también puede ocurrir por hundimiento de masas de agua superficiales, las cuales se hacen más densas debido al enfriamiento del agua superficial por el paso de masas de aire frío, o al aumento de la salinidad superficial debido a la evaporación. Cuando estas masas ocupan gran extensión, de tal manera que puedan "sentir" la fuerza de Coriolis, entonces por conservación de momento angular se formarán remolinos ciclónicos o anticiclónicos debido a la estructura termohalina (Hopfinger y van Heijst, 1993).

Por otro lado, un esfuerzo de viento intenso sobre la superficie del océa-

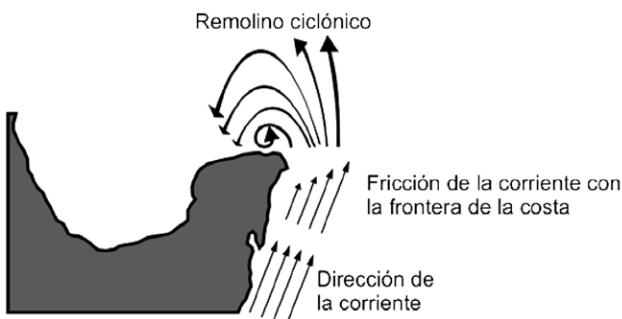


Figura 2. Diagrama en donde se ilustra la formación de un remolino ciclónico por medio de una punta.

no puede generar remolinos en forma de dipolo (anticiclón-ciclón), como sucede en el golfo de Tehuantepec, donde el campo de viento del norte presenta gradientes importantes hacia ambos lados del eje principal del viento, dando origen a esas estructuras (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998). En este caso es posible observar nuevamente que el remolino anticiclónico tiene una vida más larga que el ciclónico.

Existe otro tipo de vórtices, conocidos como remolinos topográficos debido a que en su formación la topografía juega un papel importante, como por ejemplo los que se observan al sur de Japón, donde la formación y desaparición periódica de remolinos sobre la plataforma se debe al efecto combinado de la topografía irregular de la margen continental y del desplazamiento perpendicular a la costa del eje de la corriente de Kuroshio (Awaji *et al.*, 1991).

Otros rasgos topográficos que influyen en la formación de remolinos son los montes submarinos, los cuales además de deflectar corrientes de gran escala, influyen en la formación de ondas atrapadas, reflexión, amplificación o distorsión de ondas internas y amplificación de mareas internas, y formación de remolinos. Sobre los montes submarinos se observan remolinos estacionales los cuales pueden formar sistemas de circulación denominados columnas de Taylor. La permanencia de los remolinos se debe a la interacción del flujo con la topografía y la forma depende de la estratificación de la columna de agua, que en ciertos casos genera una intensificación de los remolinos en el fondo (Owens y Hogg, 1980; Roden, 1991).

Existen remolinos topográficos más pequeños que se originan cerca de la costa debido a la batimetría irregular y a la fricción costera, con diámetro menor a 10km, poco profundos, no atraviesan la capa de mezcla y desde el punto de vista bioquímico son poco productivos; sin embargo, son muy efectivos en el transporte y distribución de nutrientes y contaminantes.

Observaciones satelitales muestran que la colisión de intensas corrientes con islas genera remolinos ciclónicos y anticiclónicos de forma

alternada y periódica del lado contrario a la colisión. A este fenómeno que se puede observar a cualquier escala de fluido se le llama trayectoria de vórtices de von Karman (Kundu, 1990).

Generalmente la desaparición de los anillos y remolinos se debe a la interacción con la costa, la topografía de fondo o por disipación y dispersión.

Formación de vórtices en lagos

El movimiento de agua en los lagos se debe principalmente al esfuerzo del viento y a la descarga por ríos cuando estos existen, los ríos pueden actuar como una fuerza impulsora manteniendo y amplificando la circulación de la cuenca. El viento es el factor más importante en la dinámica de lagos, debido a que es la principal fuente de energía mecánica. Por ello, el arrastre de nutrientes, de fitoplancton y de sedimentos dependerá de la orientación de la cuenca respecto a los vientos dominantes (Lerman, 1978).

La duración e intensidad del viento influyen en la generación de ondas, las cuales son responsables de la erosión y transporte de partículas en la base del lago. El esfuerzo cortante en la columna de agua debido a la fricción que ejerce el viento en la superficie y la fricción en el fondo del lago influye en la circulación, la cual es influenciada por el efecto de Coriolis en lagos muy grandes.

El viento sobre la superficie de un lago genera turbulencia en la capa de mezcla, turbulencia que rápidamente transfiere momento al agua, hasta el epilimnion. Si el esfuerzo de viento se mantiene constante durante un determinado tiempo, el agua se mueve como un todo manifestándose un seiche. Lo anterior provoca una circulación bipolar, i.e. remolinos con ambos sentidos de circulación en el cuerpo de agua, lo que depende directamente de la morfología y batimetría de la cuenca (Figura 3). Este tipo de formación de giros es muy frecuente en lagos de origen volcánico (Serrano *et al.*, 2002). Los vientos generan remolinos y seiches, los cuales juegan un papel muy importante en el transporte y mezcla; los remolinos transportan nutrientes y sedimentos principalmente en la dirección horizontal, y los seiches pueden contribuir a la mezcla vertical.

En lagos los giros, ya sea de origen topográfico o formados por la acción de la descarga de ríos, son poco energéticos; su velocidad azimutal alcanza apenas los $5\text{-}10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Cruz-Gómez, 2002; Serrano *et al.*, 2002), de tal manera que los remolinos topográficos ayudan a mantener la mezcla horizontal y la turbulencia es el principal agente en la mezcla vertical.

Algo sorprendivamente interesante es que, independientemente del mecanismo de formación de cada remolino, su es-

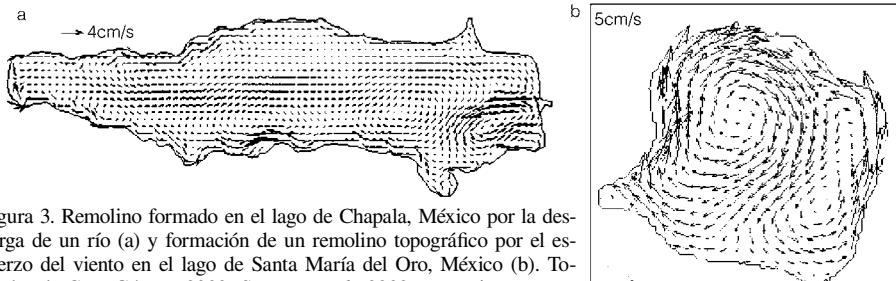


Figura 3. Remolino formado en el lago de Chapala, México por la descarga de un río (a) y formación de un remolino topográfico por el esfuerzo del viento en el lago de Santa María del Oro, México (b). Tomadas de Cruz-Gómez, 2002; Serrano *et al.*, 2002, respectivamente.

tructura vertical y horizontal es similar en todos los aspectos. Las razones por las cuales tienen características similares hasta el momento son poco claras.

Algunos Efectos de los Vórtices

Efecto de los vórtices en la biología y química de aguas oceánicas y continentales

En la capa superficial del océano la producción de fitoplancton depende de la disponibilidad de nutrientes a lo largo del año (Garcon *et al.*, 2001; McGillicuddy y Robinson, 1997). Sin embargo, la variabilidad estacional del fitoplancton está íntimamente relacionada con la estratificación, la mezcla y la irradianza dependiente de la latitud.

Lo anterior obliga a preguntar: ¿Entonces qué es lo que origina la explosión de fitoplancton la mayor parte del año en el océano y en los lagos? Al respecto se discutirá la dinámica interior de los vórtices, donde se observa que a pequeñas variaciones en la superficie del agua le corresponden pequeñas variaciones de presión en la columna de agua, y si además el fluido se encuentra estratificado, habrá variación vertical en la termoclinia y por consiguiente una elevación o un hundimiento de algunas decenas de metros, como se muestra en la Figura 4.

Aludiendo al mecanismo de formación de los remolinos, si su rotación es ciclónica estará caracterizado por una divergencia de masa y en la superficie se observará una concavidad. Cuando se forma un remolino ciclónico se observa un ascenso en la termoclinia que provoca una elevación de la capa subsuperficial en algunas decenas de metros; una característica de esta agua es que es rica en nutrientes y que al llegar a la zona eufótica favorecen la productividad biológica por fotosíntesis, debido a la mayor iluminación cerca de la superficie (Merino y Monreal, 2004). A este proceso generalmente se le denomina bombeo de remolino; sin embargo, la parte central de los remolinos ciclónicos es muy turbulenta como para permitir

el acceso continuo y eficiente del fitoplancton a los nutrientes (Salas de León y Monreal-Gómez, 2005). Por lo anterior, en los remolinos fríos la biomasa zooplánctonica es muy abundante, probablemente no en su centro sino en la periferia.

En aguas oligotróficas la formación de la columna de Taylor sobre los montes submarinos produce un levantamiento de las isotermas e isopienas dentro de la zona eufótica, lo cual puede enriquecer el agua de la capa superficial e incrementar la producción primaria. La variación anual de la columna de Taylor juega un papel importante en la abundancia de peces (Borovkov *et al.*, 2007). La productividad biológica en regiones con columnas o conos de Taylor es de aproximadamente un orden de magnitud mayor que en sus alrededores.

En el océano las comunidades de fitoplancton se distribuyen de tal forma que ocupan la periferia y el centro de un remolino ciclónico; frecuentemente el centro es dominado por dinoflagelados mientras que en su periferia, debido a los procesos de mezcla, los silicatos que entran pueden sostener una comunidad de diatomeas (Merino y Monreal, 2004). Por el contrario, un remolino o giro anticiclónico está caracterizado por una convergencia de masa y una elevación en la superficie parecida a un domo (Figura 4); estos presentan una mayor temperatura en su

centro que en su periferia. Generalmente, la capa superficial de un remolino anticiclónico es pobre en nitratos y clorofilas (Merino y Monreal, 2004). Por otro lado, los giros anticiclónicos tienden a atrapar material en su centro y a hundirlo, por lo que son zonas de baja productividad (Salas de León y Monreal-Gómez, 2005).

La composición biológica de los remolinos anticiclónicos y el mecanismo exacto por el cual intercambian producción primaria hasta el momento es poco claro. Se ha enfatizado que el intercambio y flujo de nutrientes entre remolinos y aguas poco productivas es local, se realiza por medio de difusión y transporte horizontal advectivo originado por los remolinos (McGillicuddy y Robinson, 1997). También se ha sugerido que el intercambio de nutrientes en muchos casos se lleva a cabo en donde la velocidad azimutal es máxima (Lee y Williams, 2000).

La transferencia vertical de nutrientes entre una capa y otra se realiza principalmente por dos factores físicos, difusión vertical y difusión horizontal de remolino. Estos son una medida de la intensidad de mezcla y proveen no solo una indicación de los flujos verticales y horizontales de los nutrientes, sino también de momento y de calor (Kalf, 2002).

Cuando un remolino o un anillo anticiclónico interactúa con aguas ricas en nutrientes, puede atraparlos y transportarlos grandes distancias (Hu *et al.*, 2004). En mar abierto los remolinos anticiclónicos ayudan a mantener la producción nueva dentro de la zona eufótica, por medio del transporte de nutrientes hacia la capa de mezcla. Por ejemplo, Olson (1991) observó un aumento de zooplancton en la periferia de un remolino cálido, en donde las comunidades zooplánctonicas variaron estacionalmente de acuerdo a la habilidad de sus poblaciones a sobrevivir a los cambios pos-formación. Además, los cambios en la profundidad de la isoterma preferida por algunas especies o en la distribución de alimento son factores importantes que modifican el comportamiento migratorio vertical del zooplancton cuando es atrapado por un remolino (Olson, 1991; McGillicuddy y Robinson, 1997). En ciertos casos, el zooplancton asociado al centro de un remolino muere conforme este decrece y evoluciona su termodinámica o condiciones bióticas, ya que no es posible tolerar estas condiciones; organismos más jóvenes desaparecen primero y algunos adultos permanecen más tiempo. Algunas de las poblaciones en el

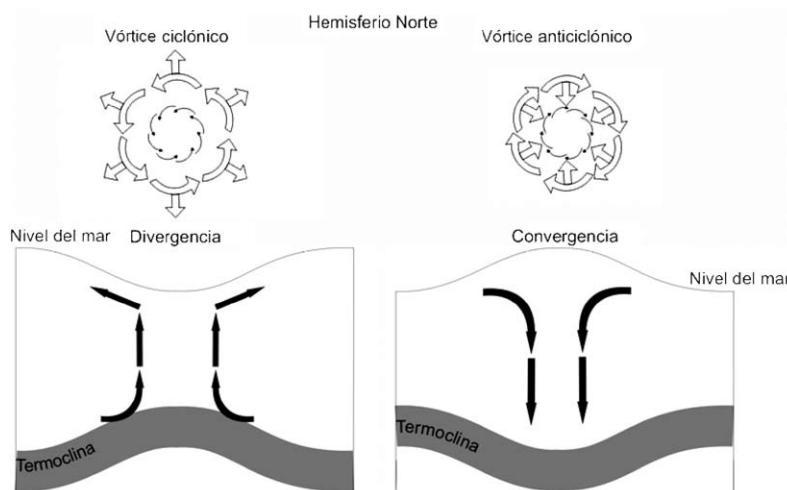


Figura 4. Divergencia y convergencia de masa en vórtices ciclónicos y anticiclónicos y afloramiento y hundimiento de la termoclinia. (Modificada de Brown *et al.*, 1989).

centro de un remolino encuentran condiciones poco óptimas para su supervivencia (Lee y Williams, 2000).

La pérdida de volumen durante la traslación de un remolino es significativa y primordial, ya que la interacción físico-biológica con sus alrededores controla la transferencia de energía, alterando marcadamente la biota local. Por ejemplo, se ha observado que las larvas de peces pueden ser rápidamente advectadas y redistribuidas al paso de un remolino anticiclónico (Cowen *et al.*, 2003). Otro ejemplo es la muerte de larvas de peces en un arrecife coralino al ser impactado por un giro anticiclónico, ya que éste lleva consigo un cambio en la temperatura y salinidad, modificando localmente el medio (Cowen *et al.*, 2003).

Por otro lado, en la mayoría de cuerpos de agua continentales profundos la disponibilidad de nutrientes limita la producción del fitoplancton durante la mayor parte del año (Margalef, 1994). Independientemente de su mecanismo de formación, los remolinos no son de mucha ayuda para producir un desplazamiento vertical de nutrientes. Las variaciones en la capa superficial, la distribución de nutrientes y sedimentos suspendidos son grandemente controlados por el desplazamiento vertical debido principalmente a la mezcla causada por la dinámica interna del lago que pueden ser las ondas internas y seiches. No obstante, los remolinos tienen importancia en el desplazamiento horizontal de agua y de sedimentos suspendidos, por lo que este mecanismo se trata en la siguiente sección.

Efecto de los vórtices en el desplazamiento de sedimentos suspendidos

Los sedimentos suspendidos se encuentran en grandes cantidades en la plataforma continental. La advección y transporte de agua con sedimentos suspendidos hacia el océano abierto es principalmente debido a los remolinos anticiclónicos, redistribuyendo aquellos en grandes distancias (Olson, 1991). Estos remolinos solo pueden transportar dichas partículas si se encuentran suspendidas o fueron ya resuspendidas por cualquier otro mecanismo.

En aguas continentales, debido a que la mayoría de los lagos tienen un tamaño relativamente pequeño, la dinámica presenta baja energía en comparación con el océano, por lo que la tasa de sedimentación es 10 veces mayor que en el océano (Lerman, 1978). Por otro lado, la formación y el comportamiento de los sedimentos lacustres son dominados por la interacción de un gran número de variables y procesos físicos cuya importancia relativa es influenciada particularmente por la forma de la base del lago, así como por el tamaño de la cuenca y las condiciones climáticas, por lo que se presentan muy diversas características sedimen-

tarias dependiendo de la cuenca (Lerman, 1978; Kalff, 2002). La dinámica de un lago estratificado varía de acuerdo a la profundidad, por lo que es posible suponer que el tamaño de las partículas de sedimento disminuye con la energía en función de la profundidad del sistema (Lerman, 1978).

Las investigaciones llevadas a cabo en medios lacustres y marinos han demostrado que en una profundidad comparativa los niveles de energía en los sistemas marinos son mucho mayores que en los lagos. Sin embargo, en lagos de gran tamaño, que tienen remolinos topográficos más estables, los sedimentos se alinean conforme a la estructura de dichos remolinos.

En el arrastre de sedimentos, ya sea suspendidos o depositados en el fondo, toma más importancia la dinámica generada por entradas de ríos, corrientes producidas por diferencias de densidad, ondas internas y por viento, que la provocada por los remolinos topográficos, ya que estos solo ayudan a la redistribución de las partículas que ya se encuentran suspendidas.

Comentarios finales

En este artículo se ha argumentado que los vórtices y los procesos físicos asociados a ellos pueden influenciar la distribución y abundancia de organismos en los ambientes marinos y continentales. En el océano estos vórtices tienen una energía cinética considerable y son muy importantes en el transporte de energía interna, momento, sal y propiedades químicas como oxígeno y nutrientes que afectan a la biota.

Los vórtices pueden ser formados por inestabilidades de corrientes, por la interacción aire-mar, por diferencias de densidad en diferentes masas de agua o por la separación de un flujo causado por un cambio abrupto en la topografía, entre otros. Estos vórtices, junto con las corrientes oceánicas, son responsables del transporte de masas de agua, nutrientes y sedimentos.

Se discutió que los remolinos generalmente se forman obteniendo energía de un flujo medio, que es un sistema de corrientes totalmente identificado. Sin embargo los remolinos también pueden interactuar con el campo del flujo medio inyectándole energía a éste y frecuentemente generando un patrón más complejo de remolinos.

Debido a la importancia y efecto que los remolinos tienen sobre la distribución y abundancia de zooplancton en general y sus implicaciones en el resto de la cadena trófica, se ha puesto un gran esfuerzo en detectar y caracterizar estos remolinos por medio de diferentes técnicas de estudio, entre las cuales destacan los métodos experimentales observacionales y numéricos.

Entender el comportamiento de los vórtices es vital para que sus

efectos puedan ser parametrizados. Por ejemplo, su variabilidad espacio-temporal es particularmente importante e influye en la rapidez de distribución de estructuras biológicas. Por lo tanto, las condiciones físicas juegan un papel crítico en esta fase del ciclo biológico.

Los remolinos de micro y mesoscala afectan la dinámica poblacional del fitoplancton y del zooplancton en el océano y los lagos. El bombeo por remolinos juega un papel importante en la inyección de nutrientes a la zona eufótica, incrementando la productividad primaria, al acarrear nutrientes a la superficie donde hay una adecuada irradianza solar para la fotosíntesis.

Los procesos sedimentarios en lagos y océanos son fuertemente influenciados por factores físicos. En un lago extenso orientado con los vientos dominantes, las ondas dominan la circulación del cuerpo de agua. En cuerpos de agua pequeños, por otra parte, dominan la influencia de descargas por ríos y la circulación general.

Con base en lo anterior es posible sugerir que los vórtices que se generan por inestabilidades de una corriente o por almacenamiento de energía potencial, como miembros de la enorme familia de movimientos turbulentos, forman parte del ciclo de vida de la transformación de la energía en sistemas marinos y continentales.

Aun no está del todo entendido cómo y por qué estructuras giratorias demasiado grandes formadas por el esfuerzo del viento en el océano tienen una estructura coherente durante largo tiempo. Entender sus mecanismos y períodos de formación, su estructura horizontal y vertical, y el impacto en la química y biología, es un reto para la oceanografía.

La pequeña y gran energía de estas masas giratorias en el océano y los lagos, y su gran capacidad de transporte de masa y de propiedades físicas, químicas y biológicas, motivan a crear y mejorar modelos teóricos y soluciones rápidas por computadora, así como desarrollar en el laboratorio modelos más realistas para poder entender con mejor exactitud estos fenómenos, ya que su cabal comprensión coadyuva a predecir y obtener una razonable explotación de los recursos marinos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, el apoyo otorgado (Proyecto No. 46472-F) y la beca doctoral al primer autor.

REFERENCIAS

- Afanasyev YD, Filipov IA (1996) Generation of intermediate water vortices in a rotating stratified fluid: Laboratory model. *J. Geophys. Res.* 101(C8): 18167-18174.

- Awaji T, Akitomo K, Imasato N (1991) Numerical study of shelf water motion driven by the Kuroshio: Barotropic model. *J. Phys. Oceanogr.* 21: 11-27.
- Borovkov VA, Vaskov AA, Karsakov AL (2007) The impact of water circulation on the year-class abundance dynamics of redfish and cod on the Flemish Cap. *J. Northwest Atlantic Fish. Sci.* 37: 127-134.
- Brown J, Colling A, Park D, Phillips J, Rothery D, Wright J (1989) Ocean Circulation. (G. Bearman, Editor). In *Open University Course Team*. G. Bearman (Ed.) Pergamon Press. Oxford, RU. 238 pp.
- Bulgakov SN, Meulenert PA (2003) Loop current dynamics in laboratory experiments. *Interciencia* 28: 316-322.
- Bulgakov SN, Korotaev GK, Whitehead JA (1996) The role of buoyancy fluxes in the formation of a large-scale circulation and stratification of sea water. Part 1: The theory. Part 2: Laboratory experiments. *Izvestiya Atm. Ocean. Phys.* 32: 506-520.
- Carton X (2001) Hydrodynamical modeling of oceanic vortices. *Surv. Geophys.* 22: 179-263.
- Cochrane JD (1968) *Currents and waters of the eastern Gulf of Mexico and western Caribbean, of the western tropical Atlantic Ocean, and of the eastern tropical Pacific ocean*. Dept. Oceanogr. Meteorol. Texas A&M Univ. Ref. 68-8T (Unpubl. rep.). pp. 19-28.
- Cowen RK, Sponaugle S, Paris CB, Fortuna JL, Lwiza KMM, Dorsey S (2003) Impact of North Brazil Current rings on local circulation and coral reef fish recruitment to Barbados, West Indies. *Elsevier Oceanogr Ser.* 68: 443-462.
- Cruz-Gómez RC (2002) *Estudio de la Circulación de la Brisa en el Lago de Chapala, Jalisco*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. 66 pp.
- Cruz-Gómez RC, Bulgakov SN (2007) Remote sensing observations of the coherent and non-coherent ring structures in the vicinity of Lesser Antilles. *Ann. Geophys.* 25: 1-10.
- Cushman-Roisin B (1994) *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ, EEUU. 320 pp.
- Fratantonio DM, Richardson PL (2006) The evolution and demise of North Brazil Current rings. *J. Phys. Oceanogr.* 36: 1241-1264.
- Fuglister FC (1972) Cyclonic rings formed by the Gulf Stream, 1965-66. En Gordon A (Ed.) *Studies of Physical Oceanography. A Tribute to Georg Wüst on his 80th Birthday* Vol. 1. pp. 137-168.
- Garcon VC, Oschlies A, Doney SC, McGillicuddy D, Wanek J (2001) The role of mesoscale variability on plankton dynamics in the North Atlantic. *Deep-Sea Res. II* 48: 2199-2226.
- Hopfinger EJ, van Heijst GJF (1993) Vortices in rotating fluids. *Ann. Rev. Mech.* 25: 241-289.
- Hu C, Montgomery ET, Schmitt RW, Müller-Karger FE (2004) The dispersal of the Amazon and Orinoco River water in the Tropical Atlantic and Caribbean Sea: Observation from space and S-PALACE floats. *Deep-Sea Res. II* 51: 1151-1171.
- Isern-Fontanet J, Font J, García-Ladona E, Emeilanov M, Millot C, Taupier-Letage C (2004) Spatial structure of anticyclonic eddies in the Algerian basin (Mediterranean Sea) analyzed using the Okubo-Weiss parameter. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 20: 772-778.
- Jochum M, Malanotte-Rizzoli P (2003) On the generation of North Brazil Current rings. *J. Mar. Res.* 61: 147-173.
- Kalff J (2002) *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Prentice Hall. Nueva Jersey, EEUU. 592 pp.
- Kundu PK (1990) *Fluid Mechanics*. Academic Press. San Diego California, EEUU. 730 pp.
- Lee M-M, Williams RG (2000) The role of eddies in the isopycnic transfer of nutrients and their impact on biological production. *J. Marine Res.* 58: 895-917.
- Lerman A (1978) *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. Springer. Nueva York, EEUU. 385 pp.
- Margalef R (1994) *Limnology Now. A Paradigm of Planetary Problems*. Elsevier. Amsterdam, Holland. 656 pp.
- McDonald NR (1999) The motion of geophysical vortices. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 357: 3427-3444.
- McGillivray DJ Jr, Robinson RA (1997) Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res. I*. 44: 1427-1450.
- Merino M, Monreal A (2004) Ocean currents and their impact on marine life: nutrient circulation and productivity of oceans. En Duarte CM (Ed.) *Marine Ecology. Encyclopedia of Life Support Systems*. EOLSS/UNESCO. Oxford, RU. <http://www.eolss.net>.
- Monreal-Gómez MA, Salas de León DA (1998) Dinámica y estructura termohalina. En Tapia-García M (Ed.) *El Golfo de Tehuantepec: El Ecosistema y sus Recursos*. Universidad Autónoma Metropolitana. México. pp. 13-26.
- Olson DB (1986) Lateral exchange within Gulf Stream warm core ring surface layers. *Deep-Sea Res.* 33: 1691-1704.
- Olson BD (1991) Rings in the ocean. *Ann. Rev. Earth Planet.* 19: 283-311.
- Owens WB, Hogg NG (1980) Oceanic observations of stratified Taylor columns near a bump. *Deep-Sea Res.* 27A: 1029-1045.
- Rhines PB (2001) *Mesoscale eddies*. University of Washington, School of Oceanography, Academic Press. Box 357940. Seattle, WA 98195 7940, EEUU. doi:10.1006/rwos.2001.0143.
- Roden GI (1991) Mesoscale flow and thermohaline structure around Fieberling seamount. *J. Geophys. Res.* 96(C): 16653-16672.
- Salas de León DA, Monreal-Gómez MA (2005) Procesos físicos que influyen en la productividad biológica de los mares mexicanos. *Ciencia, Oct-Dic:* 49-59.
- Salas de León DA, Monreal-Gómez MA, Signoret M, Aldeco J (2004) Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.* 109 (C05012), doi 10.1029/2002JC001614.
- Serrano D, Filonov A, Tereshchenko I (2002) Dynamics response to valley breeze circulation in Santa María del Oro, a volcanic lake in Mexico. *Geophys. Res. Letters*, 29: 1-4.
- Wang G, Dewar WK (2003) Meddy-seamount interactions: Implications for the Mediterranean salt tongue. *J. Phys. Ocean.* 33: 2446-2461.

EFFECTS OF VORTICES IN AQUATIC SYSTEMS AND ITS RELATION TO CHEMISTRY, BIOLOGY AND GEOLOGY

Raúl Candelario Cruz Gómez, María Adela Monreal Gómez and Sergey Nicolaievich Bulgakov

SUMMARY

The importance of vortices as one of the principal actors in transporting the internal energy (heat), salts, nutrients and sediments in marine and continental ecosystems is discussed. The thermocline and pycnocline uplift effects caused by the formation of cyclonic vortices, which bring about an increase in nutrients in the euphotic zone, are presented. Also, the effects of anticyclonic vortices in the transport of

chlorophyll and sediments over large distances compared to their diameters, are described. The end result is the need of joining efforts by different disciplines to achieve a complete understanding of the phenomena, which could help to predict and reasonably exploit marine resources.

EFEITOS DOS VÓRTICES EM SISTEMAS AQUÁTICOS E SUA RELAÇÃO COM A QUÍMICA, BIOLOGIA E GEOLOGIA

Raúl Candelario Cruz Gómez, María Adela Monreal Gómez e Sergey Nicolaievich Bulgakov

RESUMO

Neste ensaio fala-se da importância dinâmica dos remoinhos como um dos principais atores na transporte de energia interna (calor), sales, nutrientes e sedimentos nos ecossistemas marinhos e continentais. Apresentam-se também alguns de seus efeitos no oceano como as urgências causadas pela formação de remoinhos ciclônicos, que têm como consequência um incremento de nutrientes à zona eufótica.

Por outro lado, fala-se também sobre os efeitos dos remoinhos anticiclônicos na transporte de clorofila e sedimentos à grandes distâncias comparadas com os seus diâmetros. O corolário principal é a necessidade de um trabalho conjunto das diferentes disciplinas, para um completo entendimento dos fenômenos que ajude a prever e a obter uma razoável exploração dos recursos marinhos.