

Agentes de forzamiento y su relación con la oceanografía del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano

¹Salas-Monreal D, ²Salas-Pérez JJ, ¹Granados-Barba A, ¹Ortiz-Lozano LD.

¹Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Campus Veracruz, Universidad Veracruzana. Calle Hidalgo 617, Col. Río Jamapa, cp. 94290 Boca del Río, Veracruz, México

²Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Zona Poza Rica-Tuxpan, Universidad Veracruzana. Km. 7.5 Carretera Tuxpan-Tampico, Col. Universitaria, C.P. 92860, Tuxpan Veracruz, México.

*Email responsable: davsalas@uv.mx

RESUMEN

Las características oceanográficas de la zona costera veracruzana y su interacción con ambientes tan particulares como las desembocaduras de ríos y de arrecifes coralinos, ponen de manifiesto la alta heterogeneidad ambiental del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV). El PNSAV es un sistema arrecifal dominado por corrientes anisotrópicas que facilitan la conectividad biológica entre la porción norte, sur, la zona costera y el mar abierto de esta área marina, originando gran diversidad biológica. También, la presencia de zonas arrecifales genera ambientes particulares de baja energía propicios para la creación de puertos de abrigo. Con base en lo antes expuesto, el presente trabajo describe una recopilación de los agentes de forzamiento de los flujos marinos en la zona costera de Veracruz y su efecto en los procesos oceanográficos que fluctúan a diferentes escalas de espacio y tiempo. Mismos que son fundamentales para el adecuado conocimiento del transporte de partículas suspendidas y organismos plañtónicos.

Palabras clave: Hidrodinámica arrecifal, Dinámica costera, Sistemas Arrecifales, Golfo de México Occidental.

ABSTRACT

Oceanographic characteristics of the Veracruz coastal zone and its interaction with rivers, estuaries and coral reef environments, demonstrate the high environmental heterogeneity of the Veracruz Reef System National Park (PNSAV). The PNSAV is a system dominated by anisotropic reef currents which enhance the biological connectivity between the northern, southern, coastal zone

and the open sea of the marine area surrounding the PNSAV, causing great biological diversity. Also, the presence of particular reef areas generates low energy environments. Based on the above, this paper describes a collection of forcing agents of marine flows in the coastal area of Veracruz and its effect on oceanographic processes that fluctuate at different scales of space and time, which are essential for the proper understanding of the transport of suspended particles and planktonic organisms.

Keywords: Reef hydrodynamics, Coastal dynamics, Reef systems, Western Gulf of Mexico Systems.

INTRODUCCIÓN

En el litoral occidental del Golfo de México, se sitúa la zona costera Veracruzana (ZCV) cuya extensión es de 23,700 km² (SEMAR 2004). La ZCV, se caracteriza por ser somera (70 m en promedio) y angosta (de 6 a 45 km), con contornos de profundidad sinuosos sobre un fondo submarino con sedimentos de diferente origen (terrágenos, biogénicos o autógenos), que presenta bajos, islas y una serie de canales con dimensiones variables (Ortiz-Lozano et al. 2007) que, en general, ocasionan variabilidad en los parámetros oceanográficos.

Plataforma continental veracruzana

En la zona costera frente al puerto de Veracruz y el litoral de Boca del Río y Antón

Agentes de forzamiento en el PNSAV
Salas-Monreal D, Salas-Pérez JJ, Granados-Barba A, Ortiz-Lozano LD.

Lizardo, se encuentra el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), en el cual se desarrollan 28 arrecifes coralinos conocidos (DOF 2012). Es una zona importante para el mantenimiento de la biodiversidad ya que es el hábitat de especies de diferentes filos con importancia ecológica y comercial (Granados-Barba et al. 2007). Esta zona, es constantemente afectada por los sistemas costeros estuarinos adyacentes que son cuerpos de agua con una conexión abierta al mar y aportes de agua dulce (Pritchard 1967). La interacción entre la zona costera y los estuarios es mutua, ya que el flujo de calor, intercambio de masas de agua y las partículas en suspensión dentro de los estuarios, influyen la dinámica de ambas áreas marinas.

La importancia de estudiar la zona costera radica en que, a pesar de que solo cubre alrededor del 8% del área total de los océanos, en ella se pesca el 80% de las capturas mundiales y se extrae gran parte del petróleo (30%), además de que en ella reside más del 40% de la población mundial (Gallup 1999; Rodríguez et al. 2007). La información que se tiene en la zona costera Veracruzana corresponde a menos del 50% de la información existente para el Golfo de México, por lo que requiere ser investigada desde enfoques oceanográficos interdisciplinarios.

Entre los estudios oceanográficos realizados en el PNSAV, se encuentran los del transporte de sedimentos o contaminantes debido a gradientes de presión (Morelock et al. 1983), la dispersión de larvas de coral (Harrison et al. 1983), las agregaciones de peces (Domeier y Colin 1997), las larvas de organismos en su etapa planctónica (Shulman y Ogden 1987) y la distribución del sedimento debido a procesos advectivos (Salas-de-León et al. 2008), fenómenos relacionados con la variabilidad de parámetros ambientales como: salinidad, temperatura, densidad del agua, velocidades de

la corriente y del viento que están en una fase de desarrollo dentro de esta área de estudio (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008; Salas-Pérez et al. 2008; Salas-Monreal et al. 2009; Salas-Pérez et al. 2012). Por lo tanto, es importante estudiar de una manera integral la dinámica de los procesos oceanográficos que ocurren en la ZCV, con la finalidad de entender las variaciones espacio-temporales de los parámetros hidrográficos y su repercusión en la dispersión de partículas suspendidas que son vertidas a esa zona a través de las descargas de los numerosos ríos presentes en la zona costera Veracruzana; además de determinar las zonas de agregación de organismos que permiten pesquerías artesanales importantes en la economía de la población del estado de Veracruz; o las regiones de hipoxia que pudieran presentarse en el área de estudio.

La ZCV cuenta con una gran biodiversidad y es uno de los lugares que ha tenido un gran desarrollo debido a que colinda con la zona terrestre, puertos y zonas urbanas, así como sus actividades turísticas (Sachs 2001, Ortiz-Lozano et al. 2007); sin embargo, son pocos los estudios oceanográficos que han permitido caracterizar regionalmente estos sistemas costeros. Otra de las áreas de gran importancia en la zona costera son los arrecifes de coral que, aunque sólo cubren el 1% de la superficie de los océanos son lugares con gran biodiversidad, donde se encuentran representados un porcentaje considerable de los filos marinos (Salas-Monreal et al. 2009). Así mismo en las zonas arrecifales se realizan pesquerías multiespecíficas (Vargas-Hernández et al. 2002, Jiménez-Badillo y Castro-Gaspar 2007).

Los arrecifes de coral también, protegen la costa actuando como una barrera que rectifica la corriente y atenúa la energía de la marea (Gourlay 1996; Lugo-Fernández et al. 1998; Wolanski y Spagnol 2000; Salas-Pérez et al. 2008). Estos efectos batimétricos a su vez

Agentes de forzamiento en el PNSAV

Salas-Monreal D, Salas-Pérez JJ, Granados-Barba A, Ortiz-Lozano LD.

generan giros (Storlazzi et al. 2006; Legrand et al. 2006; Salas-Monreal et al. 2009), que producen regiones turbulentas ya que los giros generan surgencias o hundimientos de agua, que pueden reducir la transparencia de agua y con ello restringir la profundidad a la que los corales se desarrollan adecuadamente (Hayward 1982).

Agentes de forzamiento en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano

Los agentes de forzamiento hidrográficos son todas aquellas fuerzas que pueden cambiar el estado actual del sistema. Estos agentes pueden modificar tanto la dirección como la velocidad del agua. Uno de los principales agentes de forzamiento de la variabilidad submareal sobre la zona costera es el esfuerzo del viento (Salas-Monreal 2002). En el Golfo de México, en especial en la zona sur, los vientos provenientes del este pueden producir acumulación de agua, como ocurre en toda la costa este de Norte América (Salas-Monreal y Valle-Levinson 2008). El acumulación del agua contra la costa por efecto del viento y cambios termostéricos genera el incremento en el nivel del mar, lo que representa uno de los factores que impactan de forma directa al ser humano. De forma tradicional, este incremento se ha observado mediante análisis de series largas de tiempo usando la presión hidrostática (mareógrafos) y series de subducción de las placas tectónicas (Salas-de-León et al. 2008). Sin embargo, a escalas temporales menores, es posible ver la fluctuación de este fenómeno de forma anual (Salas-Monreal y Valle-Levinson 2009) y son estas fluctuaciones junto con las condiciones atmosféricas las que pudieran causar inundaciones en las ciudades costeras.

Por su parte, las desembocaduras de los ríos son lugares donde existe una gran

interacción entre las aguas de la zona costera y las aguas continentales. La importancia de los ríos para la zona costera radica en el gradiente de presión (cambios horizontales en la densidad) que se genera a lo largo y ancho de la costa, tomando como centro el eje principal del río. Dichos gradientes generan patrones de corrientes, los cuales determinan las trayectorias de las partículas en suspensión (Salas-de-León et al. 2008).

Los gradientes se ven modificados durante cada ciclo de la marea, particularmente durante las mareas vivas, al producirse mezcla vertical de la columna de agua, se reduce la estratificación vertical y la productividad primaria tiende a aumentar (Ducklow 1982). Por lo tanto, entender las modificaciones causadas por los flujos estratificados o los procesos de mezcla en la zona costera es de gran utilidad para comprender las áreas de concentración y dispersión de organismos planctónicos y partículas suspendidas en la columna de agua (Wolanski y Sarsenski 1997; Genin 2004; Gao y Wang 2008; Salas-Monreal et al. 2009; Salas-Pérez et al. 2012).

Se ha observado que la concentración de algunas especies de peces pelágicos aumenta cuando las partículas en suspensión se incrementan en la temporada de lluvias debido a que se incrementa la materia orgánica (Gao y Wang 2008). El estudio de la zona costera en el suroeste del Golfo de México es relevante para las pesquerías, ya que la mayoría de éstas, son de tipo artesanal y representan fuente de proteína e ingresos para las comunidades costeras (Quiroga-Brahams et al. 2002; Fuentes-Mata et al. 2002).

MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio es una integración de aspectos oceanográficos (físico-biológicos) en

los que se revisó y analizó la información científica existente acerca de la zona costera del PNSAV (Fig. 1), haciendo énfasis en las zonas de desembocadura de ríos y zonas de arrecifes coralinos por ser ecosistemas particulares de esta área de estudio. De igual manera, se describen las características hidrográficas, el patrón de corrientes y el régimen de vientos de mesoescala (10 a 100 km) en toda la plataforma continental Veracruzana. La información obtenida fue complementada con enfoques teóricos sobre la variabilidad que se puede generar por las condiciones meteorológicas y oceanográficas a escala local (menores a 10 km) y de mesoescala.

La información comprende diversas escalas espacio-temporales, contando con series de tiempo de más de cincuenta años, hasta series menores a un día y series espaciales que van de un par de metros hasta varios kilómetros. Dicha

gama de datos permite entender el PNSAV a diferentes escalas y proporcionar un diagnóstico de los estudios que se han realizado en esta área de estudio, lo que se puede inferir de forma teórica de ellos y lo que aún no se ha investigado para entender los diferentes procesos oceanográficos del PNSAV.

RESULTADOS

Principales agentes de forzamiento de la zona costera de Veracruz

La zona costera frente al puerto de Veracruz muestra una distribución de corrientes relacionada con el régimen de vientos que es variable a lo largo del año por la generación de diferentes procesos atmosféricos (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008). Durante el invierno,

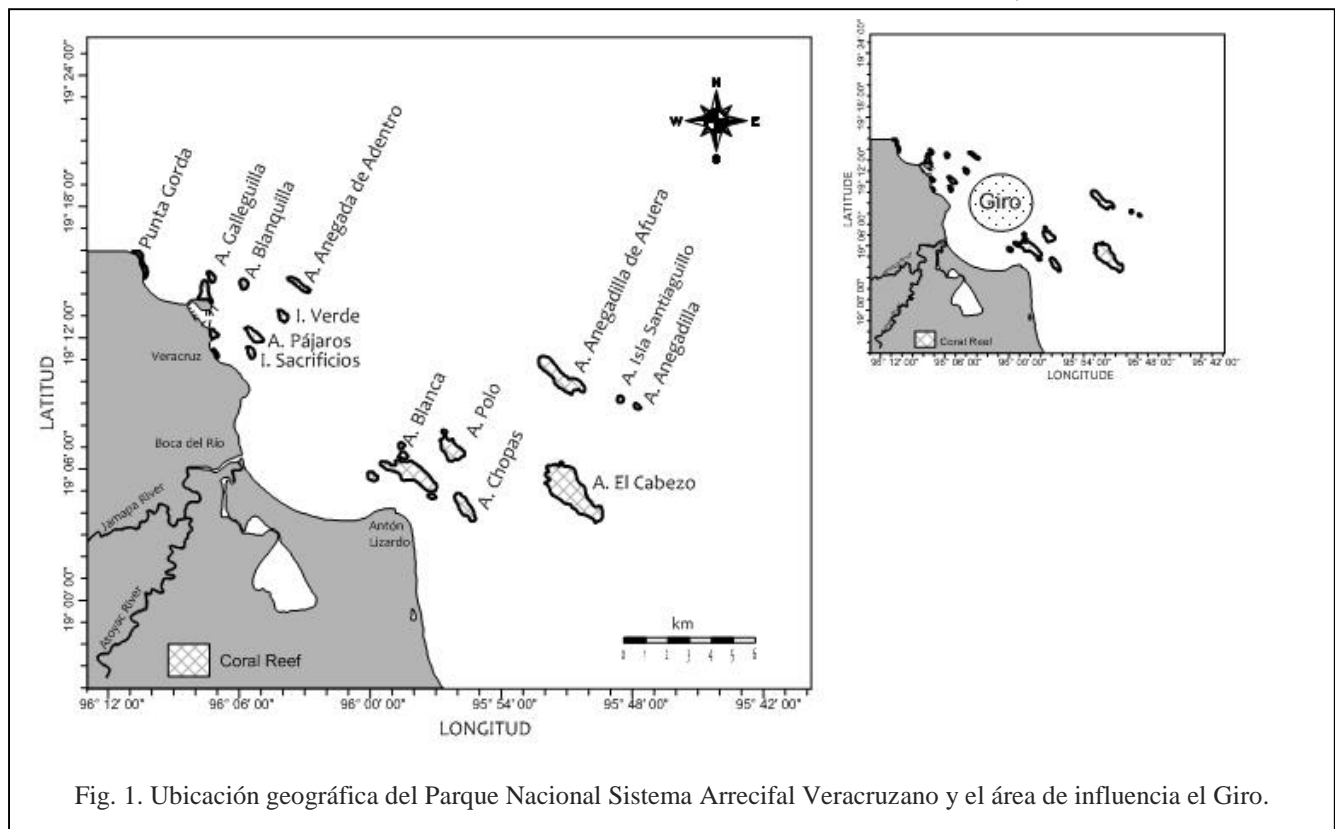


Fig. 1. Ubicación geográfica del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano y el área de influencia el Giro.

Agentes de forzamiento en el PNSAV
Salas-Monreal D, Salas-Pérez JJ, Granados-Barba A, Ortiz-Lozano LD.

generan corrientes fluyendo hacia el sur en escalas de días, debido a la generación de masas de aire polar del norte que soplan con rachas de viento promedio de 40 km h^{-1} y que fluyen de norte a sur, los cuales son llamados localmente como “Nortes” (frentes fríos). Además de ocasionar oleaje y en algunos años han ocasionado periodos de lluvias intensas (SEMAR 2002); sin embargo, durante la temporada de nortes los vientos pueden alcanzar ráfagas de más de 100 km h^{-1} , originando columnas de agua bien mezcladas en el PNSAV (Salas-Pérez y Arenas Fuentes 2011).

Durante el verano, el viento dominante proviene del sur (Zavala-Hidalgo et al. 2003, Salas-Pérez et al. 2012), generando patrones de corrientes de sur a norte en la plataforma continental externa, en la zona costera pueden ser homólogos a los de la plataforma externa (Salas-Pérez et al. 2007) o pueden ser modificados en su dirección (fluyendo de la plataforma continental externa hacia la costa) por el remolino de mesoescala de la Bahía de Campeche (Salas-Pérez et al. 2012), que facilitan los procesos migratorios de algunos peces como la sierra (*Scomberomorus maculatus*) (Mitchill 1815) y el peto (*Scomberomorus cavalla*) (Cuvier 1829) que son de importancia comercial para el estado de Veracruz (CONAPESCA 2008).

Durante el otoño, se presentan vientos alisios, los cuales son uno de los principales transportadores de humedad, ocasionando lluvias intensas (SEMAR 2002). El PNSAV cuenta con una precipitación de 1000 y 1500 mm anuales (INEGI 2000). El incremento en la descarga de agua dulce produce picnoclinas definidas en la columna de agua, las cuales a su vez funcionan como una barrera ambiental para algunas especies del plancton (Salas-Monreal et al. 2009).

El incremento de agua salobre en el

PNSAV genera gradientes horizontales en la densidad lo cual genera movimiento de corrientes marinas de aproximadamente un orden de magnitud menor a las corrientes eólicas; sin embargo, éstas no se pueden descartar, ya que ante la ausencia de vientos fuertes o sostenidos, pueden llegar a modificar el patrón de corrientes en el PNSAV.

No obstante que los vientos dominan gran parte de la circulación oceánica en la plataforma continental Veracruzana, éstos no representan el único forzante en el PNSAV, debido a que esta área de estudio es directamente afectada por los procesos que ocurren en la parte oriental del Golfo de México (GM). La circulación marina de baja frecuencia en el este del GM está dominada por la corriente de Lazo y por el giro de Campeche (Behringer et al. 1977; Carrillo et al. 2007). La trayectoria de los giros anticiclónicos que se desprenden de la Corriente de Lazo tienen una vida de hasta 12 meses y diámetros aproximados a los 300 km (Vázquez de la Cerda 1975; Elliott 1982; Monreal-Gómez y Salas de León 1997), los cuales son modificados por la batimetría (Maul y Vukovich 1993; Hurlburt y Thompson 1980) lo cual es más evidente en la plataforma continental ya que es ahí donde el fondo marino cambia bruscamente, generando un giro ciclónico al sur (frente al PNSAV) y otro al Norte de la plataforma continental de Tampico-Veracruz, además del giro ciclónico de la Bahía de Campeche que migra en verano frente a la plataforma continental del estado de Veracruz (Vázquez de la Cerda 1975; Vázquez de la Cerda 1993; Salas-Pérez et al. 2012). Esos giros afectan la circulación local del PNSAV (Vidal et al. 1992; Elliott 1982; Carrillo et al. 2007; Salas-Pérez et al. 2012). La importancia de los giros en esta área de estudio está relacionada a los procesos de mezcla vertical de agua, debido a su fragmentación en la plataforma continental de

Tampico-Veracruz, y que contribuyen a la formación de la masa de agua Común del Golfo de México (Salas-Pérez et al. 2012).

En el PNSAV los giros no han sido detectados mediante modelos numéricos, esto se debe en gran medida a la compleja batimetría y las descargas de los ríos que modifican el patrón de corriente litoral. Sin embargo mediante estudios *in-situ* ha sido posible describir dichos giros (Salas-Monreal et al. 2009). Esto se debe en gran medida a la resolución del muestreo y al hecho de obtener corrientes reales, las cuales son afectadas tanto por la batimetría, como descargas de ríos y descargas submarinas (principalmente drenajes) que no son incluidos en los estudios realizados mediante modelos numéricos.

Efectos climatológicos en las corrientes y en el nivel del mar

El clima en el PNSAV es cálido húmedo a subhúmedo con lluvias en verano, y una temperatura anual promedio que oscila entre 22 y 26°C (INEGI 2000). El incremento en la temperatura del aire se ve reflejado en la temperatura del mar, generalmente debido a que un aumento en la temperatura del aire implica que la masa de aire se desplazó hacia el norte, generando corrientes que fluyen del sur del Golfo de México hacia el Norte del mismo, las cuales tienen una temperatura mayor. Este cambio en la temperatura (presente durante el verano) genera un aumento en el nivel del mar, mientras que la disminución en la temperatura durante el invierno, generara una disminución en el nivel del mar (Salas-Monreal y Valle-Levinson 2008). Esto es importante no solo para efectos de navegación, sino también para los organismos, ya que algunos organismos no pueden soportar cambios bruscos de presión generados en la columna de agua.

Este fenómeno puede apreciarse cada año, debido a las variaciones estacionales; sin embargo, si se quisieran ver las variaciones debidas al cambio climático es necesario tener series de tiempo con una longitud mayor a los 30 años (Salas de León et al. 2006). Un estudio realizado con series de tiempo del nivel del mar, de aproximadamente 50 años, para los principales puertos del estado (Tuxpan, Veracruz, Alvarado y Coatzacoalcos) reveló que el nivel del mar está incrementando en aproximadamente 1.4 mm por año (Salas de León et al. 2006). A este tipo de procesos se les conoce como incrementos submareales de baja frecuencia en el nivel del mar (cambios en los cuales se filtra el efecto de la marea) y los cuales pueden tener consecuencias sobre la erosión de la zona costera, proceso que puede incrementar los sedimentos en esa zona, además de los aportados por los ríos.

Las mareas y el oleaje

En escalas espaciales de cientos de kilómetros, la marea en la zona costera frente al Puerto de Veracruz (Salas-Pérez et al. 2008) es diurna (periodos de 24 h); esta marea dominante cuenta con una amplitud de aproximadamente 0.50 m (Salas-Pérez et al. 2008) y produce corrientes de marea diurna con velocidades promedio menores a los 0.50 m s⁻¹. La marea quincenal (M_{sf}) frente al Puerto de Veracruz también es importante debido a que sus amplitudes se encuentran en el mismo intervalo de la marea semidiurna (Salas-Pérez et al. 2008). El cambio en el nivel del mar en periodos cortos son importantes para muchos organismos planctónicos, los cuales cuentan con migraciones verticales sujetas al régimen de mareas y pueden tener efecto en procesos como el reclutamiento (Galindo-Cortés et al. 2010) y la distribución de la estructura de la población a

lo largo del PNSAV (Jaureguizar y Guerrero 2009).

En una escala menor (periodos y longitudes de onda más cortas) encontramos al oleaje que, en el PNSAV, se atribuye al régimen de vientos del noreste y sureste. Durante el invierno y la temporada de los vientos alisios (vientos del este) el oleaje es de corta duración pero de gran amplitud (Walsh 1962). De acuerdo a Ortiz et al. (1996) el oleaje en la zona centro del estado de Veracruz, donde se encuentra localizado el PNSAV se debe a:

1) vientos locales, los cuales generan energía moderada.

2) Vientos del norte (nortes), lo que genera oleaje de tormenta. Cuando los nortes exceden los 40 km h^{-1} generan oleaje con gran energía, y aunado al viento modifican la línea de costa (acreción y erosión de playas), produciendo gran turbulencia en la plataforma continental interna.

El oleaje es importante en toda la plataforma Veracruzana; sin embargo, frente al Puerto de Veracruz no es muy importante, debido a la presencia de los arrecifes coralinos, solo en condiciones de nortes estos pueden llegar a ser significativos (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008). Este es uno de los motivos que favoreció la construcción del Puerto de Veracruz en sus inicios.

En el PNSAV, la marea es de baja energía debido a la presencia de los arrecifes; ésta es diurna como en el caso de la plataforma continental Veracruzana, y su amplitud es menor a los 15 cm (Salas-Pérez et al. 2008; Salas-Pérez y Granados-Barba 2008), similar a la amplitud registrada por el mareógrafo de Tuxpan (19 cm) donde también se encuentra un sistema arrecifal localizado a 12 km del puerto. En ambos casos, las amplitudes de la marea son menores a lo reportado en zonas expuestas como son

Alvarado (25 cm) y Coatzacoalcos (22 cm) (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008).

Las corrientes de marea, al igual que las amplitudes de la marea, son de baja energía. Los estudios realizados mediante boyas de deriva y anclajes (Herrera-Cervantes 1987; Salas-Pérez et al. 2007; Salas-Pérez y Granados-Barba 2008; Salas-Monreal et al. 2009) muestran que el eje mayor de la elipse de marea se encuentra orientado de sur a norte con amplitudes menores a los 10 cm s^{-1} para la componente K_1 y menores a los 7 cm s^{-1} para la componente M_2 .

Transporte litoral y ondas

La corriente litoral en la zona costera durante la temporada de invierno (diciembre) ha sido inferida mediante granulometría por Hernández-Rosario y Tinoco-Blanco (1988), encontrando que de Punta Gorda a Punta Mocambo la corriente fluye hacia el sur al igual que de Antón Lizardo al Río Jamapa, mientras que de Punta Mocambo al Río Jamapa la corriente fluye hacia el norte (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008). Esto genera una gran dispersión de los organismos al interior del PNSAV, sin embargo la presencia del Río Jamapa, puede llegar a ser una limitante en el intercambio de organismos a lo largo del PNSAV.

Los tres ríos que afectan de forma directa el PNSAV son el río La Antigua, con una descarga anual promedio de $2.88 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, el Jamapa el cual aporta $1.89 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ y finalmente el Papaloapan con un aporte de $36.19 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Tamayo 1999). La descarga de estos ríos puede generar gradientes de presión. Durante el verano el patrón de corrientes se invierte (Caballero-Rosas 1990; Salas-Monreal et al. 2009), formándose un giro ciclónico frente al Río Jamapa, lo cual genera baja penetración de luz y alta concentración de sedimentos

suspendidos en la columna de agua (Salas-Monreal et al. 2009). Esta puede ser una explicación a la distribución de los arrecifes de coral en el PNSAV, ya que se encuentran divididos en dos grandes grupos claramente separados por la desembocadura del Río Jamapa y la formación del giro ciclónico.

Por otra parte, el PNSAV se puede clasificar como un sistema eutrófico (concentraciones de clorofila-a mayores a 1.5 mg m^{-3}) con aguas cálidas en verano ($29\text{-}30^\circ\text{C}$) y frías en invierno ($19\text{-}23^\circ\text{C}$), estas fluctuaciones en ambos parámetros oceanográficos son influidas por la descarga de los ríos anteriormente mencionados y por el giro de la Bahía de Campeche (Salas-Pérez et al. 2014).

A escalas menores (decenas de metros) se pueden distinguir la formación de ondas de Lee (ondas generadas por efectos batimétricos). Salas-Monreal et al. (2009) reportaron las ondas de Lee frente a Isla de Sacrificios durante el verano del 2007. Estas fueron generadas por la marea y la formación de una masa de agua salada y cálida proveniente de la laguna arrecifal, donde el agua se evapora generando altas temperaturas y salinidades. Estas ondas son de gran importancia durante la temporada de desove de los corales, ya que usan estas divisiones de densidad (frentes) como medio de transporte hacia las partes más profundas del arrecife.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Veracruz es un estado con una vocación costera predominante, derivada de la presencia de más de 700 km de litorales y de una red de cuencas hidrológicas exorreicas que generan una fuerte interacción entre la porción terrestre y la porción marina del continente (Ortiz-Lozano et al. 2007). Desde una perspectiva integral, se puede afirmar que los diferentes agentes de

forzamiento y su relación con la oceanografía, y que ocurren a diferentes escalas temporales y espaciales en la zona costera veracruzana están relacionados con los aspectos meteorológicos y geomorfológicos del área de estudio. Esta variabilidad genera flujos de energía en el PNSAV que son determinantes para los recursos naturales disponibles.

Las características oceanográficas de la zona costera de Veracruz, así como la presencia de ambientes tan particulares como las desembocaduras de ríos y de los arrecifes coralinos, determinan la alta heterogeneidad ambiental de la zona costera. La cual representa un sitio con complejos procesos ambientales y rico en recursos naturales que, en conjunto, resaltan la necesidad de generar estudios científicos oceanográficos interdisciplinarios para comprender mejor su estructura y funcionamiento.

La zona costera veracruzana cuanta con un componente ambiental relevante; sin embargo, su estudio ha sido escaso, sobre todo si se considera que la ciudad de Veracruz es una de las más antiguas de América (1519). Es poca la información que se tiene para establecer las relaciones entre los agentes de forzamiento y los procesos oceanográficos de la ZCV. De acuerdo con Jiménez-Hernández et al. (2007), los estudios oceanográficos han sido poco abordado en los estudios disponibles de 1891 al 2006, representando menos del 6% de las publicaciones disponibles. Esta carencia se ve acrecentada debido a que parte de la información se encuentra a una escala espacio-temporal inadecuada para entender lo que ocurre con detalle en la zona costera (kilómetros-días). La mayoría de los estudios oceanográficos están enfocados a entender lo que ocurre en las plataformas externas del Golfo de México (Zavala-Hidalgo et al. 2003; Salas-de-León y Monreal-Gómez 2007; Dubranna et al. 2011;

Pérez-Brunius et al. 2013); sin embargo, desde el año 2005 se han venido realizando estudios oceanográficos de la ZCV (Arenas-Fuentes y Salas-Pérez 2005; Salas-Pérez et al. 2007, 2008, 2012, 2014; Salas-Pérez y Granados-Barba 2008; Salas-Monreal et al. 2009; Chacón y Salas-Monreal 2014) por lo que es necesario realizar estudios *in-situ* que permitan coleccionar datos a escalas menores a un kilómetro, con periodos de muestreo menores a una hora y durante al menos un ciclo de marea diurna.

Este tipo de estudios, serían valiosos para entender la dinámica de la ZCV, pero representan un enorme esfuerzo operativo y un alto costo monetario; por ello, podrían realizarse en zonas críticas o prioritarias, considerando los servicios ecosistémicos que brindan. Un ejemplo es el caso de los sistemas arrecifales del PNSAV y Lobos-Tuxpan. De igual manera, este tipo de estudios son útiles para determinar las zonas costeras vulnerables ante eventos atmosféricos extremos como huracanes, tormentas tropicales o vientos intensos del norte.

Por una parte, la ZCV se presenta como un sitio fuertemente dominado por corrientes anisotrópicas que facilitan la conectividad biológica entre la porción sur, la norte, la zona costera y el mar abierto del PNSAV, lo cual puede ser una determinante de la gran diversidad biológica que lo caracteriza. Los principales forzantes en el PNSAV son el viento, el cual produce cambios en la dirección de las corrientes con periodos de 6 meses y genera oleaje de entre 0.50 y 4 m de amplitud con vientos del noreste, este y sureste. El gradiente de presión generado por las descargas de los ríos, estos generan corrientes de un orden de magnitud menor que las generadas por los vientos. Los principales ríos que afectan al PNSAV son el Papaloapan, Jamapa y La Antigua, dichos ríos producen cambios termohalinos y en la velocidad (dirección y magnitud) de las corrientes

dependiendo de la temporada del año. La marea que ha sido reportada como diurna, con amplitudes de 0.15 m frente a los arrecifes y de 0.50 m en mar abierto y velocidades mayores a los 0.50 m s⁻¹. La marea es uno de los principales forzantes en el PNSAV junto con el viento, seguido por el gradiente de presión, sin embargo también cabe mencionar al giro de Campeche, el cual puede generar cambios en la velocidad de las corrientes y en la estructura termohalina del sistema. Produciendo áreas de alta energía en mar abierto. Sin embargo la presencia de zonas arrecifales genera ambientes particulares de baja energía que sirven de abrigo para especies ícticas de interés comercial, así como para la creación de puertos de abrigo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arenas-Fuentes VA y J Salas-Pérez. 2005. El Golfo de México, una aproximación a los determinantes de su biodiversidad. p.7-22. Hernández Aguilera JL, JA Ruiz-Nuño, RE Toral-Almazán y VA Fuentes (eds). En Camarones, langostas y cangrejos de la costa este de México. Ed. CONABIO-ECONATURA. Vol. I.
- Behringer DW, RL Molinari y JR Festa. 1977. The variability of anticyclonic current patterns in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 82: 5469-5476.
- CONAPESCA. 2008. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2008. SAGARPA, CONAPESCA. México 212 pp.
- Domeier ML y PL Colin. 1997. Tropical reef fish spawning aggregations: defined and reviewed. *Bulletin of Marine Science* 60(3): 698-726.
- Dubranna J, P Pérez-Brunius, M López, y J Candela. 2011. Circulation over the continental shelf of the western and southwestern Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 116(C8): 1-17.
- Ducklow HW. 1982. Chesapeake Bay nutrient and plankton dynamics. *Limnology and Oceanography* 24: 651-659.
- Elliott BA. 1982. Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography* 12: 1292-1309.

Agentes de forzamiento en el PNSAV

Salas-Monreal D, Salas-Pérez JJ, Granados-Barba A, Ortiz-Lozano LD.

- Fuentes-Mata P, CM Rodríguez-Mouriño, RM Lorán-Núñez, N García Hernández, FA Escudero-González y VS Echevarría-Reyes. 2002. Pesca de tiburones y rayas. p.189-194. En Guzmán-Anaya P, C Quiroga-Brahms, C Díaz-Luna, D Fuentes-Castellanos, CM Contreras y G Silva-López (eds.). La Pesca en Veracruz y sus perspectivas de desarrollo. SAGARPA-Universidad Veracruzana. México.
- Galindo-Cortés G, JA De-Anda-Montañez, F Arreguín-Sánchez, S Salas y EF Balart. 2010. How do environmental factors affect the stock-recruitment relationship? The case of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) of the northeastern Pacific Ocean. Fisheries Research 102: 173-183.
- Gallup JL, JD Sachs y AD Mellinger. 1999. Geography and economic development. International Regional Science Review 22: 179-232.
- Gao, S y YP Wang. 2008. Changes in material fluxes from the Changjiang River and their implications on the adjoining continental shelf ecosystem. Continental Shelf Research 28: 1490-1500.
- Genin A. 2004. Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies. Journal of Marine Systems 50: 3-20.
- Gourlay MR 1996. Wave set-up on coral reefs. 1. Set-up and wave-generated flow on an idealized two dimensional horizontal reef. Coastal Engineering 27: 161-193.
- Granados-Barba A, LG Abarca-Arenas y JM Vargas. 2007. Investigaciones científicas en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Universidad Autónoma de Campeche. 304 p.
- Harrison PL, RC Babcock, GD Bull, C Carden, C. Wallace y BL Willis. 1983. Mass spawning in tropical reef corals. Science 223(4641): 1186-1189.
- Hernández-Rosario C y D Tinoco-Blanco. 1988. Sedimentos del Sistema Arrecifal Veracruzano (Primera parte: Caracterización). Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía, Est. Inv. Oceanogr. Veracruz. 201 p.
- Hurlburt HE y JD Thompson. 1980. A numerical study of loop current intrusions and eddy shedding. Journal of Physical Oceanography 10:1611-1651.
- Jaureguizar AJ y R Guerrero. 2009. Striped weakfish (*Cynoscion guatucupa*) population structure in waters adjacent to Rio de la Plata, environmental influence on its inter-annual variability. Coastal and Shelf Science 85: 89-96.
- Jiménez-Badillo L y LG Castro-Gaspar. 2007. Pesca artesanal en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. México. p.221-240. Granados-Barba A, LG Abarca-Arenas, JM Vargas (eds.). Investigaciones científicas en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Universidad Autónoma de Campeche.
- Legrand S, E Deleersnijder, E Hanert, V Legat, y E Wolanski. 2006. High-resolution unstructured meshes for hydrodynamic models of the Great Barrier Reef, Australia. Estuarines Coast and Shelf Science 68: 36-46.
- Lugo-Fernández A, HH Roberts, WJ Wiseman Y BL Carter. 1998. Water level and currents of tidal and infra-gravity periods at Tague Reef, St Croix (USVI). Coral Reefs 17: 343-349.
- Maul GA y FM Vukovich. 1993. The relationship between variations in the Gulf of Mexico Loop Current and Strait of Florida volume transport. Journal of Physical Oceanography 23: 85- 796.
- Monreal-Gómez MA y DA Salas-de-León. 1997. Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. p.183-199. Lavin MF (eds). Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Unión Geofísica Mexicana.
- Morelock J, K Grove y ML Hernández. 1983. Oceanography and patterns of shelf sediments, Mayaguez, Puerto Rico. Journal of sedimentary Research 53(2): 371-381.
- Ortiz-Lozano L, I Espejel, A Granados-Barba y P Arceo. 2007. A functional and integrated approach of methods for the management of protected marine areas in the Mexican Coastal Zone. Ocean and Coastal Management 50: 379-391.
- Pérez-Brunius P, P García-Carrillo, J Dubranna, J Sheinbaum y J Candela. 2013. Direct observations of the upper layer circulation in the Southern Gulf of Mexico. Deep-Sea Research 85: 82-94.
- Pritchard DW. 1967. Observations of circulation in coastal plain estuaries. Estuaries Publication 83: 37-44.
- Rodríguez CU, MJ Rivera y HI Rebaza. 2007. Factores de riesgo para malaria por *Plasmodium vivax* en una población rural de Trujillo, Perú. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública 24: 35-39.
- Sachs JD. 2001. Tropical Underdevelopment. NBER Working Paper W. 8119 p.
- Salas-Monreal D. 2002. Sea level slopes and volume fluxes produced by atmospheric forcing in

Agentes de forzamiento en el PNSAV

Salas-Monreal D, Salas-Pérez JJ, Granados-Barba A, Ortiz-Lozano LD.

- Chesapeake Bay, M.S. Old Dominion University of Norfolk, Virginia. 81 p.
- Salas-Monreal D, Salas de León, D. A. Monreal-Gómez, M. A. y M. L. Riverón-Enzástiga. 2009. Current rectification in a tropical coral reef system. *Coral Reefs* 28: 871-879.
- Salas-de-León DA, MA Monreal-Gómez, MA Díaz-Flores, D Salas-Monreal, H Velasco-Mendoza, ML Riverón-Enzástiga, y G Ortiz-Zamora. 2008. Role of near-bottom currents in the distribution of sediments within the southern bay of Campeche, Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research* 246: 1487-1494.
- Salas-de-León DA, MA Monreal-Gómez y J Aldeco-Ramírez. 1992. Periodos característicos en las oscilaciones de parámetros meteorológicos en Cayo Arcas, México. *Atmósfera* 5: 193-205.
- Salas-Pérez JJ, JM Vargas-Hernández, V Arenas-Fuentes y P Balderas-Cruz. 2007. Trayectoria de masas de agua en los sistemas arrecifales de Veracruz y modelos numéricos: Circulación de verano. p.17-26. Granados-Barba A, L Abarca-Arenas y JM Vargas-Hernández (eds.). *Investigaciones Científicas en el Sistema Arrecifal Veracruzano. EPOMEX-UAC.*
- Salas-Pérez JJ, D Salas-Monreal, VE Arenas-Fuentes, DA Salas-de-León, y ML Riveron-Enzastiga. 2008. Tidal characteristics in a coral reef system from the western Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas* 34: 467-478.
- Salas-Pérez JJ y A Granados-Barba. 2008. Oceanographic characterization of the Veracruz reefs system. *Atmósfera* 21: 281-301.
- Salas-Pérez JJ y VE Arenas-Fuentes. 2011. Water mass of Veracruz reef system. *Atmósfera* 24: 221-231.
- Salas-Pérez JJ, D Salas-Monreal, MA Monreal-Gómez, ML Riveron-Enzástiga y C Llasat. 2012. Seasonal absolute acoustic intensity, atmospheric forcing and currents in a tropical coral reef system. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 100: 102-112.
- Shulman MJ y JC Ogden. 1987. What controls tropical reef fish populations: recruitment or benthic mortality? An example in the Caribbean reef fish *Haemulon flavolineatum*. *Marine Ecology Progress Series* 39: 233-242.
- Storlazzi CD, MA McManus, JB Logan, y MG McLaughlin. 2006. Cross-shore velocity shear, eddies and heterogeneity in water column properties over fringing coral reefs: West Maui, Hawaii. *Continental Shelf Research* 26: 401-421.
- Vargas-Hernández JM, ML Jiménez-Badillo y VE Arenas-Fuentes. 2002. El Sistema Arrecifal Veracruzano y las pesquerías asociadas. p.13-16. Guzmán-Anaya P, C Quiroga-Brahms, C Díaz-Luna, D Fuentes-Castellanos, CM Contreras y G Silva-López (eds.). *La Pesca en Veracruz y sus perspectivas de desarrollo. SAGARPA-Universidad Veracruzana. México.*
- Vázquez-de-la-Cerda AM. 1975. Currents and waters of the upper 1200 m of the Southwestern Gulf of Mexico. Master's Thesis, Texas A&M University. 107 p.
- Vázquez-de-la-Cerda AM. 1993. Bay of Campeche cyclone. Texas A&M University, College Station. 201 p.
- Vidal VMV, FV Vidal y JM Pérez-Molero. 1992. Collision of a loop current anticyclonic ring against the continental shelf slope of the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 97: 2155-2172.
- Wolanski E y J Sarsenski. 1997. Larvae dispersion in coral reef and mangroves. *American Science* 85: 236-243.
- Wolanski, E y S Spagnol. 2000. Sticky waters in the Great Barrier Reef. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 50: 27-32.
- Zavala-Hidalgo J, SL Morey y JJ O'Brien. 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research* 108: 3389.