

REGIONES, ESPECIES Y ECOSISTEMAS
VULNERABLES ANTE DERRAMES
DE PETRÓLEO DE GRAN ESCALA
EN EL GOLFO DE MÉXICO

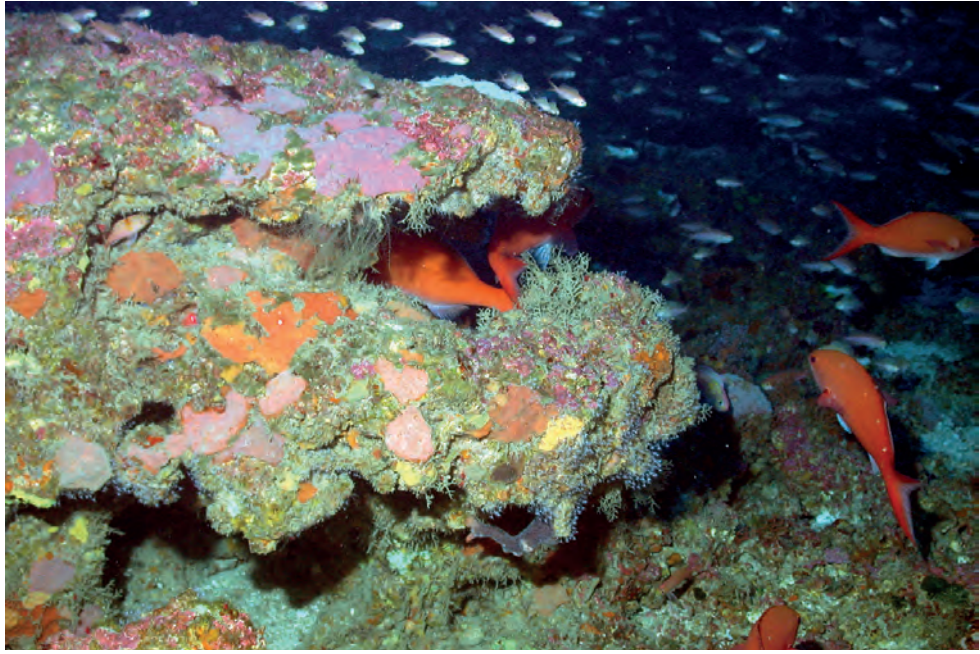
Paula Pérez Brunius y M. Leopoldina Aguirre Macedo
COORDINACIÓN GENERAL

TOMO III

EFECTOS DE DERRAMES DE PETRÓLEO EN LA REGIÓN DE PERDIDO SOBRE LA CONNECTIVIDAD BIOLÓGICA DEL GOLFO DE MÉXICO

PAULA PÉREZ BRUNIUS,
JESUS C. COMPAIRE Y
PAULA GARCÍA CARRILLO
EDITORES

CONSORCIO DE INVESTIGACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO (CIGOM)





REGIONES, ESPECIES Y ECOSISTEMAS
VULNERABLES ANTE DERRAMES DE PETRÓLEO
DE GRAN ESCALA EN EL GOLFO DE MÉXICO

Paula Pérez Brunius y M. Leopoldina Aguirre Macedo

COORDINACIÓN GENERAL

TOMO III

EFFECTOS DE DERRAMES DE
PETRÓLEO EN LA REGIÓN
DE PERDIDO SOBRE LA
CONECTIVIDAD BIOLÓGICA
DEL GOLFO DE MÉXICO

PAULA PÉREZ BRUNIUS,
JESUS C. COMPAIRE Y
PAULA GARCÍA CARRILLO

EDITORES

CONSORCIO DE INVESTIGACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO (CIGOM)

Proyecto “Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México”, financiado por el fondo sectorial SENER-CONACYT Hidrocarburos (201441) .

Esta obra ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT- SENER- Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Reconocemos a PEMEX por promover ante el Fondo la demanda específica sobre los derrames de hidrocarburos y el medio ambiente.



PRIMERA EDICIÓN: diciembre de 2020

*Regiones, especies y ecosistemas vulnerables
ante derrames de petróleo de gran escala
en el golfo de México
Tomo III. Efectos de derrames de petróleo
en la región de Perdido sobre la conectividad
biológica del golfo de México*

D.R. © 2020 CICESE
www.cicese.edu.mx

DISEÑO Y FORMACIÓN: Raúl Marcó del Pont Lalli
FOTOGRAFÍAS: NOAA, portada y p. 50. NURC/UNCW y NOAA/FGBNMS, p. 1.
Claudio Contreras Koob, pp. 2, 6, 70, 90. Sharon Herzka, p. 8.
Fátima Ordóñez Guillén/María Isabel López Echeverri, p. 14.
Green Fire Production, p. 72. Flickr, p. 84.

ISBN 978-607-8811-16-8

Impreso y hecho en México

Coordinación, seguimiento y revisión de contenido

COORDINACIÓN DE CONTENIDO Y SEGUIMIENTO

Paula García Carrillo (CICESE), Mercedes Chi Chan (CICESE), Emma Alonzo Marrufo (CINVESTAV), Selene Dinarzada Romero Álvarez (CICESE).

CARTOGRAFÍA

Mercedes Chi Chan (CICESE).

REVISORES DE CONTENIDO

Tomo I. Cecilia Enríquez Ortíz (SISAL-UNAM), Ismael Mariño Tapia (ENES-UNAM, CINVESTAV), María C. García Aguilar (CICESE), Tereza Cavazos (CICESE), Luz Erandi Saldaña-Ruiz (CICESE), Cuauhtémoc Turrent Thompson (CICESE), Rosario Romero-Centeno (UNAM).

Tomo II. Luz Erandi Saldaña-Ruiz (CICESE), Oscar Sosa-Nishizaki (CICESE), Daniel Pech (ECOSUR), M. Concepción García Aguilar (CICESE), M. Leopoldina Aguirre Macedo (CINVESTAV), Victor Vidal Martínez (CINVESTAV), Silvia Salas Márquez (CINVESTAV), Paula Pérez Brunius (CICESE).

Tomo III. Alfonsina E. Romo Curiel (CICESE), Jesus C. Compaire (CICESE), Axayácatl Rocha-Olivares (CICESE), M. Concepción García Aguilar (CICESE), Rossanna Rodríguez Canul (CINVESTAV).

Juan Carlos Herguera

Responsable Técnico del Proyecto

Edward Peters Recagno

Coordinador Técnico del Proyecto

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta obra no hubiera sido posible sin el apoyo de un gran número de personas que forman parte del CIGoM. Agradecemos la participación de técnicos y estudiantes en las campañas de campo y en la adquisición, procesamiento y análisis de las muestras y datos recopilados. También agradecemos al personal administrativo de las instituciones participantes que apoyó con la compra de equipo e insumos de laboratorio, en la contratación de servicios, y en la administración de los recursos humanos del proyecto.



ÍNDICE

5 COORDINACIÓN, SEGUIMIENTO Y REVISIÓN DE CONTENIDO

9 INTRODUCCIÓN

Axayácatl Rocha-Olivares, Jesus C. Compaire, Sharon Z. Herzka, Paula Pérez Brunius

Sección 1. Conectividad biológica del golfo de México

15 CAPÍTULO 1. POSIBLES RUTAS DE TRANSPORTE LARVAL ENTRE REGIONES DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO

Jesus C. Compaire, Paula Pérez Brunius, Javier Rodríguez Outerelo, Sharon Z. Herzka, M. Josefina Olascoaga, Phillippe Miron, F. Javier Berón-Vera

37 CAPÍTULO 2 LARVAS DE PECES COMO TRAZADORES DE TRANSPORTE DESDE LA PLATAFORMA CONTINENTAL HACIA LA ZONA PROFUNDA

Jesus C. Compaire, Sharon Z. Herzka, Paula Pérez Brunius, Sylvia Patricia A. Jiménez-Rosenberg, Javier Rodríguez Outerelo, Laura del Pilar Echeverri-García

51 CAPÍTULO 3. CONECTIVIDAD BIOLÓGICA INFERIDA A TRAVÉS DEL FLUJO GENÉTICO

Ana Yonory Castillo Páez, Evangelina Castro Olguín, Axayácatl Rocha-Olivares

71 *Sección 2. Efectos de derrames en el cinturón plegado Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México*

Axayácatl Rocha-Olivares, Jesus C. Compaire, Paula Pérez Brunius, Sharon Z. Herzka

85 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Jesus C. Compaire, Paula Pérez Brunius, Sharon Z. Herzka, Axayácatl Rocha-Olivares

CAPÍTULO 2

Larvas de peces como trazadores de transporte desde la plataforma continental hacia la zona profunda

Jesus C. Compaire,* Sharon Z. Herzka,* Paula Pérez Brunius,** Sylvia Patricia A. Jiménez-Rosenberg,** Javier Rodríguez Outerelo,** Laura del Pilar Echeverri-García*

INTRODUCCIÓN

Los estudios de conectividad biológica en poblaciones de ambientes oceánicos y costeros son fundamentales para el entendimiento de la dinámica poblacional, la estructura genética y la distribución biogeográfica de las especies marinas (Cowen *et al.*, 2006). La conectividad biológica es el nivel de intercambio de organismos que hay entre poblaciones que interactúan a distancia (Roberts y Hawkins, 2000). Es por ello que la capacidad de recuperación de los ecosistemas marinos perturbados, ya sea por disturbios naturales o antropogénicos, depende del nivel de conectividad entre las poblaciones (Paris *et al.*, 2020). Un alto grado

de conectividad brindará resiliencia (capacidad de recuperación) a las poblaciones a lo largo del tiempo; por el contrario, niveles bajos de conectividad las hará susceptibles a colapsos poblacionales que pueden tener consecuencias negativas sobre el funcionamiento y estructura de las comunidades locales y los ecosistemas.

En especies de peces teleósteos,¹ con un ciclo de vida complejo y con una fase larvaria pelágica² altamente sujeta a la dispersión, el estudio de

- 1 Grupo de peces de esqueleto óseo, cola homocerca, escamas cicloideas o ctenoideas y vejiga natatoria casi siempre presente. Comprende la mayoría de los peces.
- 2 Distribuidas en los primeros 200m de la columna de agua.

* Departamento de Oceanografía Biológica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México.

** Departamento de Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior

de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México.

*** Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (IPN-CICIMAR) La Paz, Baja California Sur, México.

CÓMO CITAR: Compaire, J. C., Herzka, S. Z., Pérez Brunius, P., Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Rodríguez Outerelo, J., Echeverri-García, L. del P. (2020). Larvas de peces como trazadores de transporte desde la plataforma continental hacia la zona profunda. En P. Pérez Brunius, J. C. Compaire, P. García Carrillo (Eds.), *Efectos de derrames de petróleo en la región de Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México* (pp. 37-49). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527474>

la conectividad biológica resulta complicado. En este grupo de peces, la temporada reproductiva depende de la especie y puede abarcar desde pocos días, asociado a condiciones ambientales muy específicas, hasta todo el año, en especies con reproducción continua. En términos de la producción de gametos, la tasa reproductiva de los peces tiende a ser alta, sin embargo, durante la etapa larvaria también presentan altas tasas de mortalidad debido a su bajo nivel de desarrollo, a sus tallas pequeñas y a su limitada capacidad natatoria que las hace muy susceptibles a la depredación y a los cambios en las condiciones ambientales (Fuiman, 2002). En este contexto, comprender la ecología de las fases larvianas es importante dado que su supervivencia está ligada al reclutamiento, es decir, a la adición de individuos jóvenes a una población (Carr y Syms, 2006). Aunque el éxito en el reclutamiento es notablemente variable en el espacio y en el tiempo, hay una relación entre el número de reclutas y la biomasa de las poblaciones de adultos que frecuentemente están sujetos a explotación pesquera (Cushing, 1996). Por ende, el estudio de los procesos que influyen en la distribución, abundancia y supervivencia de la etapa larvaria es indispensable.

El periodo medio de la fase larvaria de los peces marinos dura alrededor de un mes, que es el tiempo durante el cual forma parte del plancton (ictioplancton), su permanencia depende tanto del proceso de desarrollo de cada especie como de diversos factores ambientales (Houde, 1994). Entre las variables ambientales que determina la duración del periodo ictioplanctónico se encuentran principalmente la temperatura y la disponibilidad de alimento, que junto con los niveles de luz, pH, concentración de oxígeno y salinidad, condicionarán las tasas de desarrollo de la larvas (Fuiman, 2002).

Los modelos numéricos de circulación oceánica de alta resolución han demostrado ser útiles para evaluar los patrones de dispersión en especies que presentan una fase de larva pelágica durante su desarrollo (Cowen *et al.*, 2006; Paris *et al.*, 2002). El uso de estos modelos, que pueden o no estar acoplados a modelos biológicos en los cuales se consideran procesos como la alimentación, crecimiento y tasas de mortalidad, ha permitido inferir las rutas de dispersión y estimar los niveles de conectividad entre poblaciones aisladas (Kitchens *et al.*,

2017; Paris *et al.*, 2007). Tradicionalmente los ejercicios de modelado desarrollados en estas investigaciones se han centrado en analizar el potencial de dispersión y retención (auto-reclutamiento) de poblaciones en zonas de alto valor ecológico, como el intermareal rocoso (Roughgarden *et al.*, 1988) y los arrecifes de coral (Pata y Yñiguez, 2019), así como en comprender la propagación de especies invasoras (Kitchens *et al.*, 2017) y contribuir al diseño y manejo de áreas naturales protegidas (Planes *et al.*, 2009). Estas aproximaciones orientadas al entendimiento de la conectividad biológica han contribuido tanto a la conservación de las especies como a la adecuada gestión de los recursos pesqueros. Además, el estudio de los patrones de distribución de larvas de peces, junto con experimentos de modelación lagrangiana de trayectorias de partículas, permite analizar sus vías de dispersión y, por tanto, evaluar su nivel de conectividad en escalas de tiempo cortas. Es por ello que, a partir de la modelación lagrangiana de la dispersión, es posible identificar las trayectorias de desplazamiento de individuos (partículas) que se mueven junto con parcelas de agua. Por lo que utilizar esta herramienta para la evaluación de las trayectorias de un gran número de individuos permite hacer inferencias sobre la dispersión a nivel poblacional (Siegel *et al.*, 2003).

En el golfo de México (GM), los patrones de distribución de las comunidades de peces adultos sobre la plataforma continental están condicionados tanto por la profundidad de la columna de agua como por los grandes ecosistemas marinos en los que se subdivide el golfo (Murawski *et al.*, 2018). El mayor potencial de dispersión de estas especies es durante la fase larvaria pelágica, cuando pueden ser transportadas por las corrientes entre diferentes subregiones del GM (Paris *et al.*, 2020). Es durante este periodo que las larvas de especies costero-neríticas sirven como trazadoras del transporte hacia aguas abiertas (*offshore*), de manera que su distribución puede ser usada para inferir el nivel de conectividad entre la zona de plataforma y la región de aguas profundas (Compaire *et al.*, en prensa).

Los trabajos de conectividad biológica que contemplan a las comunidades de peces que habitan sobre la plataforma continental del GM se han realizado con base en estudios que se basan

en aproximaciones tanto biológicas como físicas, o una combinación de ambas. Desde el punto de vista biológico, examinan la distribución y abundancia de larvas, juveniles, o adultos en relación con condiciones ambientales (Rooker *et al.*, 2019; Daudén-Bengoá *et al.*, 2020), analizan marcadores moleculares que reflejan la estructura poblacional en escalas de tiempo evolutivas (Puebla *et al.*, 2012), emplean marcas tradicionales, químicas o satelitales que permiten caracterizar el origen natal, patrones de desplazamiento y migración (Adam *et al.*, 2003; Fodrie y Herzka, 2013; Rooker *et al.*, 2019), y que investigan los patrones espacio-temporales de capturas pesqueras de adultos (Murawski *et al.*, 2018). Desde el enfoque físico, se infieren los patrones de dispersión y niveles de conectividad por medio del análisis de boyas de deriva (Olascoaga *et al.*, 2018), y ejercicios de modelado numérico considerando diferentes condiciones oceanográficas (Johnson *et al.*, 2013) o a partir de promedios climatológicos de las condiciones oceanográficas (Sanvicente-Añorve *et al.*, 2014).

Debido a que la adquisición de datos biológicos en el medio marino resulta desafiante y costosa (North *et al.*, 2009), el uso de modelos numéricos de circulación oceánica resulta una alternativa ventajosa para llevar a cabo experimentos de modelación de trayectorias de partículas lagrangianas que simulan organismos planctónicos como larvas, abarcando múltiples escalas espaciales y temporales. Sin embargo, debido a que el comportamiento de las larvas de peces se vuelve complejo a medida que estas se desarrollan (Irisson *et al.*, 2009) y sus tasas de crecimiento y mortalidad varían (Houde, 2002; Jones, 2002), los patrones de dispersión y conectividad predichos a través de simulaciones numéricas presentan limitaciones, ya que no incluyen la variabilidad intrínseca de procesos biológicos. Idealmente, los estudios de modelación numérica de trayectorias de partículas lagrangianas deben acoplarse con estudios de campo centrados en la caracterización de los patrones de distribución y abundancia de larvas, con el fin de evaluar la coherencia entre ambas aproximaciones y poder inferir los patrones de dispersión y nivel de conectividad.

En el presente trabajo se analiza de forma conjunta los patrones de distribución espacio-temporal de larvas de peces de taxones de especies costero-neríticas³ capturadas en aguas oceánicas en la región del cinturón plegado Perdido (Tamaulipas Norte) en el noroeste del GM, y los resultados de experimentos de modelación lagrangiana de simulación de trayectorias de partículas pasivas derivadas de un modelo de circulación. Nuestro objetivo es evaluar el nivel de conectividad y dispersión de las larvas entre el borde de la plataforma y la zona de aguas profundas en la región de Perdido. Estos resultados serán útiles para inferir el grado de resiliencia⁴ de las poblaciones de peces que habitan sobre la plataforma continental ante posibles derrames de petróleo en la zona.

METODOLOGÍA

El nivel de conectividad y dispersión de la comunidad ictioplanctónica entre el borde de la plataforma continental y la zona de aguas profundas en la región de Perdido se evaluó a partir de dos estrategias complementarias: 1) la caracterización de la distribución espacial y temporal de las larvas de peces de taxones costero-neríticos, y 2) la caracterización de mecanismos de transporte locales que contribuyen a la dispersión y conectividad a través del modelado numérico, para inferir los procesos que dan lugar a la distribución de las larvas observadas en 1.

Recolección de muestras biológicas

Se recolectaron muestras de larvas de peces para el análisis de la distribución de la comunidad ictioplanctónica en las estaciones programadas dentro del subproyecto Experimento de Dispersión en Aguas Profundas (Deep Water Dispersion Experiment, o DWDE por sus siglas en inglés) durante cuatro cruceros oceanográficos (DWDE-1 junio de 2016, DWDE-2 octubre de 2016, DWDE-3 abril/mayo de 2017, DWDE-4 noviembre de 2017) en la región de Perdido. Los muestreos se realiza-

3 La zona nerítica comprende a la plataforma continental.

4 Capacidad de recuperación de la población tras haber sufrido una perturbación.

ron en dos transectos (norte y sur) a lo largo de la plataforma continental, talud y zona de aguas profundas en la región de Perdido al noroeste del GM (Figura 1) definiéndose como estaciones neríticas aquellas que se ubicaron sobre la plataforma continental, es decir, las localizadas donde la columna de agua era menor a 200 m. Se clasificaron como oceánicas aquellas donde la columna de agua superaba los 1000 m de profundidad. Las estaciones que se encontraban entre 200 y 1000 m de profundidad se consideraron como de transición ya que, debido a lo escarpado del talud, se situaban muy cerca de la plataforma continental. Las muestras de ictioplancton se recolectaron con arrastres oblicuos con una red bongo desde superficie hasta los 200 m de profundidad o, si la columna de agua era menor, hasta aproximadamente 5 m por encima del fondo. La velocidad y duración media (\pm desviación estándar) de los arrastres a lo largo de los cuatro cruceros fue de 1.99 ± 0.38 nudos y 23 ± 6 min. Esta red consiste de dos aros de 60 cm de diámetro provistos de flujómetros para estimar el volumen de agua filtrado (el cual permite calcular la abundancia estandarizada de los organismos por cada 1000 m³) y estaba equipado con redes de luz de malla de 335 μ m. La muestra destinada a la identificación morfológica fue fijada en formol al 7% y se procesó posteriormente en el laboratorio.

Un total de 5810 larvas de peces pertenecientes a 295 taxones en nivel de familia, género o especie fueron identificadas de acuerdo a sus características merísticas y morfométricas (Fahay, 2007; Richards, 2005). Con base en la información bibliográfica (Felder y Camp, 2009; Richards, 2005; Froese y Pauly, 2019), se seleccionaron taxones cuyo hábitat durante la etapa adulta se restringe a profundidades menores a los 200 m, es decir sobre la plataforma continental, y que por ende se consideraban costero-neríticas. Este análisis indicó que las larvas de 42 taxones eran susceptibles de servir como trazadores del transporte hacia aguas profundas (Tabla 1). La información sobre las abundancias estandarizadas de los taxones costero-neríticos capturados en las estaciones oceánicas por transecto y en cada crucero se reportan en detalle en Compaire *et al.* (en prensa). Dado que el nivel de identificación taxonómica varió en función del grupo, aquí se

reportan los patrones de distribución en nivel familia.

Conectividad inferida a través de modelado numérico

Para determinar la procedencia de las larvas de peces se realizaron simulaciones de dispersión de partículas pasivas utilizando las salidas del modelo hidrodinámico de alta resolución HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) (Chassignet *et al.*, 2007). Este modelo presenta una resolución temporal horaria y espacial de $1/25^\circ$; en este estudio se utilizaron las componentes horizontales de la velocidad (u, v) de las 17 primeras capas del modelo que abarcan desde la superficie hasta los 200 m de profundidad. HYCOM utiliza el esquema de asimilación de datos NCODA (Navy Coupled Ocean Data Assimilation), el cual toma información disponible de satélites altimétricos, temperatura superficial del mar satelital e *in situ* así como información de perfiles de temperatura y salinidad obtenidos de XBT, flotadores ARGO y boyas fondeadas (Cummings y Smedstad, 2013).

El experimento de dispersión de larvas virtuales consistió en el lanzamiento de 1500 partículas pasivas distribuidas aleatoriamente en cada una de las 17 capas y en un radio de 5 km alrededor de cada una de las estaciones oceánicas muestreadas. Las trayectorias de las partículas fueron integradas hacia atrás en el tiempo en el campo de velocidades bidimensional del modelo con el método de integración numérica de Runge-Kutta de cuarto orden y un paso de tiempo de 1 hora durante 28 días. Se utilizó la regionalización del GM en diferentes provincias por sobre la plataforma continental propuesta en el Capítulo 1 de este tomo (Figura 1). La simulación de las trayectorias lagrangianas de estas partículas pasivas brindó información sobre las vías de dispersión y el porcentaje de arribo de partículas desde cada una de las provincias de la plataforma continental a las estaciones oceánicas. Con base en los campos de velocidad obtenidos de HYCOM, se calculó la vorticidad relativa superficial para evaluar la presencia de estructuras de mesoescala que pudieran explicar las diferencias observadas en los patrones de dispersión de partículas entre cruceros.

RESULTADOS

Distribución y abundancia de larvas de peces

La identificación de larvas de peces de taxones costero-neríticos, capturados en estaciones oceánicas (Tabla 1), indica que existe un transporte larvario desde la plataforma continental hacia aguas profundas. El análisis sobre la distribución y abundancia de estos taxones a nivel familiar muestra que, aunque se capturaron larvas de

peces costero-neríticos durante los cuatro cruces, los patrones fueron muy diferentes entre ellos (Figura 2). La mayor abundancia (media \pm desviación estándar) de taxones costero-neríticos capturados en las estaciones oceánicas se registró en la primera y última campañas (DWDE-1: 195 ± 181 individuos·1000 m⁻³, DWDE-4: 180 ± 154 individuos·1000 m⁻³), mientras que en la segunda y tercera fueron mucho menores (DWDE-2: 34 ± 37 individuos·1000 m⁻³, DWDE-3: 6 ± 2 individuos·1000 m⁻³).

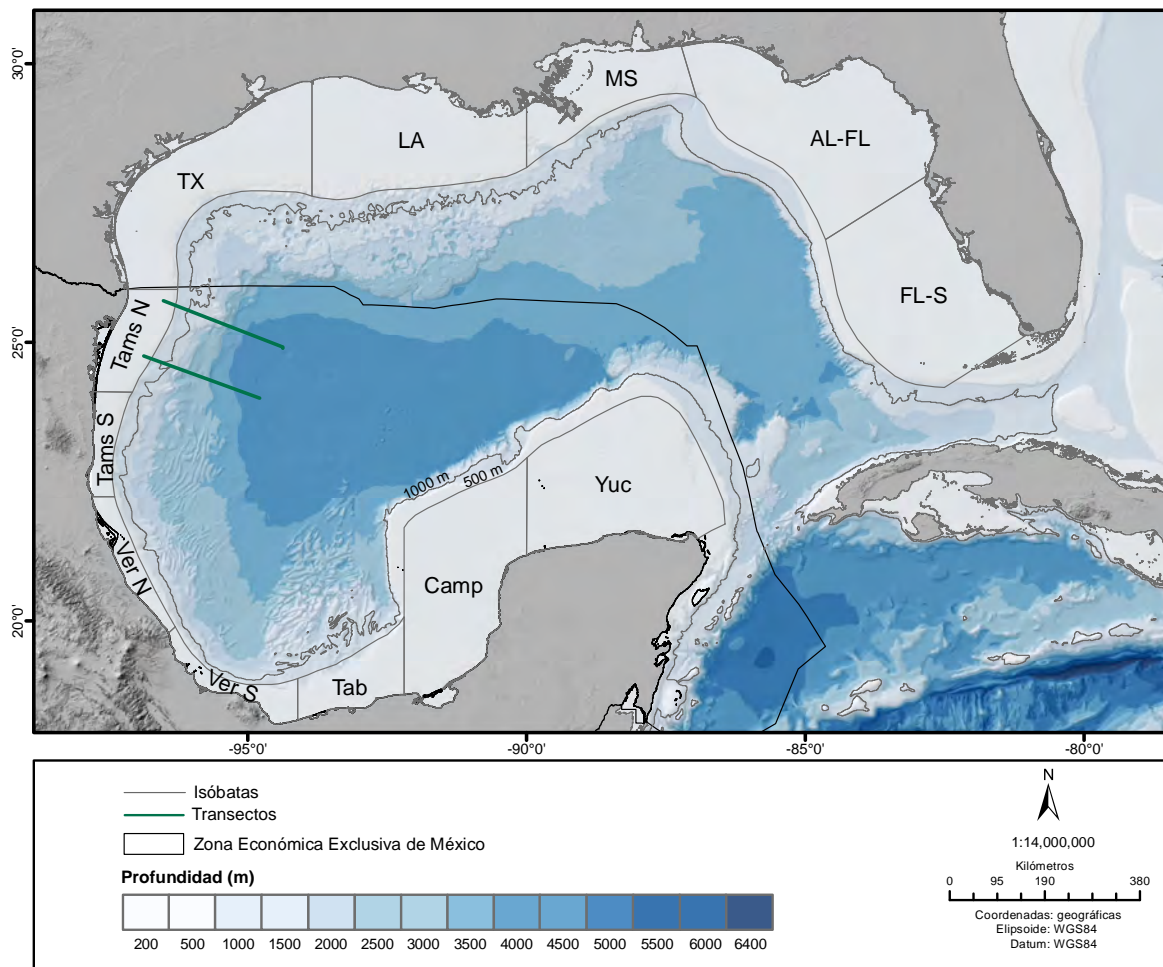


Figura 1. Regionalización del golfo de México utilizada para inferir el origen de las larvas de peces (véanse detalles metodológicos en el Capítulo 1 de este tomo). Las líneas verdes indican las posiciones de los transectos norte y sur muestreados en la región de Perdido (véanse detalles de estaciones muestreadas en cada cruce en Figura 2). Yuc: Yucatán, Camp: Campeche, Tab: Tabasco, Ver S: Veracruz Sur, Ver N: Veracruz Norte, Tams S: Tamaulipas Sur, Tams N: Tamaulipas Norte, TX: Texas, LA: Luisiana, MS: Misisipi, AL-FL: Alabama-Florida Norte y FL S: Florida Sur.

Tabla 1. Taxones de especies costero-neríticas capturadas en las estaciones oceánicas y hábitat ocupado por los adultos.

FAMILIA	TAXÓN	HÁBITAT ADULTOS*
Balistidae	<i>Balistes capricus</i>	DEM, ARC, PMA
	<i>Balistes</i> spp.	DEM, ARC, PMA
Bothidae	<i>Bothus</i> spp.	DEM, SUB
Bregmacerotidae	<i>Bregmaceros cantori</i>	NER
Bythitidae	<i>Grammonus</i> spp.	ARC, MAD
Callionymidae	<i>Callionymus bairdi</i> *	DEM, ARC
Carangidae	<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	NER, BCC, POC
Cynoglossidae	<i>Symphurus civitatium</i>	DEM, SUB
Eleotridae	<i>Dormitator maculatus</i>	DEM, BCC, EST
Engraulidae	<i>Anchoa</i> spp.	NER, CSE, BCC, POC, EST
	<i>Engraulidae</i> spp.	NER, CSE, BCC, POC, EST
	<i>Engraulis eurystole</i>	NER, POC
Gerreidae	<i>Eucinostomus</i> spp.	DEM, BCC, EST, PMA, POC, SUB
Gobiesocidae	<i>Gobiesocidae</i> spp.	DEM, PMA, ARC
	<i>Bathygobius</i> spp.	DEM, BCC, PMA, ARC, POC, EST
	<i>Bollmania communis</i>	DEM, SUB
	<i>Bollmania</i> spp.	DEM, SUB
	<i>Coryphopterus</i> spp.	DEM, ARC
	<i>Ctenogobius boleosoma</i>	ARC, DEM, BCC, EST
	<i>Ctenogobius</i> spp.	ARC, DEM, BCC, EST, SUB, MAD, EPI, PMA
<i>Gobionellus</i> spp.	DEM, BCC, EST, PMA	
Kyphosidae	<i>Kyphosus sectatrix</i>	BEP, ARC
Labridae	<i>Bodianus rufus</i>	DEM, ARC
	<i>Halichoeres</i> spp.	DEM, ARC
	<i>Xyrichtys</i> spp.	DEM, SUB, ARC
Megalopidae	<i>Megalops atlanticus</i>	NER, BCC, EST, ARC
Microdesmidae	<i>Ptereleotris</i> spp.	ARC, SUB
	<i>Microdesmus longipinnis</i>	DEM, BCC, MAD
Moringuidae	<i>Moringuidae</i> spp.	DEM, POC, SUB
Ophidiidae	<i>Ophidion nocomis</i>	SUB
	<i>Etropus crossotus</i>	DEM, SUB
Paralichthyidae	<i>Etropus</i> spp.	DEM, SUB
	<i>Syacium papillosum</i>	DEM, SUB, SUD
	<i>Chromis multilineata</i>	DEM, ARC
Scaridae	<i>Spariosoma</i> spp.	DEM, ARC, PMA
Sciaenidae	<i>Sciaenidae</i>	BCC, POC, EST, DEM, SUB, ARC, PMA,

Tabla 1. Continúa.

FAMILIA	TAXÓN	HÁBITAT ADULTOS*
Serranidae	<i>Hypoplectrus</i> spp.	DEM, ARC
Sphyracnidae	<i>Sphyracna guachancho</i>	NER, BCC
Synphobranchidae	<i>Dysomma anguillare</i>	DEM, SUB
Synodontidae	<i>Synodus poeyi</i>	DEM, SUB
Tetraodontidae	<i>Canthigaster</i> spp.	DEM, ARC
	<i>Sphoeroides</i> spp.	DEM, BCC, ARC, PMA

* Hábitat de ocupación descrito para los adultos, de acuerdo con Richards (2005), Felder y Camps (2009) y Froese y Pauly, (2019). ARC, arrecifes de coral; BCC, bahías y cerca de la costa; BEP, bentopelágico; CSE, costero superficial y epipelágico; DEM, demersal; EPI, epipelágico; EST, estuarios; MAD, madrigueras/cuevas; NER, neríticos; PMA, praderas marinas; POC, playas y orilla de la costa; SUB, sustrato blando (barro, arena, arcilla); SUD, sustrato duro. Se destacan en negrita aquellos taxones que estuvieron presentes durante las cuatro campañas oceanográficas.

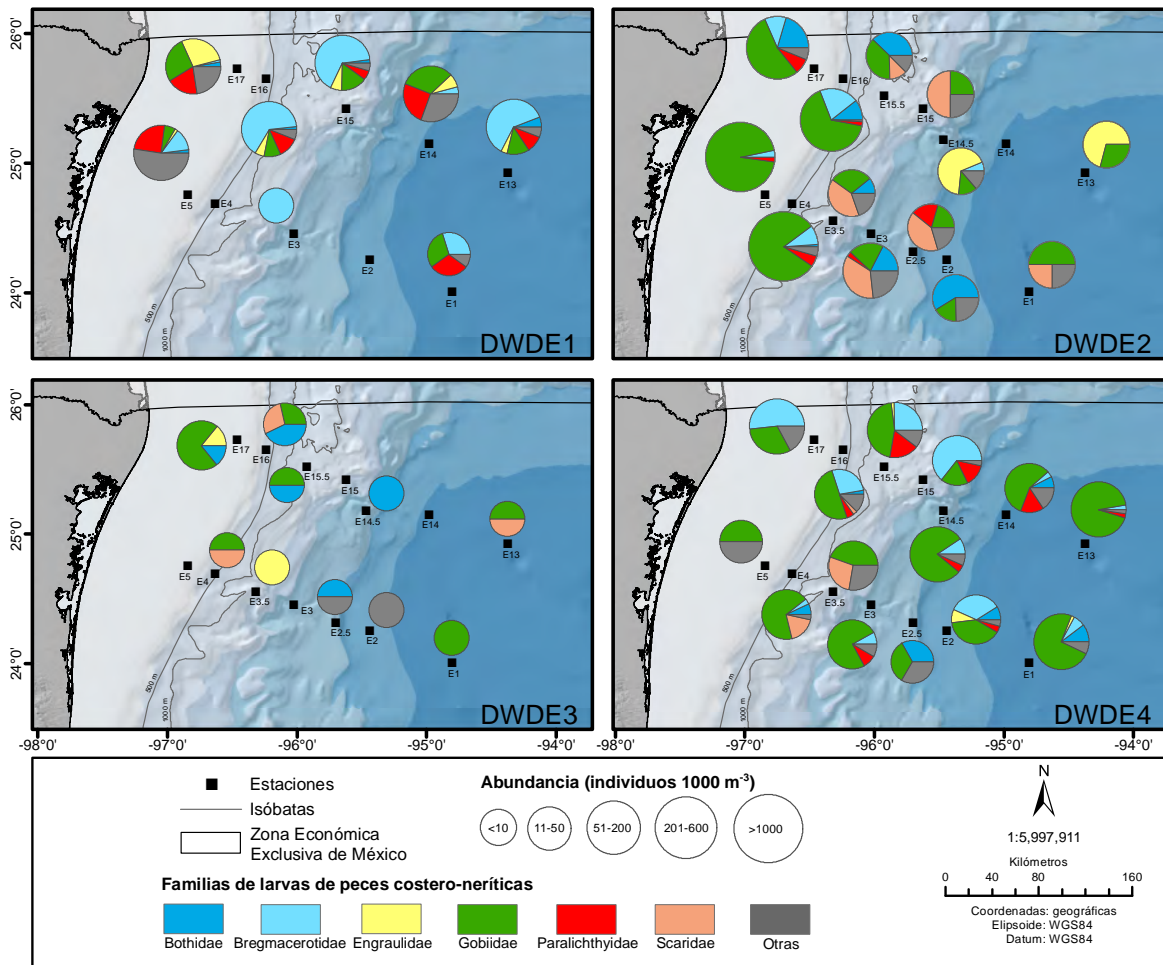


Figura 2. Abundancia y distribución espacial en nivel familia de los taxones costero-neríticos identificados en cada crucero. Se muestra la isóbata suavizada de 500 m y no suavizada de 1000 m.

Simulaciones de dispersión de partículas pasivas

Para evaluar la confiabilidad de los experimentos de simulación de trayectorias lagrangianas se examinó en detalle, para cada crucero, la coherencia entre los resultados físicos y biológicos. Se puede observar un alto grado de acuerdo entre ambas aproximaciones, ya que cuando se capturaron el mayor número de larvas de taxones costero-neríticos en estaciones oceánicas, durante el primer y último crucero (DWDE-1 y DWDE-4; Figura 2 arriba izquierda y abajo derecha, respectivamente), también se obtuvieron los mayores porcentajes de arribo de partículas desde las provincias de plataforma a las estaciones oceánicas (DWDE-1

y DWDE-4; Figura 3 arriba izquierda y abajo derecha, respectivamente). En contraste, durante el segundo y tercer crucero, las capturas de taxones costero-neríticos en estaciones oceánicas fueron mucho menores (DWDE-2 y DWDE-3; Figura 2 arriba derecha y abajo izquierda, respectivamente), y disminuyó la probabilidad de que las partículas proviniesen de las provincias de plataforma (DWDE-2 y DWDE-3; Figura 3 arriba derecha y abajo izquierda, respectivamente).

En cuanto a sus vías de dispersión y al porcentaje de partículas provenientes de cada provincia (Figura 4), en términos generales, puede observarse que las plataformas de Perdido, Tamaulipas y Texas son las principales fuentes de larvas a la región de aguas profundas de Perdido, mientras que

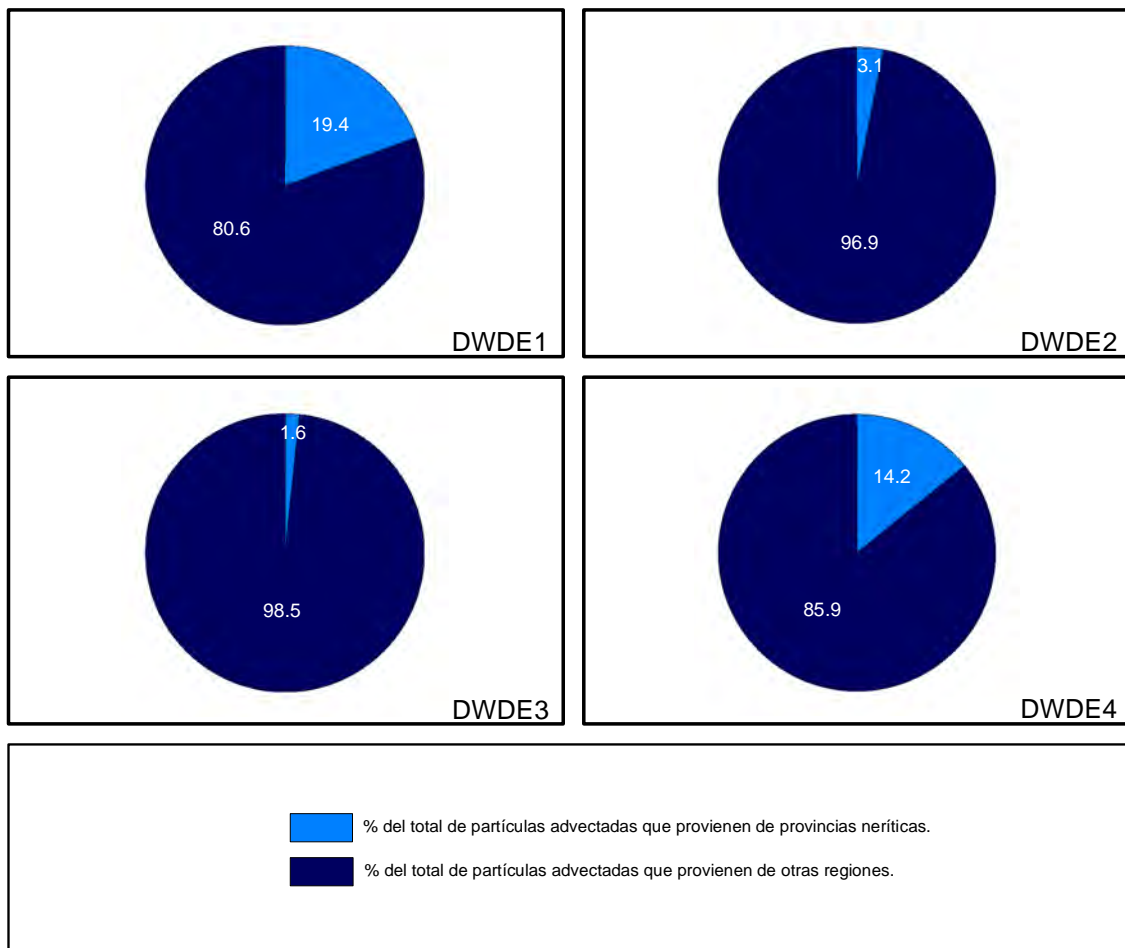


Figura 3. Porcentaje de partículas advectadas desde las estaciones oceánicas que provienen de provincias neríticas (azul claro) y de otras regiones (azul oscuro) para cada crucero.

el aporte de Veracruz norte, Campeche, Yucatán, Luisiana y Misisipi es mucho menor.

La coherencia entre las simulaciones de dispersión de partículas pasivas y los patrones de abundancia de larvas de peces en las estaciones oceánicas es refrendada al analizar la distribución de los taxones descritos como asociados a arrecifes de coral (véase detalle en Compaire *et al.*, en prensa). En las estaciones oceánicas, la abundancia de especies arrecifales, como *Ctenogobius* spp., *Chromis multilineata*, *Canthigaster* spp., *Callionymus bairdi*,

Bodianus rufus, *Halichoeres* spp., *Xyrichtys* spp., *Megalops atlanticus*, *Sparisoma* spp., *Kyphosus sectatrix*, fueron mayores cuando el origen de las larvas virtuales incluyó provincias de plataforma en las cuales se ha descrito la presencia de arrecifes de coral (norte de Veracruz, Campeche y Yucatán: Liddell, 2007; Texas y Luisiana: Nash, Furiness y Tunnell Jr, 2013).

El análisis de los campos de vorticidad relativa superficial durante las cuatro semanas anteriores a cada campaña muestra la presencia

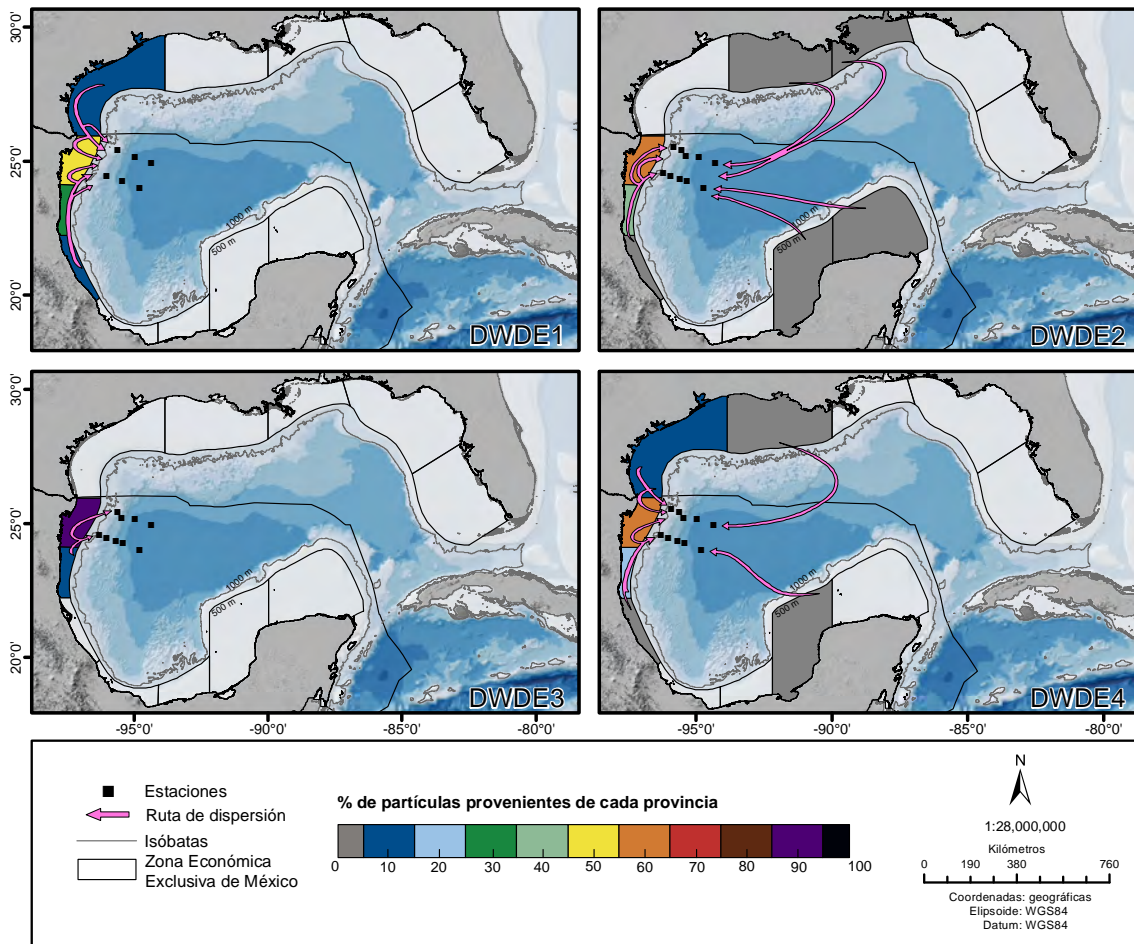


Figura 4. Resultados de los experimentos de dispersión de partículas pasivas en cada crucero. Los colores muestran la probabilidad de arribo de larvas a la región de aguas profundas del muestreo desde cada una de las provincias de la zona nerítica. Debe notarse que el porcentaje representa la proporción respecto al total de partículas que llegaron a la zona de muestreo desde la zona nerítica, y que ese total es, a su vez, una porción del total de partículas advectadas, siendo que también hay partículas que arriban desde otras regiones de aguas profundas, como se muestra en la Figura 3. Las flechas indican las vías de dispersión desde las diferentes provincias hacia las estaciones oceánicas de Perdido. Se muestra la isóbata suavizada de 500 y no suavizada de 1000 m.

de diferentes estructuras oceanográficas responsables de los patrones de dispersión descritos anteriormente. Durante DWDE-1 (Figura 5 arriba izquierda), destacó la presencia del frente de talud del oeste del golfo de México, el cual ya ha sido descrito anteriormente como de carácter persistente (Belkin *et al.*, 2009), y que abarca desde los 20 a 25-26°N. Esto limitaría el transporte entre la región oceánica de Perdido y las provincias de plataforma de Perdido, Tamaulipas y norte de Veracruz. También se observó la presencia de un frente que separa las estaciones de los transectos norte y sur, el cual sería responsable de las diferencias marcadas en la abundancia de taxones nerítico-costeros entre las estaciones de ambos transectos

(Figura 2 arriba izquierda). En la segunda campaña (DWDE-2; Figura 5 arriba derecha) el frente de talud se encontró debilitado, pero destacó un frente de gran intensidad al norte de la región de Perdido, el cual restringiría el transporte desde la provincia de plataforma de Texas hacia la zona de aguas profundas de Perdido. En la tercera campaña (DWDE-3; Figura 5 abajo izquierda) se observó cómo el frente de talud se extiende hacia el norte mucho más que en los otros cruceros, llegando incluso a los 27°N, y extendiéndose más allá del área de estudio. Esto limitaría el nivel de conectividad entre la región de aguas profundas de Perdido con las provincias de plataforma del oeste del GM. Por último, para la cuarta campaña (DWDE-4; Figura

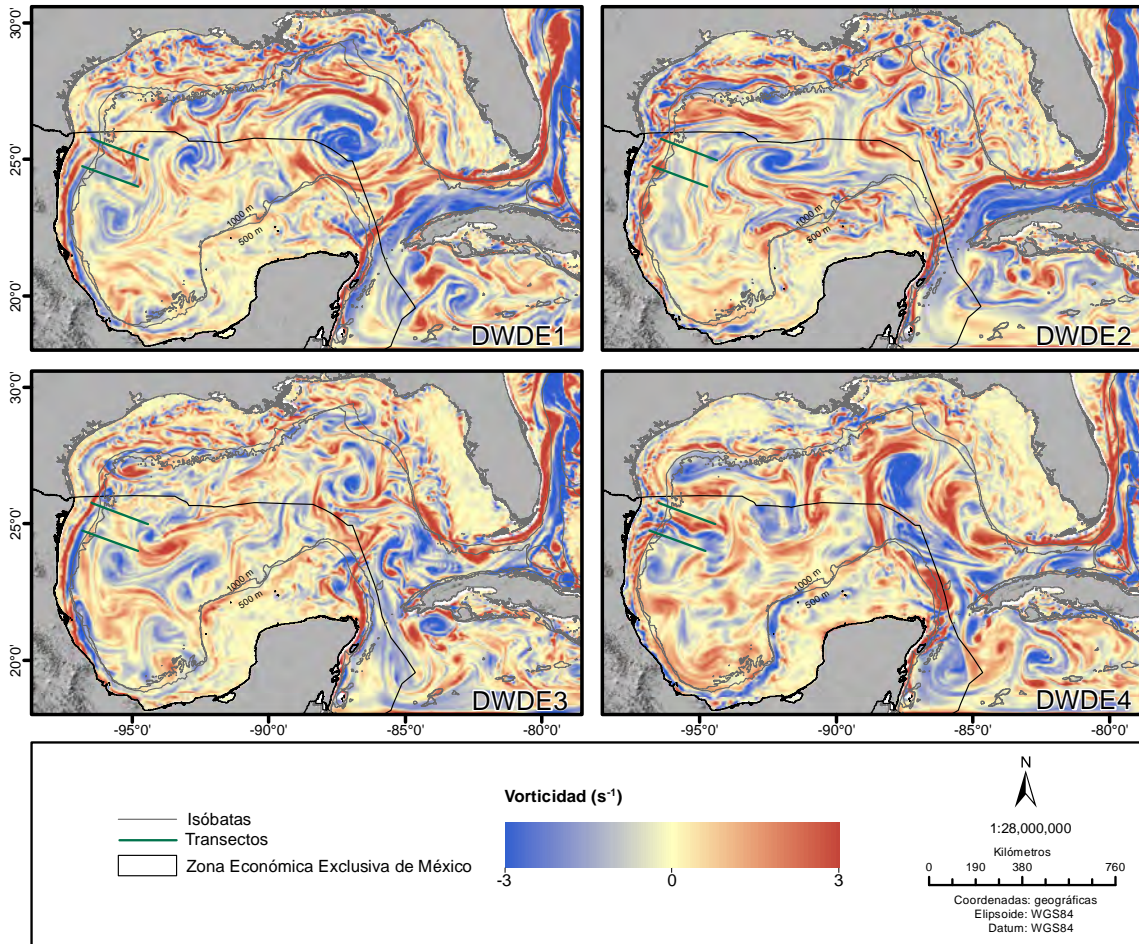


Figura 5. Mapas de la vorticidad relativa superficial en las cuatro semanas anteriores de cada crucero: DWDE-1 (26 de mayo de 2016), DWDE-2 (17 de septiembre de 2016), DWDE-3 (28 de marzo de 2017) y DWDE-4 (24 de octubre de 2017). Las líneas verdes indican las posiciones de los transectos norte y sur. Se muestra la isóbata suavizada de 500 m y no suavizada de 1000 m.

5 abajo derecha), se observó la presencia de una estructura anticiclónica hacia el sur y una ciclónica hacia el norte que confluyeron, lo que podría propiciar el transporte de las partículas desde la zona de plataforma de Perdido y el sur de Texas hacia las aguas profundas de la región de Perdido.

CONCLUSIONES

Los estudios de modelación de trayectorias lagrangianas proporcionan información sobre cómo las parcelas de agua se propagan en el océano (Maslo *et al.*, 2020). En este contexto, las predicciones precisas del transporte y el destino del petróleo derramado son esenciales para los planes de respuesta y mitigación (Daly *et al.*, 2020), ya que pueden aplicarse como una guía para predecir el transporte de contaminación en la superficie del océano (Gough *et al.*, 2019). Nuestros hallazgos revelan que la integración de la información taxonómica y de modelado también puede proporcionar información útil para evaluar el efecto de un derrame de petróleo sobre las comunidades biológicas en el noroeste del GM bajo condiciones de circulación oceánicas específicas, ya que uno de los factores más importantes que influyen en la resiliencia de las especies de peces continentales en el GM es el grado de conectividad entre las diferentes subregiones del golfo (Paris *et al.*, 2020).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Reconocemos a PEMEX por promover ante el Fondo la demanda específica sobre los derrames de hidrocarburos y el medio ambiente. Agradecemos a los participantes de los cruceros DWDE y a la tripulación del R/V Pelican por su invaluable apoyo en la recopilación de los datos de larvas de peces utilizados en este capítulo.

REFERENCIAS

Adam, M. S., Sibert, J., Itano, D., y Holland, K. (2003). Dynamics of bigeye (*Thunnus obesus*) and ye-

- llowfin (*T. albacares*) tuna in Hawaii's pelagic fisheries: Analysis of tagging data with a bulk transfer model incorporating size-specific attrition. *Fishery Bulletin*, 101(2), 215-228.
- Belkin, I. M., Cornillon, P. C. y Sherman, K. (2009). Fronts in Large Marine Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 81(1-4), 223-236. DOI: 10.1016/j.poccean.2009.04.015
- Carr, M. H. y Syms, C. (2006). Recruitment. En L. G. Allen, D. J. Pondella II y M. H. Horn (Eds.), *The Ecology of Marine Fishes: California and Adjacent Waters* (Issue 15) (pp. 411-427). University of California Press. <http://research.pbsci.ucsc.edu/eeb/rclab/wp-content/uploads/2012/01/Carr-and-Syms-Chapter-in-Allen-et-al-2006.pdf>
- Chassignet, E. P., Hurlburt, H. E., Smedstad, O. M., Halliwell, G. R., Hogan, P. J., Wallcraft, A. J., Baraille, R. y Bleck, R. (2007). The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4), 60-83. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.09.016
- Compaire, J. C., Pérez-Brunius, P. Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Rodríguez Outerelo, J., Echeverri García, L. del P., Herzka, S. Z. (En prensa). Connectivity of coastal and neritic fish larvae to the deep waters of the Perdido region (western Gulf of Mexico) inferred from in situ sampling and ocean circulation modelling. *Limnology and Oceanography*.
- Cowen, R. K., Paris, C. B. y Srinivasan, A. (2006). Scaling of Connectivity in Marine Populations. *Science*, 311(5760), 522-527. <https://doi.org/10.1126/science.1122039>
- Cummings, J. A. y Smedstad, O. M. (2013). Variational Data Assimilation for the Global Ocean. En S. K. Park y L. Xu (Eds.), *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications* (vol. II) (pp. 303-343). Springer Berlin Heidelberg.
- Cushing, D. H. (1996). *Towards a Science of Recruitment in Fish Populations*. Excellence in Ecology Series (vol. 7). Ecology Institute.
- Daly, K. L., Vaz, A. C. y Paris, C. B. (2020). Physical Processes Influencing the Sedimentation and Lateral Transport of MOSSFA in the NE Gulf of Mexico. En S. A. Murawski, C. H. Ainsworth, S. Gilbert, D. J. Hollander, C. B. Paris, M. Schlüter y D. L. Wetzel (Eds.), *Scenarios and Responses to Future Deep Oil Spills* (pp. 300-314). Springer

- International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-12963-7_18
- Daudén-Bengoa, G., Jiménez-Rosenberg, S. P. A., Compaire, J. C., del Pilar Echeverri-García, L., Pérez-Brunius, P., Herzka, S. Z. (2020). Larval fish assemblages of myctophids in the deep water region of the southern Gulf of Mexico linked to oceanographic conditions. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 155, 103181. DOI: 10.1016/J.DSR.2019.103181
- Fahay, M. P. (2007). *Early stages of fishes in the Western North Atlantic Ocean*. Northwest Atlantic Fisheries Organization.
- Felder, D. L. y Camp, D. K. (2009). *Gulf of Mexico Origin, Waters and Biota: Volume 1, Biodiversity* (D. L. Felder y D. K. Camp (Eds.)). Texas A&M University Press.
- Fodrie, F. J. y Herzka, S. Z. (2013). A Comparison of Otolith Geochemistry and Stable Isotope Markers to Track Fish Movement: Describing Estuarine Ingress by Larval and Post-larval Halibut. *Estuaries and Coasts*, 36(5), 906-917. DOI: 10.1007/s12237-013-9612-5
- Froese, R. y Pauly, D. (2019). FishBase. www.fishbase.org, version 12/2019.
- Fuiman, L. A. (2002). Special considerations of fish eggs and larvae. En L. A. Fuiman y R. G. Werner (Eds.), *Fishery Science: The unique contributions of early life stages* (pp. 1-32). Blackwell Science.
- Gough, M. K., Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Sheinbaum, J., Jouanno, J. y Duran, R. (2019). Persistent Lagrangian Transport Patterns in the Northwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 49(2), 353-367. DOI: https://doi.org/10.1175/jpo-d-17-0207.1
- Houde, E. D. (1994). Differences between marine and freshwater fish larvae: Implications for recruitment. *ICES Journal of Marine Science*, 51(1), 91-97. DOI: 10.1006/jmsc.1994.1008
- Houde, E. D. (2002). Mortality. En L. A. Fuiman y R. G. Werner (Eds.), *Fishery Science: The Unique Contributions of Early Life Stages* (pp. 64-87). Blackwell Science.
- Irisson, J. O., Leis, J. M., Paris, C. B. y Browman, H. I. (2009). Behaviour and settlement. En *Manual of Recommended Practices for Modelling Physical-Biological Interactions during Fish Early Life* (pp. 42-59). CES Cooperative Research Report 295. https://archimer.ifremer.fr/doc/00157/26792/
- Johnson, D. R., Perry, H. M. y Lyczkowski-Shultz, J. (2013). Connections between Campeche bank and Red Snapper populations in the Gulf of Mexico via modeled larval transport. *Transactions of the American Fisheries Society*, 142(1), 50-58. DOI: 10.1080/00028487.2012.720630
- Jones, C. M. (2002). Age and Growth. En L. A. Fuiman y R. G. Werner (Eds.), *Fishery Science: The Unique Contributions of Early Life Stages* (pp. 33-63). Blackwell Science.
- Kitchens, L. L., Paris, C. B., Vaz, A. C., Ditty, J. G., Cornic, M., Cowan, J. H. y Rooker, J. R. (2017). Occurrence of invasive lionfish (*Pterois volitans*) larvae in the northern Gulf of Mexico: characterization of dispersal pathways and spawning areas. *Biological Invasions*, 19(7), 1971-1979. DOI: 10.1007/s10530-017-1417-1
- Liddell, W. D. (2007). Origin and geology. En J. W. J. Tunnell, E. A. Chávez y K. Withers (Eds.), *Coral reefs of the southern Gulf of Mexico* (pp. 23-33). Texas A&M University Press.
- Maslo, A., Azevedo Correia de Souza, J., Andrade-Canto, F. y Rodríguez Outerelo, J. (2020). Connectivity of deep waters in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 203, 103267. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2019.103267
- Murawski, S. A., Peebles, E. B., Tunnell Jr, J. W. y Armenteros, M. (2018). Comparative Abundance, Species Composition, and Demographics of Continental Shelf Fish Assemblages throughout the Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*, 10(3), 325-346. DOI: 0.1002/mcf2.10033
- Nash, H. L., Furiness, S. J. y Tunnell Jr, J. W. (2013). What Is Known About Species Richness and Distribution on the Outer — Shelf South Texas Banks? *Gulf and Caribbean Research*, 25, 9-18.
- North, E. W., Gallego, A. y Petitgas, P. (2009). Looking to the future: recommendations and research needs. En *Manual of Recommended Practices for Modelling Physical-Biological Interactions during Fish Early Life* (pp. 83-107). CES Cooperative Research Report 295. https://archimer.ifremer.fr/doc/00157/26792/
- Olascoaga, M. J., Miron, P., Paris, C., Pérez-Brunius, P., Pérez-Portela, R., Smith, R. H. y Vaz, A. (2018). Connectivity of Pulley Ridge With Remote Locations as Inferred From Satellite-Tracked

- Drifter Trajectories. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5742-5750. DOI: 10.1029/2018JC014057
- Paris, C. B., Chérubin, L. M. y Cowen, R. K. (2007). Surfing, spinning, or diving from reef to reef: Effects on population connectivity. *Marine Ecology Progress Series*, 347, 285-300. DOI: 10.3354/meps06985
- Paris, C. B., Cowen, R. K., Lwiza, K. M. M., Wang, D. P. y Olson, D. B. (2002). Multivariate objective analysis of the coastal circulation of Barbados, West Indies: Implication for larval transport. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(8), 1363-1386. DOI: 10.1016/S0967-0637(02)00033-X
- Paris, C. B., Murawski, S. A., Olascoaga, M. J., Vaz, A. C., Berenshtein, I., Miron, P. y Beron-Vera, F. J. (2020). Connectivity of the Gulf of Mexico Continental Shelf Fish Populations and Implications of Simulated Oil Spills. En S. A. Murawski, C. H. Ainsworth, S. Gilbert, D. J. Hollander, C. B. Paris, M. Schlüter y D. L. Wetzel (Eds.), *Scenarios and Responses to Future Deep Oil Spills* (pp. 369-389). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-12963-7_22
- Pata, P. R. y Yñiguez, A. T. (2019). Larval connectivity patterns of the North Indo-West Pacific coral reefs. *Plos One*, 14(7), e0219913. DOI: 10.1371/journal.pone.0219913
- Planes, S., Jones, G. P. y Thorrold, S. R. (2009). Larval dispersal connects fish populations in a network of marine protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(14), 5693-5697. DOI: 10.1073/pnas.0808007106
- Puebla, O., Bermingham, E. y McMillan, W. O. (2012). On the spatial scale of dispersal in coral reef fishes. *Molecular Ecology*, 21(23), 5675-5688. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2012.05734.x
- Richards, W. J. (Ed.). (2005). *Early Stages of Atlantic Fishes*. CRC Press. DOI: 10.1201/9780203500217
- Roberts, C. M. y Hawkins, J. P. (2000). *Fully-protected marine reserves: a guide*. WWF Endangered Seas Campaign, University of York, Washington.
- Rooker, J. R., Dance, M. A., Wells, R. J. D., Ajemian, M. J., Block, B. A., Castleton, M. R., Drymon, J. M., Falterman, B. J., Franks, J. S., Hammerschlag, N., Hendon, J. M., Hoffmayer, E. R., Kraus, R. T., McKinney, J. A., Secor, D. H., Stunz, G. W. y Walter, J. F. (2019). Population connectivity of pelagic megafauna in the Cuba-Mexico-United States triangle. *Scientific Reports*, 9(1), 1-13. DOI: 10.1038/s41598-018-38144-8
- Roughgarden, J., Gaines, S. y Possingham, H. (1988). Recruitment dynamics in complex life cycles. *Science*, 241, 1460-1466. <http://www.sciencemag.org/content/241/4872/1460.short>
- Sanvicente-Añorve, L., Zavala-Hidalgo, J., Allende-Arandía, M. E. y Hermoso-Salazar, M. (2014). Connectivity patterns among coral reef systems in the southern Gulf of Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 498, 27-41. DOI: 10.3354/meps10631
- Siegel, D. A., Kinlan, B. P., Gaylord, B. y Gaines, S. D. (2003). Lagrangian descriptions of marine larval dispersion. *Marine Ecology Progress Series*, 260, 83-96. DOI: 10.3354/meps260083