TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

Supercómputo para el medio ambiente: paralelizando simulaciones de derrames en el mar

Gabriela Reséndiz Colorado
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0002-2421-6987

Rosario Romero Centeno
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0003-3840-5655

Jorge Zavala Hidalgo
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0002-2737-434X

Miguel Ángel Robles Roldán
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0003-1193-5576

Pável Ernesto Oropeza Alfaro
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0002-7464-1973

Recepción: 27 de febrero de 2026.
Aceptación: 25 de agosto de 2026.

Agosto 2026 • número de revista 17 • DOI: 10.22201/dgtic.26832968e.2026.17.133

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0). 2683-2968 |© 2026 TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior es editada por la Universidad Nacional Autónoma de México a través de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación. ISSN: 2683-2968. Reserva de Derechos de Autor: 04-2019-011816190900-203

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

Supercómputo para el medio ambiente: paralelizando simulaciones de derrames en el mar

Resumen

Las simulaciones numéricas de escenarios y pronósticos de trayectorias de derrames de hidrocarburos juegan un papel preponderante en la atención de estos incidentes. Uno de los principales retos es obtener estas simulaciones en corto tiempo. En este trabajo, se aborda la paralelización de simulaciones de derrames por medio del desarrollo de *scripts* en Bash y Python, lo cual permite aprovechar los múltiples nodos del *cluster* Ometéotl del Grupo Interacción Océano-Atmósfera del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAyCC) de la UNAM. Los resultados de la implementación de cómputo paralelo muestran una reducción del 77.8% en el tiempo de pared respecto a la versión secuencial, lo que permitió obtener 66 430 simulaciones de derrames en 36 horas. Por otro lado, las simulaciones de un solo pozo, considerando un derrame diario durante 26 años, tardaron 3 horas y 20 minutos en ejecutarse.

Palabras Clave: simulaciones de derrame, paralelización, PyGnome, derrames de hidrocarburo.

High-Performance Computing for the enviroment: Parallelizing oil spill simulations at sea

Abstract

Numerical simulations of oil spill scenarios and trajectory forecasts play a key role in responding to these incidents. An important challenge is producing these scenarios in a short time. This work presents the parallelisation of oil spill simulations through the

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

development of Bash and Python scripts, which enable the use of multiple nodes of the Ometéotl cluster at the Grupo Interacción Océano-Atmósfera of the ICAyCC, UNAM. The results of the parallel computing implementation showed a 77.8% reduction in the wall-clock time compared to the sequential version, enabling 66,430 simulations to be completed in 36 hours. Meanwhile, simulations of a single well with a daily oil spill over 26 years took 3 hours and 20 minutes to execute.

Keywords: *oil spill simulations, parallelization, PyGnome, hydrocarbon spills.*

Introducción

En México, la explotación de hidrocarburos es un sector importante de las actividades económicas. En 2024, poco más del 74% de la producción correspondió a campos ubicados en el Golfo de México (GoM, por sus siglas en inglés), lo que representa 1103 miles de barriles diarios [1]. Si bien la explotación petrolera en México genera importantes beneficios económicos, también conlleva considerables impactos ambientales cuando ocurren incidentes como los derrames de hidrocarburos. El GoM se encuentra en riesgo de sufrir tales impactos y, de hecho, dos de los más grandes derrames a nivel mundial ocurrieron ahí. El primero ocurrió en 1979, durante la perforación del pozo Ixtoc-I en la Sonda de Campeche. Se perdió el control del pozo, lo que resultó en un derrame que estuvo activo 289 días, periodo en el que se vertieron 3.4 millones de barriles [2]. Más recientemente, durante la perforación del pozo Macondo en aguas profundas estadounidenses, se presentó un derrame de 3.19 millones de barriles, que duró activo 87 días [3].

Cuando estos incidentes ocurren, se producen afectaciones en los ecosistemas marinos y se ha comprobado su efecto tóxico en una amplia diversidad de organismos, que van desde el plancton, los invertebrados, las aves y los peces, hasta los mamíferos marinos [4], [5]. Además, cuando el derrame no es controlado y el hidrocarburo arriba a las costas, se generan impactos negativos tanto en las actividades económicas como en las poblaciones que habitan las zonas costeras.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

Para controlar el derrame y minimizar los impactos negativos de estos incidentes, es necesario planear la atención y respuesta; con este objetivo, el pronóstico y los escenarios de la trayectoria del derrame juegan un papel preponderante. Por lo anterior, a nivel mundial, se han desarrollado diferentes programas de cómputo enfocados en esta tarea, algunos de código abierto y otros que requieren una licencia de pago. Sin embargo, en todos los casos, el costo computacional de ejecutar estos escenarios puede retrasar la obtención de la trayectoria probable y, por tanto, demorar la toma de decisiones para minimizar los impactos. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue implementar la paralelización de simulaciones de derrames de petróleo para construir escenarios probables basados en 9490 simulaciones, correspondientes a un derrame diario durante un periodo de 26 años, en tiempos reducidos de ejecución.

Configuración de las simulaciones de derrames

Las simulaciones de derrames de hidrocarburo fueron realizadas mediante el paquete PyGnome de la NOAA [6], que es una biblioteca de Python que usa una aproximación lagrangiana [7]. En esta aproximación, el hidrocarburo es representado por partículas virtuales, las cuales tienen una masa que depende del tipo de hidrocarburo que se esté simulando y se degrada por evaporación. La configuración de estas simulaciones requiere datos de viento a 10 m sobre la superficie y de corrientes oceánicas superficiales, obtenidos de simulaciones desarrolladas por el Grupo Interacción Océano-Atmósfera del ICAyCC-UNAM [8], [9], usando el modelo atmosférico Weather Research & Forecasting (WRF) y el modelo oceánico HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), respectivamente.

Para las simulaciones, se seleccionaron siete ubicaciones en tres regiones de explotación petrolera activa en el GoM: Plataforma de Tamaulipas, Plataforma de Tabasco y Sonda de Campeche. Los puntos de siembra de partículas corresponden a siete pozos activos reportados por la Secretaría de Energía de México [10] en el mapa de hidrocarburos [11] (Figura 1). Las simulaciones se configuraron en 2D, es decir, superficiales, considerando que todas las áreas de explotación se encuentran en aguas someras. Para cada pozo, se configuró una simulación diaria durante un periodo de 26 años, lo que resultó en 9490 simulaciones por pozo y 66 430 en total.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

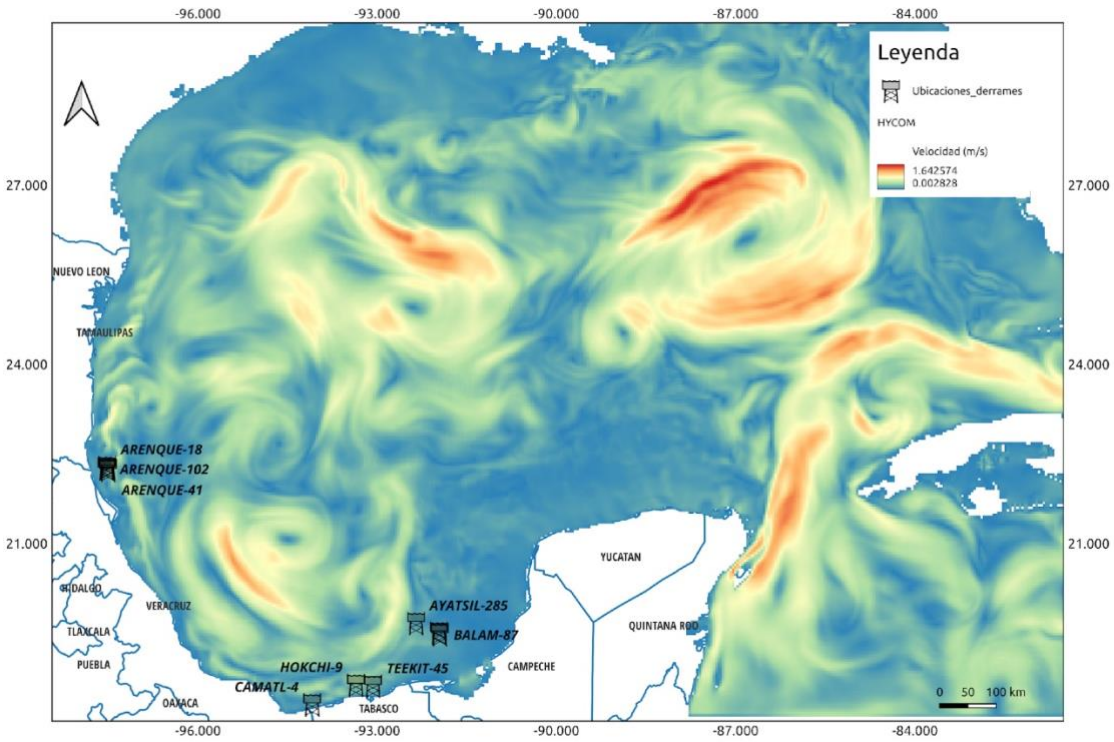


Fig. 1 - Área de estudio y ubicación de los pozos usados para simular los derrames hipotéticos. Para las simulaciones, se usaron los pozos ilustrados a excepción de Arenque-102 debido a la cercanía entre pozos en la región.

Estrategia de ejecución en modo secuencial

Las simulaciones de derrames realizadas con PyGnome usualmente se corren en modo secuencial, de acuerdo con el diagrama de bloques de la Figura 2. Bajo esta estrategia, se realiza sólo una simulación y, cuando ésta termina, se inicia la del siguiente día; todo ello por medio de un solo *script* en Python en el que las simulaciones son controladas por la estructura de control secuencial, conocida como *ciclo for*.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

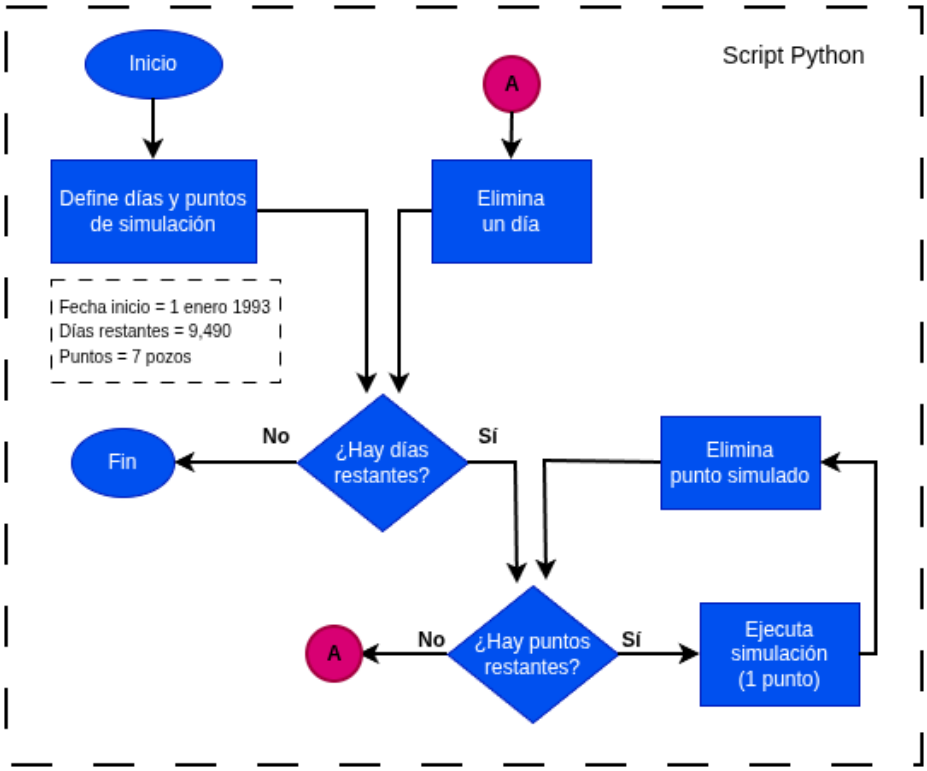


Fig. 2 - Flujo de trabajo para las simulaciones en modo secuencial.

Tomando en cuenta que los equipos de cómputo actuales cuentan con múltiples núcleos, esta forma de trabajo no es eficiente cuando es necesario realizar miles de simulaciones, como en el caso de este trabajo. Por ello, se desarrolló e implementó una estrategia de paralelización que permite hacer uso de los recursos computacionales de múltiples nodos de cómputo en un *cluster*.

Estrategia de ejecución en paralelo

Debido a la cantidad de simulaciones necesarias para construir los escenarios, se implementó una estrategia de paralelización en el *cluster* Ometéotl del Grupo Interacción Océano-Atmósfera del ICAyCC, UNAM. Para las ejecuciones, se usaron 10 nodos de cómputo del *cluster* con 24 núcleos por nodo. Cada nodo cuenta con procesadores de doble *socket*,

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

Intel Xeon E5-2670 V3 a 2.3 GHz y 128 GB de RAM. El sistema de archivos utilizado en el *cluster* es LUSTRE 2.15.52, implementado en una red Infiniband FDR a 56 GB/s. La gestión de trabajos de los usuarios en el *cluster* es administrada por el software gestor de recursos SLURM.

La metodología se implementó usando tres *scripts:* dos en Bash y uno en Python. El primero es un *script* maestro que se encarga de distribuir y enumerar la ejecución de todas las simulaciones (o tareas) en los núcleos disponibles. Cabe resaltar que, dado que las simulaciones se ejecutan en una infraestructura de cómputo compartida, no siempre se encuentran disponibles todos los recursos solicitados. El *script* maestro ejecuta por lotes el segundo *script*, que define, para cada tarea, las variables de entorno correspondientes al pozo y al número de día que se simulará, con base en el número de tarea asignado por la rutina maestra y el SLURM. Finalmente, el segundo *script* llama a la ejecución del *script* de Python (Figura 3).

El *script* de Python realiza la simulación para el pozo y el día especificados en las variables de entorno definidas previamente. Además, en este *script* se establecen los otros parámetros de la simulación: duración, volumen de hidrocarburo derramado, tipo de hidrocarburo, si se considerará degradación natural, datos de corrientes y viento, así como la configuración de los archivos de salida.

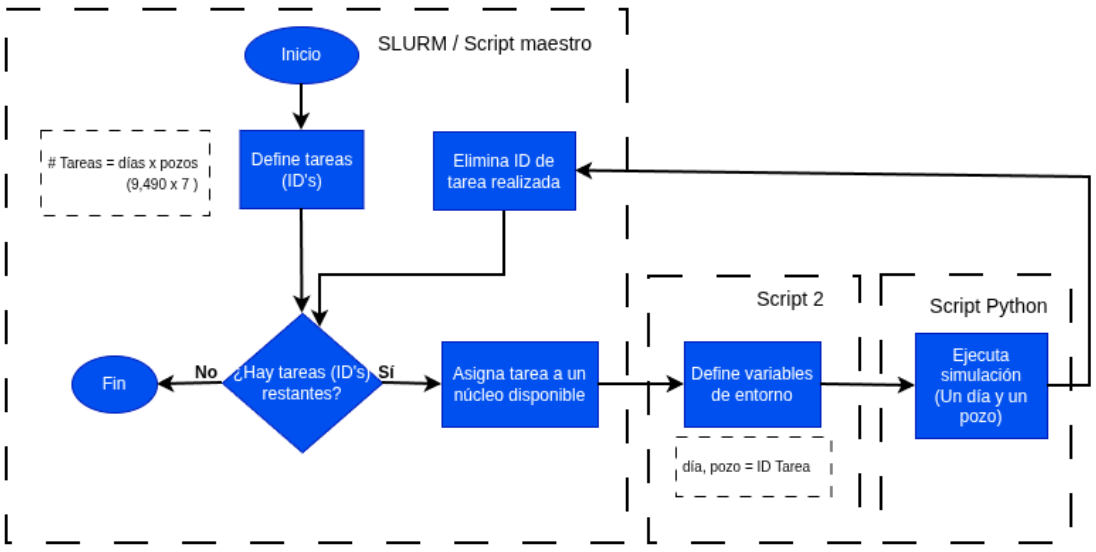


Fig. 3 - Flujo de trabajo para las simulaciones en modo paralelo.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

Basados en este desarrollo e implementación, se realizó la paralelización del análisis de resultados. Estos análisis consisten en que, por medio de una malla que cubre el GoM, se cuente la cantidad de partículas y se estime la probabilidad de la presencia de una partícula en cada píxel, así como la masa por píxel para cada uno de los días de la simulación. Estos cálculos son realizados para cada una de las cuatro temporadas del año. Considerando que se tienen 7 pozos, esto nos da como resultado la ejecución de 28 trabajos simultáneos.

Mejora en la eficiencia de ejecución

Las simulaciones implementadas de forma secuencial, en donde se corría una simulación por ejecución a través de un código en Python, resultaba en que el tiempo para obtener todas las simulaciones fuera de 6.75 días. Sin embargo, con la implementación en paralelo, se ejecutan de manera simultánea 240 simulaciones con un flujo de trabajo ininterrumpido, lo que permitió obtener una reducción en tiempo de ejecución de 4.5 veces (Figura 4). Con esto, el tiempo de cómputo se redujo en 77.8%, pasando de un tiempo de pared de casi una semana a 36 horas.

De esta manera, se pueden construir numerosos escenarios y analizarlos en cuestión de algunos días. Esta implementación es la base para la realización de escenarios bajo condiciones reales en caso de la ocurrencia de un incidente en México. En un caso realista, la ejecución se limitaría a un solo pozo y las simulaciones se requerirían para horizontes de pronóstico más cortos, por ejemplo, a siete o diez días. Bajo este supuesto, se realizaron simulaciones para un derrame activo de 90 días de duración para un solo pozo, considerando de nuevo un derrame diario durante 26 años, con un tiempo de ejecución de 3 horas y 20 minutos.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

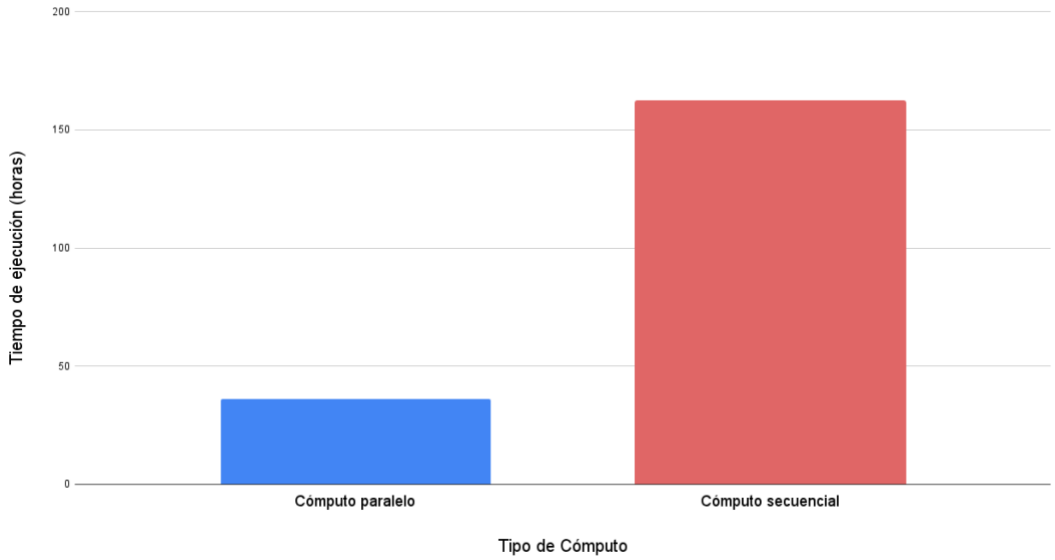


Fig. 4 - Comparativa del tiempo de ejecución con un núcleo contra el cómputo en paralelo utilizando 10 nodos con 24 núcleos por nodo.

Conclusiones

El uso del supercómputo para paralelizar la ejecución de simulaciones de derrames de hidrocarburos permitió reducir los tiempos de procesamiento, convirtiendo un proceso que duraba varios días en uno de pocas horas. Esta optimización permite aprovechar los recursos del *cluster* Ometéotl para generar miles de simulaciones en poco tiempo. La paralelización implementada en este trabajo puede servir como base para el desarrollo de sistemas operacionales que complementen los pronósticos de trayectorias con la generación de escenarios probabilísticos en caso de un derrame real. La importancia de este avance radica en que, ante una contingencia ambiental, el factor tiempo y el conocimiento de la posible trayectoria de la mancha son críticos para mitigar daños ecológicos y socioeconómicos. Esto permitirá ofrecer de manera eficiente información rápida y oportuna a las autoridades y equipos de respuesta para la protección de los ecosistemas marinos y poblaciones costeras.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

Agradecimientos

Estancia posdoctoral realizada gracias al programa de Becas Posdoctorales de la Universidad Nacional Autónoma de México (POSDOC).

Referencias

[1] Petróleos Mexicanos (PEMEX), *Anuario estadístico 2024*, 2024. [Online]. Available: https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/Anuario%20Estad%C3%ADstico%202024.pdf. Accessed: Sep. 2025.

[2] L. A. Soto, A. V. Botello, S. Licea-Durán, M. L. Lizárraga-Partida, and A. Yáñez-Arancibia, "The environmental legacy of the Ixtoc-I oil spill in Campeche Sound, southwestern Gulf of Mexico," *Front. Mar. Sci.*, vol. 1, p. 57, 2014, doi: 10.3389/fmars.2014.00057.

[3] J. Beyer, H. C. Trannum, T. Bakke, P. V. Hodson, and T. K. Collier, "Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 110, no. 1, pp. 28–51, 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.027.

[4] National Research Council, "Understanding the Risk," in *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects, Washington*, DC, USA: The National Academies Press, 2003, pp. 19–62.

[5] P. Chapman, T. L. Wade, and A. H. Knap, "Environmental Effects and Management of Oil Spills on Marine Ecosystems," in *Handbook of Oil Spill Science and Technology,* F. Fingas, Ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018, pp. 119–145, doi: 10.1201/9781315153933-5.

[6] NOAA Office of Response and Restoration (ORR), "PyGnome: General NOAA Operational Modeling Environment," [Online]. Available: https://github.com/NOAA-ORR-ERD/PyGnome. Accessed: Aug. 2025.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

TiES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior
www.ties.unam.mx

[7] NOAA Office of Response and Restoration (ORR), *PyGnome Documentation*, [Online]. Available: https://gnome.orr.noaa.gov/doc/pygnome/index.html. Accessed: Sep. 2025.

[8] R. Romero-Centeno, J. Zavala-Hidalgo, and J. P. Osuna-Cañedo, Eds., "Circulación oceánica y oleaje," in *Atlas de línea base ambiental del golfo de México*, vol. II, S. Z. Herzka *et al*., Coords., México: CIGoM, 2021.

[9] R. Romero-Centeno and J. Zavala-Hidalgo, Eds., "Meteorología," in *Atlas de línea base ambiental del golfo de México*, vol. I, S. Z. Herzka *et al*., Coords., México: CIGoM, 2021.

[10] Secretaría de Energía (SENER), "Sistema de Información de Hidrocarburos," [Online]. Available: https://sih-hidrocarburos.energia.gob.mx/. Accessed: May 2025.

[11] Secretaría de Energía (SENER), "Mapa Interactivo de Contratos y Asignaciones de Hidrocarburos," [Online]. Available: https://mapa-hidrocarburos.energia.gob.mx/. Accessed: May 2025.

2683-2968 | © 2026 UNAM. TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)