

Portafolio de las zonas de alta biodiversidad sensibles a impactos por actividades de exploración y explotación de la industria petrolera (hidrocarburos)

Equipo de trabajo:

PANGEA Consultores



Introducción

La identificación de zonas prioritarias para la conservación y protección de la biodiversidad marina es una tarea que requiere numerosas fuentes de información de distinta naturaleza con el fin de procurar la representación de la complejidad que la estructura y función ecosistémicas configuran en nuestros océanos, y que son la base del aprovisionamiento para las comunidades humanas y para el mismo sistema ambiental.

De manera particular, actividades extractivas como la industria petrolera es un factor de presión socioambiental para el que se requiere una estrategia clara y sustentada en datos duros para la implementación de estrategias de gestión efectivas y eficientes del territorio marino de nuestro país. Una de las herramientas de gestión que provee nuestro sistema legal es la figura de Salvaguardas, la cual se define en el Artículo 4º de la Ley de Hidrocarburos, el cual define a este instrumento como “Área de reserva en la que el Estado prohíbe las actividades de Exploración y Extracción de Hidrocarburos”.

La declaratoria de este instrumento requiere de un Dictamen Técnico que sustente su implementación, para lo cual es esencial el análisis detallado de la configuración espacial de la biodiversidad presente en el área de interés. En este contexto, es común enfrentarse al reto de poca disponibilidad de datos e información, particularmente cuando se requiere su referencia geográfica, para sintetizar su condición y configuración espaciotemporal, y es más común para los sistemas oceánicos.

En el Golfo de México el territorio marino que no se encuentra sujeto a ningún tipo de licitación o asignación para la exploración y explotación de hidrocarburos es mayormente la zona profunda y ultraprofunda de nuestra zona económica exclusiva. Se sabe que esta región oceánica alberga numerosos hábitats críticos, definidos por la Ley General de Vida Silvestre, para decenas de especies de alto interés para la conservación y para la industria pesquera.

En este contexto, se trabaja en un estudio con el objetivo general de integrar y analizar información socioeconómica y ambiental del sistema marino en territorio mexicano del Golfo de México a través de investigaciones bibliográficas y hemerográficas y su síntesis por expertos para brindar soporte científico a una futura estrategia de protección por la figura de Salvaguarda de la región de interés.

El objetivo específico de este Reporte fue evaluar y describir la configuración espacial de componentes faunísticos clave de la biodiversidad marina al interior de un área de interés para su protección como Salvaguarda en regiones profundas y ultraprofundas del Golfo de México.

Marco Conceptual

La megafauna marina incluye especies marinas de gran tamaño, entre las que se encuentran mamíferos, reptiles (tortugas) y aves, las cuales se caracterizan por ser vulnerables y emblemáticas, además de que cumplen funciones ecosistémicas críticas para la salud de los hábitats que ocupan (Fossi et al., 2012). Dadas sus características biológicas e historia de vida, estas especies son consideradas especies indicadoras, sombrilla y Prioritarias para la Conservación en México (Diario Oficial de la Federación, 2014), por lo que son de alto interés ecológico, y frecuentemente varias de ellas también son de interés económico. Tales condiciones hacen que estos grupos de grandes vertebrados sean considerados estratégicos para la gestión de los ecosistemas oceánicos que ocupan (Roberge y Angelstam 2002; Alonso-Aguirre y Lutz 2004; Alonso-Aguirre y Tabor 2004; Moore 2008; Fossi et al. 2014; Pracheil et al. 2016).

Estas especies sombrilla están directamente asociadas con la configuración de la red trófica subyacente en sus ecosistemas (Baum y Myers, 2004; Gallegos-Fernández et al., 2023). Un aspecto importante de las especies centinela es que exhiben una clara respuesta a cambios y variaciones ambientales, como la temperatura del agua, producción primaria, estructuras oceánicas de mesoescala, etc. (Hazen et al., 2016), así como a actividades antrópicas que ocurren en sus ámbitos hogareños. Algunos indicadores observables de atributos como la dieta, movimiento, ocupación de hábitat, en conjunto con variables ambientales físicas y biológicas esenciales, particularmente aquellas que son observables de forma sistemática y abarcando grandes áreas, sirven para describir el estado de los ecosistemas subyacentes a estas especies y permiten detectar anomalías y asociarlas a estresores naturales o antrópicos (Baum y Myers, 2004; Hazen et al., 2016).

Debido a que muchas de las especies de megafauna tienen un rol trófico importante como depredadores tope o secundarios, pueden ser utilizadas más efectivamente como indicadores de centros de agregación multiespecífica en los cuales se infiere una cadena trófica subyacente (Hooker y Gerber, 2004; Tittensor et al., 2010). Los centros de agregaciones bióticas pueden estar

determinados por interacciones tróficas como oportunidades de alimentación, o bien por corredores migratorios o destinos de reproducción de la megafauna marina (Palacios et al., 2006; Rooker et al., 2019). Los grandes peces pelágicos como atunes, picudos y tiburones, sumado a ciertas especies de mamíferos y tortugas marinos son componentes comunes de los ecosistemas pelágicos del GoM, ya que las condiciones ambientales proveen espacios críticos para el desove, alumbramiento, desarrollo y alimentación de estos grupos taxonómicos. En este contexto, la identificación de áreas ecológicamente sensibles para la biodiversidad marina pelágica y nectónica puede ser abordada a través del estudio de la presencia y distribución espacial de estos grandes vertebrados marinos.

Las actividades extractivas desarrolladas en nuestro océanos tienen un impacto significativo sobre este grupo de especies y en los últimos años sus poblaciones han disminuido a tasas que comprometen su viabilidad en el largo plazo (Capietto et al., 2015). Tales alteraciones provocan un desequilibrio que impacta negativamente el funcionamiento de los ecosistemas que ocupan, propiciando una cascada de efectos sobre los niveles tróficos inferiores (Ferretti et al., 2010; Estes et al., 2011). De manera particular, la industria petrolera en su conjunto tiene una influencia en diferentes formas e impacto en distintas magnitudes sobre las poblaciones y hábitats de estas especies de grandes vertebrados marinos, muchas de las cuales se han descrito para el Golfo de México, aunque principalmente se ha hecho para el norte de éste.

Una de las primeras actividades que se realiza en la industria petrolera para la identificación de yacimientos y su posterior extracción son los estudios sísmicos. La tecnología utilizada ha cambiado a lo largo de décadas de uso, hasta hoy en que la técnica más común es la de pistones neumáticos para estudios sísmicos 2D, 3D y 4D. Diversos autores han presentado evidencia diversa sobre los impactos negativos que esta tecnología tiene sobre mamíferos marinos, peces, tortugas marinas, aves, e incluso vertebrados pelágicos y bentónicos de interés ecológico y comercial (McCauley et al. 2000; Nowacek et al. 2015; Nelms et al. 2016). Esta condición hace que se requiera un análisis detallado de la distribución espacial y temporal de las especies reconocidas como sensibles en cualquier área donde se planea realizar trabajos de exploración petrolera.

En este estudio utilizamos especies de megavertebrados, planctónicas y bentónicas para identificar aquellas áreas en donde converge la mayor diversidad de ellas, y que dada su relevancia ecológica y económica para México y los países con los que comparte el Golfo de México, son estratégicas para proteger algunos de los elementos esenciales de la estructura y biodiversidad oceánica, que a la vez sostienen la capacidad de resistencia y resiliencia del sistema ante impactos por actividades extractivas y por el mismo cambio global (Maire et al., 2015; Dias et al., 2020; Farmer et al., 2022; Dunham et al., 2023).

Métodos

Definición del área de estudio

El área de estudio para la identificación de zonas de interés para la declaratoria de salvaguardas en zonas profundas y ultraprofundas del Golfo de México fue delimitada con base en los siguientes criterios geográficos y administrativos:

1. Se excluyó el área marina correspondiente a la plataforma continental.
2. Se excluyeron las áreas contractuales marinas definidas por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (<https://www.gob.mx/cnh/es>).
3. Se consideró un área de amortiguamiento en la frontera de la zona económica exclusiva de México con Estados Unidos, con base en el “Acuerdo entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América relativos a los Yacimientos Transfronterizos de Hidrocarburos en el Golfo de México”.

Considerando los criterios anteriores en el espacio geográfico de la zona económica exclusiva de México, el área de estudio abarca 346,068 km² de la zona marina profunda y ultraprofunda del Golfo de México. Esta región se caracteriza por una dinámica intensa promovida en buena medida por el tránsito de grandes remolinos que se desprenden de la Corriente de Lazo (Uribe-Martínez, 2021) y que han sido objeto de estudios oceanográficos detallados por su relevancia biótica y abiótica para esta cuenca (Leben, 2005; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009; Salmerón-García et al., 2010; Callejas et al., 2012; Mirón et al., 2017; Uribe-Martínez et al., 2019).

Compilación y control de calidad de datos de biodiversidad

Los datos de la distribución de especies marinas en el área de estudio se obtuvieron de dos grupos de fuentes principales: bases de datos públicas nacionales e internacionales; y de publicaciones científicas disponibles. Todas las fuentes de datos son citadas en el reporte para fines de los créditos correspondientes.

Dadas las características físicas de la región del Golfo de México que es de interés para este análisis, zonas profundas y ultraprofundas, en la búsqueda de datos se consideraron principalmente especies de hábitos pelágicos y planctónicos, entre los que se incluyó grupos ubicados en la base trófica como son el ictiopláncton (que incluye estadios de vida tempranos de especies de interés comercial), algunos peces bentónicos (su ciclo de vida está ligado al fondo marino), y grandes vertebrados que utilizan la columna de agua como hábitats críticos para completar su ciclo de vida y no tienen la necesidad de contacto con el fondo marino. El último grupo mencionado incluye a mamíferos marinos, tortugas marinas, tiburones pelágicos y algunos de hábitos bentónicos, así como peces de interés comercial que habitan la columna de agua (atunes, picudos, dorados, y otras especies).

En el caso de las bases de datos públicas, las principales fuentes fueron Ocean Biodiversity Information System Spatial Ecological Analysis of Megavertebrate Populations (OBIS-SEAMAP, <https://seamap.env.duke.edu/>), Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <https://www.gbif.org/>) y iNaturalist (<https://www.inaturalist.org/>). En la sección de Referencias podrá encontrar detalles sobre los créditos de las bases de datos que fueron consultadas a partir de estos motores de búsqueda públicos de registros de biodiversidad marina.

La búsqueda se restringió al período entre 1990 y 2024, y los registros encontrados fueron descargados y homologados en matrices estándares que contienen los siguientes datos: especie (nombre científico), grupo, coordenadas, tipo de fuente (publicación, base de datos digital), año de registro, referencia y fuente (nombre de la base de datos o autor de la publicación). Estos datos fueron integrados en un sistema de información geográfica utilizando los software libres R y QGIS.

Por otro lado, se realizó una búsqueda en la internet para localizar publicaciones que incluyeran datos e información de la distribución espacial de los grupos de fauna antes mencionados. Se extrajeron datos de distribución espacial de la literatura pública encontrada, tanto contenida en

tablas como en mapas que fueron digitalizados y georreferidos para su análisis. En este caso se construyeron capas espaciales con los datos georreferidos de las ubicaciones publicadas.

Entre las fuentes de información en la literatura se trabajó con algunos casos de mapas con polígonos de zonas de distribución de los grupos de interés. Particularmente para el caso de las comunidades planctónicas (Chaetognata, Copepoda, ictioplancton), se georrefirieron y digitalizaron los polígonos reportados (Herzka et al., 2021), a cada polígono se le asignaron los valores de abundancia de individuos y volumen de biomasa según correspondía, para posteriormente generar una capa de puntos que correspondieron a sus centroides. A partir de los centroides se realizó un análisis geoestadístico de interpolación por kriging ordinario (con base en modelos esféricos y gaussianos) para la generación de capas espaciales con valores numéricos continuos de cada una de las comunidades planctónicas.

Una vez obtenidos los datos de cada una de las fuentes, éstos se homologaron y dividieron en seis grupos distintos: mamíferos marinos, peces, atunes, tiburones, tortugas y plancton. Junto con la homologación de los metadatos de los registros se filtraron aquellos registros que estuvieran en tierra y aquellos a menos de 500 m de la línea de costa. Finalmente, se hizo una revisión detallada del listado de especies integrado con el fin de eliminar errores de reportes de especies que no se distribuyen en el Golfo de México. Así, se llegó a un conjunto de capas vectoriales homologadas de registros de las especies de interés en el área de estudio (Figura 1).

Así, esta etapa concluyó con capas vectoriales de puntos estandarizadas de las especies de los cinco grupos de grandes vertebrados analizados, y capas espaciales continuas de valores de abundancia y biomasa de la comunidad zooplanctónica analizada. Todo el proceso de integración, sistematización, georreferenciación y análisis geoestadístico se realizó utilizando los programas libres R y QGIS, incluyendo un conjunto de complementos y paquetes especializados para los distintos análisis.

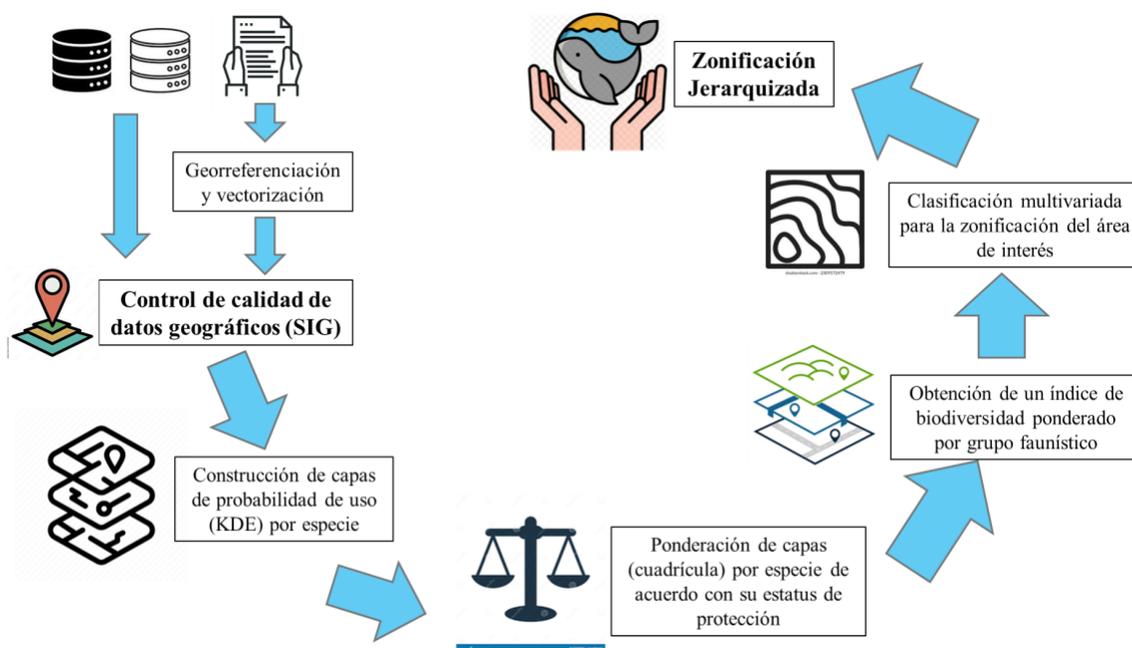


Figura 1. Diagrama de flujo de los pasos generales implementados para la identificación de las áreas propuestas para salvaguarda de biodiversidad marina en aguas profundas y ultraprofundas del Golfo de México.

Síntesis de la configuración espacial de la biodiversidad

La descripción de la distribución espacial de los elementos de la biodiversidad marina ha sido abordada de distintas maneras cuantitativas, siendo una de las más comunes la estimación de kernel de densidad (KDE) (Chen, 2017), en el cual se estima la probabilidad de uso del espacio por una especie de interés. Esta herramienta brinda versatilidad y parsimonia al estudio de la ocupación de los espacios naturales, e incluso antropizados, por la fauna (Lyon et al., 2011; Denoel y Ficetola, 2015; Dong et al., 2020). Los KDE integrados y analizados en sistemas de información geográfica con operaciones algebraicas y multicriterio son una herramienta poderosa ampliamente utilizada para la identificación de áreas naturales protegidas e identificación de áreas prioritarias para manejo (Zhao et al., 2020).

Se construyeron superficies de probabilidad de uso para cada una de las especies utilizando la aproximación KDE (Chen, 2017), utilizando como insumo los registros puntuales de cada una de las especies analizadas. Todas estas capas fueron generadas y compiladas en un sistema de información geográfica utilizando el programa QGIS. De esta manera, hasta aquí se generaron capas continuas de la probabilidad de uso y ocupación de los seis grupos faunísticos evaluados.

En un siguiente paso, se construyó una rejilla de polígonos cuadrados de 5 km x 5 km que se usó para las operaciones algebraicas de mapas en los siguientes pasos. Los valores de los KDE y capas interpoladas de la totalidad de especies fueron transferidos a rejillas cuadrículas, para lo cual se utilizaron relaciones topológicas entre capas en el programa QGIS. Al final, se obtuvieron cinco rejillas, una por cada grupo de especies de grandes vertebrados, con los valores de la abundancia de registros geográficos compilados. En el caso de las comunidades planctónicas, se realizó una operación topológica entre capas espaciales para asignar a cada celda de la rejilla cuadrícula los valores promedio de las unidades mapeadas.

Con el fin de resaltar la relevancia de la presencia en el área de interés de especies en alguna categoría de protección nacional (NOM-059-SEMARNAT-2010) o internacional (Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres), se asignaron valores de ponderación a cada una de dichas categorías (Tabla 1), y tales valores se utilizaron como constantes de ponderación para los valores de probabilidad de uso y ocupación de todas las especies. Estas operaciones ocurrieron en las rejillas vectoriales de cada especie.

Una vez que las rejillas de todas las especies fueron ponderadas con base en su estatus de conservación, se sumaron los valores ponderados para cada especie en sus rejillas, para obtener un índice de conservación para cada uno de los seis grupos analizados en la región de interés.

Tabla 1. Valores de ponderación asignados para los distintos instrumentos de política pública de protección de la biodiversidad evaluados en este estudio.

Instrumento	Valor ponderación
NOM-059-SEMARNAT-2010	0.5336
Lista Roja de la UICN	0.2668
Anexos CITES	0.1334
Sin protección	0.0667

Zonificación del área de interés para protección por salvaguarda

El polígono completo es del interés para la gestión de su designación como salvaguarda, y para eso la descripción de la configuración espacial de cada uno de los seis grupos analizados aporta sustento técnico cuantitativo que junto con las condiciones socioeconómicas robustece la propuesta de protección.

Adicionalmente, se realizó un análisis multivariado de agrupación basado en una clasificación no supervisada (k-medias) desarrollado por Jain (2010), con el que se identificaron grupos de hexágonos (clases) que tienen una estructura similar en cuanto a la presencia de los grupos de especies analizados y la intensidad de su presencia. Para esto se utilizó la herramienta Agrupación basada en atributos (Kazakov, 2022) que es un complemento del programa QGIS.

Finalmente, como forma de validación de que tales áreas identificadas fueran las de mayor valor de biodiversidad, se definió un conjunto de 100 puntos aleatorios dentro del área de estudio, pero sin caer en las zonas identificadas, y se extrajo el valor del índice de biodiversidad en cada sitio para integrarlo en una matriz de datos. De forma paralela, se distribuyeron otros 100 puntos aleatorios al interior de los polígonos de las zonas de salvaguarda propuestos y se extrajeron sus valores de índice de biodiversidad. Se aplicó una prueba estadística no paramétrica para comparar ambos grupos.

Resultados

Compilación y control de calidad de datos de biodiversidad

Se obtuvieron registros de ubicaciones de 86 especies de vertebrados marinos, divididos en cinco grandes grupos: mamíferos (n=23), peces de interés comercial y ecológico (n=15), tiburones (n=33), tortugas marinas (n=5) y túnidos (n=9).

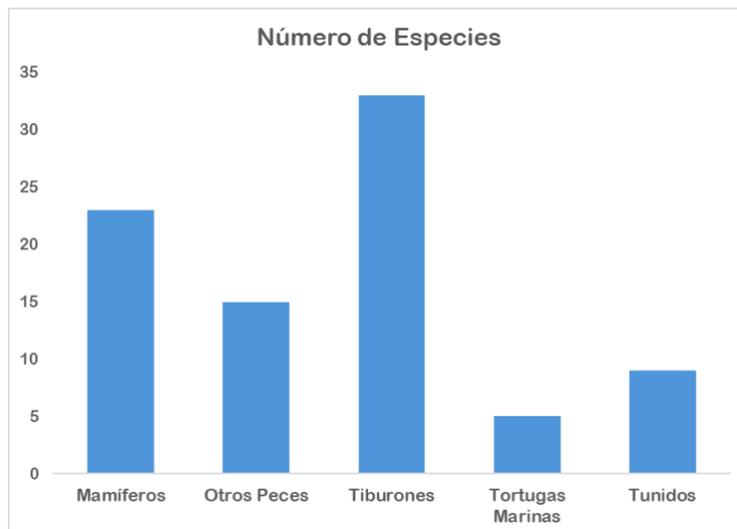


Figura 2. Distribución por grupos de vertebrados de las 86 especies evaluadas con presencia en las regiones profunda y ultra profunda del Golfo de México.

Asimismo, después de la revisión de publicaciones y datos geográficos disponibles se incluyeron tres grupos clave de las comunidades planctónicas en el área de interés: las familias Copepoda y Chaetognata, junto con la comunidad ictioplanctónica por su relevancia particularmente para la industria pesquera de la región.

Derivado del análisis del estatus de protección de las especies de vertebrados marinos e invertebrados planctónicos, los mamíferos y las tortugas son los grupos de especies que están plenamente protegidos por la norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, por lo que su presencia en zonas particulares del área de interés tiene una gran relevancia. En el caso del resto de los peces (tiburones, túnidos y otros peces), con excepción de un número mínimo de especies, en su gran mayoría estos grupos no están representados en esta norma oficial mexicana.

En lo que respecta a los Apéndices de CITES, todas las especies de mamíferos y tortugas están enlistadas en este instrumento internacional, mientras que el máximo porcentaje de presencia de los grupos de peces fue cerca del 70% (tiburones) y un 10% para túnidos. Finalmente, en lo que respecta a la Lista Roja de la UICN, todas las especies de tortugas marinas tienen alguna categoría de protección para su conservación, seguidas por los tiburones con más del 90% de sus en alguna categoría de este instrumento, y siendo los túnidos el grupo con el menor porcentaje (20%) en esta Lista Roja (Figura 3).

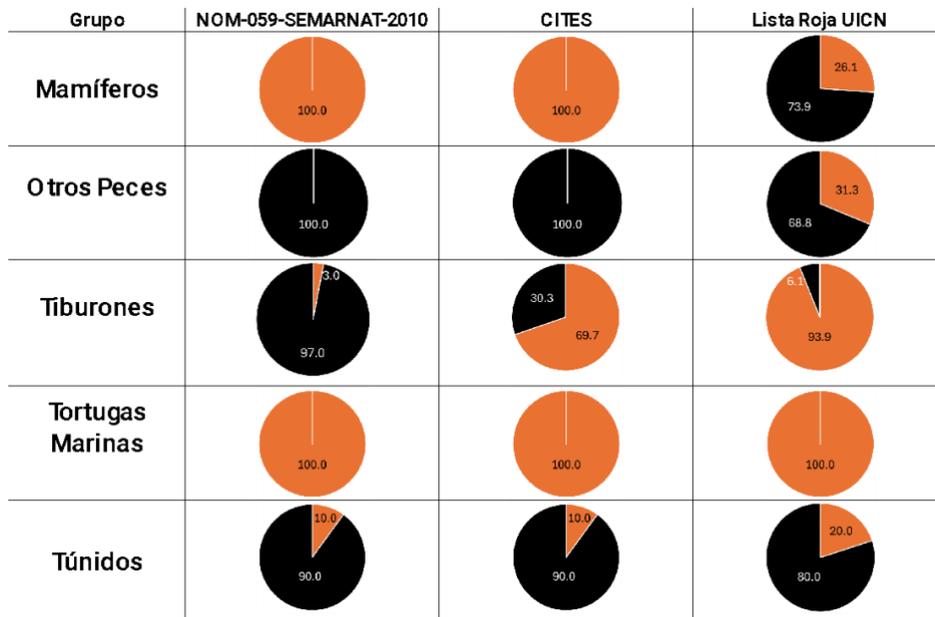




Figura 3. Porcentajes de especies analizadas que se encuentran en alguna categoría de protección en instrumentos nacionales e internacionales.

Síntesis geográfica de la biodiversidad

De la reconstrucción de la distribución de especies para el sur del Golfo de México, clasificadas en grupos de interés, se observa que las especies de peces, particularmente de túnidos (del género *Thunnus* principalmente, Figura 4), bonitos (*Sarda sarda*, *Acanthocybium solandri*), huachinangos (género *Lutjanus*) y dorados (género *Coryphaena*) (Figura 5) imprimen una presencia altamente importante en las aguas profundas del GoM asociados fuertemente a las zonas de giros y remolinos provenientes de la corriente de Lazo.

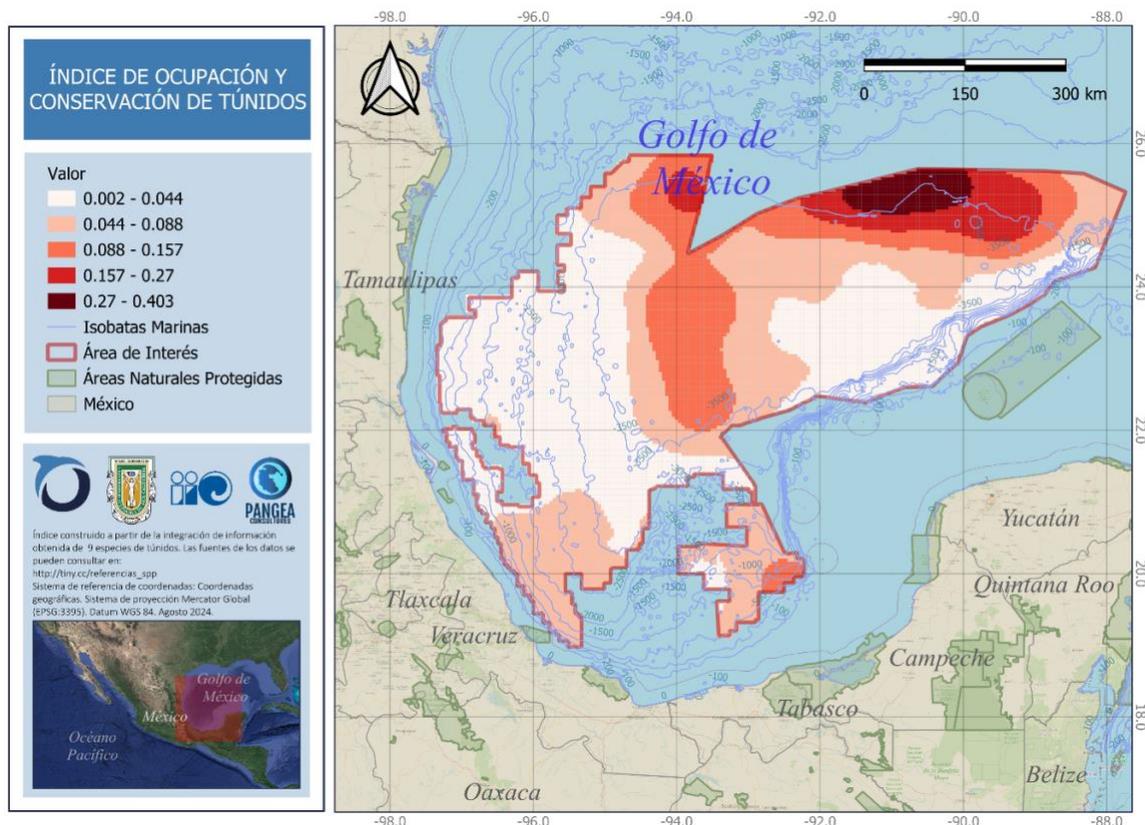


Figura 4. Distribución de la presencia ponderada por importancia de conservación de las especies de túnidos del área.

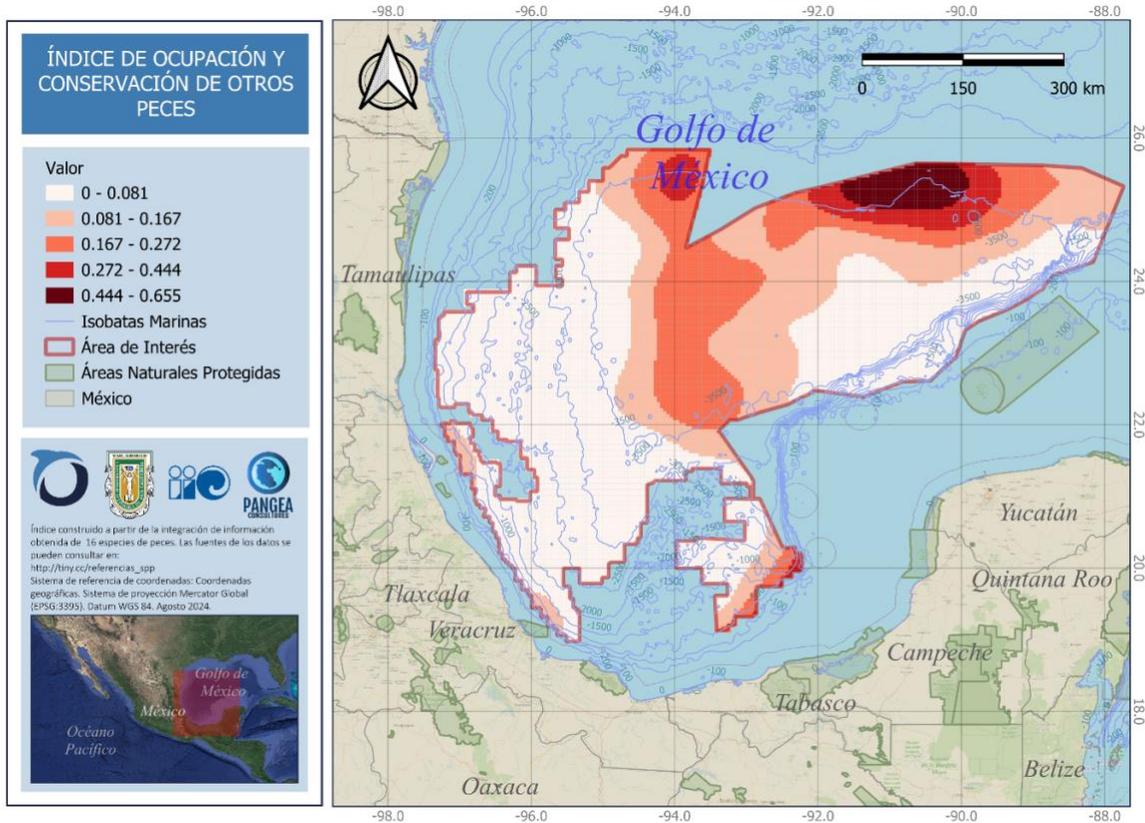


Figura 5. Distribución de la presencia ponderada por importancia de conservación de diferentes especies de peces de interés comercial del área.

En ese sentido, la distribución del zooplancton, caracterizado en este análisis por la diversidad de especies de Chaetognata, Copepoda e Ictioplancton muestra un patrón espacial que da cuenta de la importancia de la exportación de biomasa planctónica de las zonas costeras del sur, pero también una conexión importante con la zona de desprendimientos de giros de la corriente de Lazo, proceso fundamental en el arrastre de aguas cálidas y material larval desde el caribe y que alimenta las aguas profundas del Golfo de México (Figura 6).

La importancia del zooplancton radica en que proporciona la principal ruta de transferencia de energía y materia orgánica desde los productores primarios hasta los niveles tróficos superiores, sustentando gran parte de la productividad secundaria. El 98% de la biomasa marina corresponde a las multitudes de organismos del fitoplancton y zooplancton, que son en su mayoría microscópicos

(Sullivan y Kremer, 2011; Bertram et al., 2017). De esta manera, el zooplancton es el alimento de muchos miembros de la fauna marina, como algunos peces filtradores (por ejemplo, el tiburón ballena y las mantarrayas), aves, tortugas y mamíferos marinos, y la gran ballena azul.

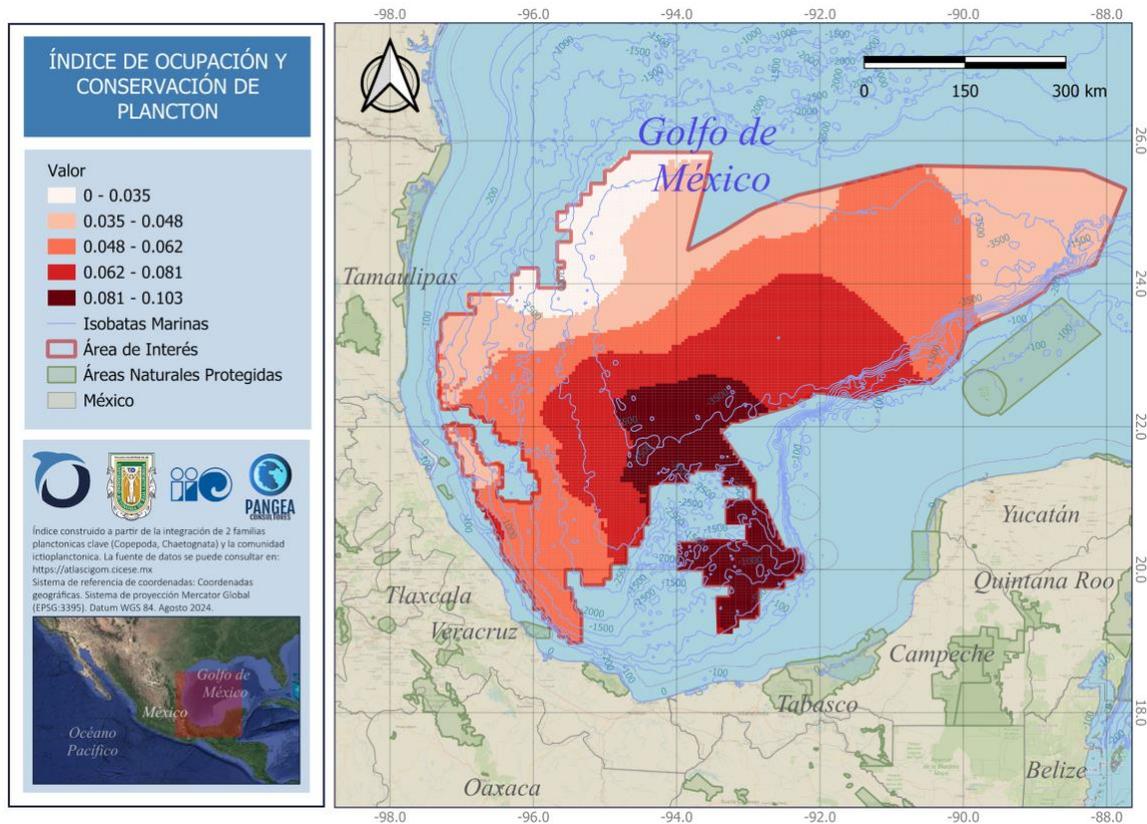


Figura 6. Distribución de la presencia de diferentes grupos de zooplancton del área.

Considerando que la distribución de la biodiversidad marina tiene una estrecha relación con la distancia a la costa, para evaluar la importancia de zonas profundas para especies asociadas con la profundidad se requirió considerar la distribución completa de la zona de estudio, para generar superficies continuas que estimaran la presencia de las especies a lo largo del área de interés. Por ejemplo, para el caso de las tortugas marinas, especies altamente sensibles a los efectos de la industria petrolera costera, se sabe que las poblaciones residentes de la región norte y sur están conectadas por corredores migratorios que incluyen una fracción importante de la Bahía de Campeche, e inclusive trayectos que abarcan la zona profunda por debajo de los 1000 m (Figura

7). Sin embargo, una de las especies de tortugas marinas más preocupantes por su estado de conservación, la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*), utiliza zonas ultra profundas como sitios de alimentación, por su caparazón suave que le permite explotar los recursos alimenticios presentes en toda la columna de agua, particularmente de regiones con giros y remolinos profundos donde se concentra el zooplancton oceánico. Es por esto que la zona de mayor valor de conservación de la zona profunda está relacionada con la zona de desprendimientos de los giros anticiclónicos de la corriente de Lazo, pero también, con el área cercana a Cayo Arcas, donde tortugas verdes (*Chelonia mydas*), lora (*Lepidochelys Kempii*), carey (*Eretmochelys imbricata*) y algunas caguamas (*Caretta caretta*) realizan su cruce migratorio sobre la zona sur de la Bahía de Campeche.

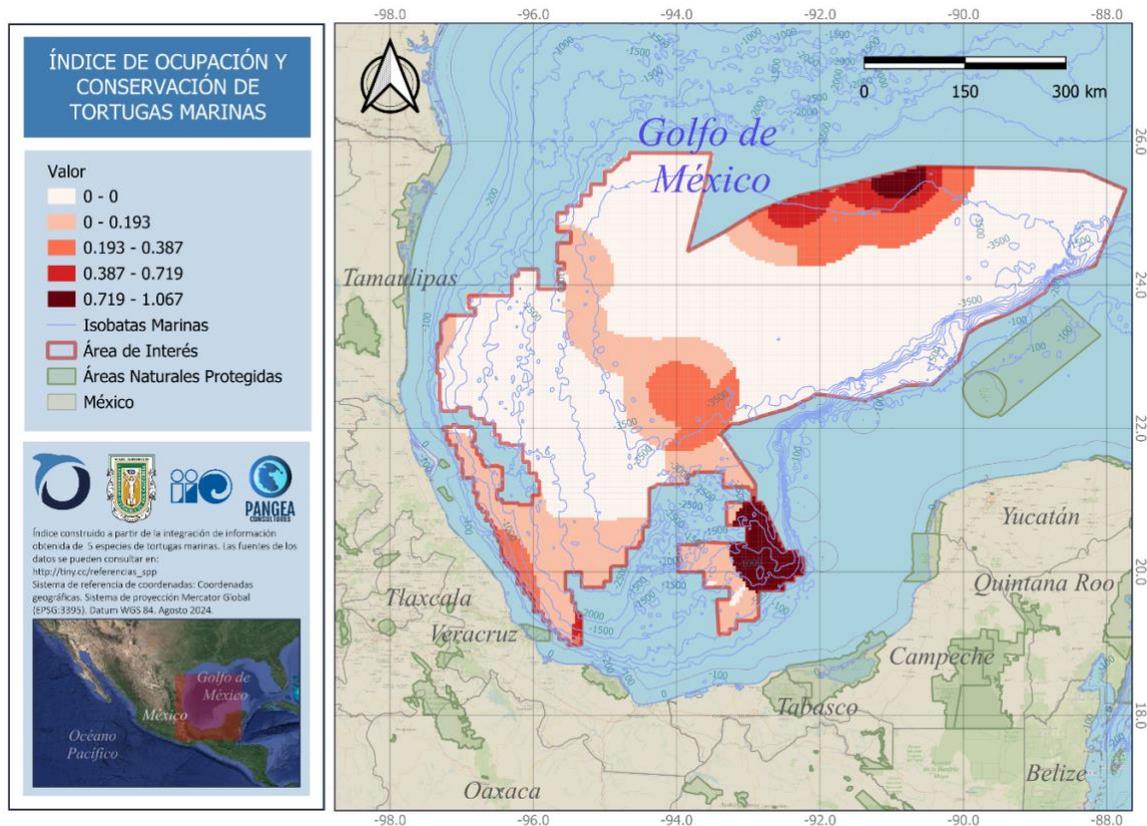


Figura 7. Distribución de la presencia ponderada por importancia de conservación de las cinco especies de tortugas marinas presentes en la región de interés.

En ese mismo sentido del uso del espacio de las tortugas marinas, la mayoría de mamíferos presentes en el Golfo de México, están fuertemente asociados a la zona costera como las abundantes toninas (*Tursiops truncatus*) o el delfín moteado del Atlántico (*Stenella frontalis*). Sin embargo, algunas de estas especies de *Stenella* spp. y ballenas piloto (calderones), pueden realizar excursiones largas hacia zonas profundas en búsqueda de alimento o migraciones reproductivas.

Por otro lado, mamíferos de alta importancia de conservación como el cachalote (*Physeter macrocephalus*) hacen un uso extensivo de la zona profunda del GoM fuertemente asociados a los giros productivos de la cuenca, llegando incluso a realizar excursiones lentas y largas sobre los bordes del talud continental de la Bahía de Campeche. Otras especies de grandes mamíferos como la ballena jorobada o las orcas realizan recorridos y excursiones esporádicas a la región de interés. A pesar del que se reconoce la presencia de más de una veintena de especies de mamíferos marinos en el sur del GoM, es uno de los grupos con menor cantidad de información espacialmente explícita y de uso del espacio en zona oceánica, representando un gran vacío de información para especies altos niveles de amenaza o riesgo de extinción.

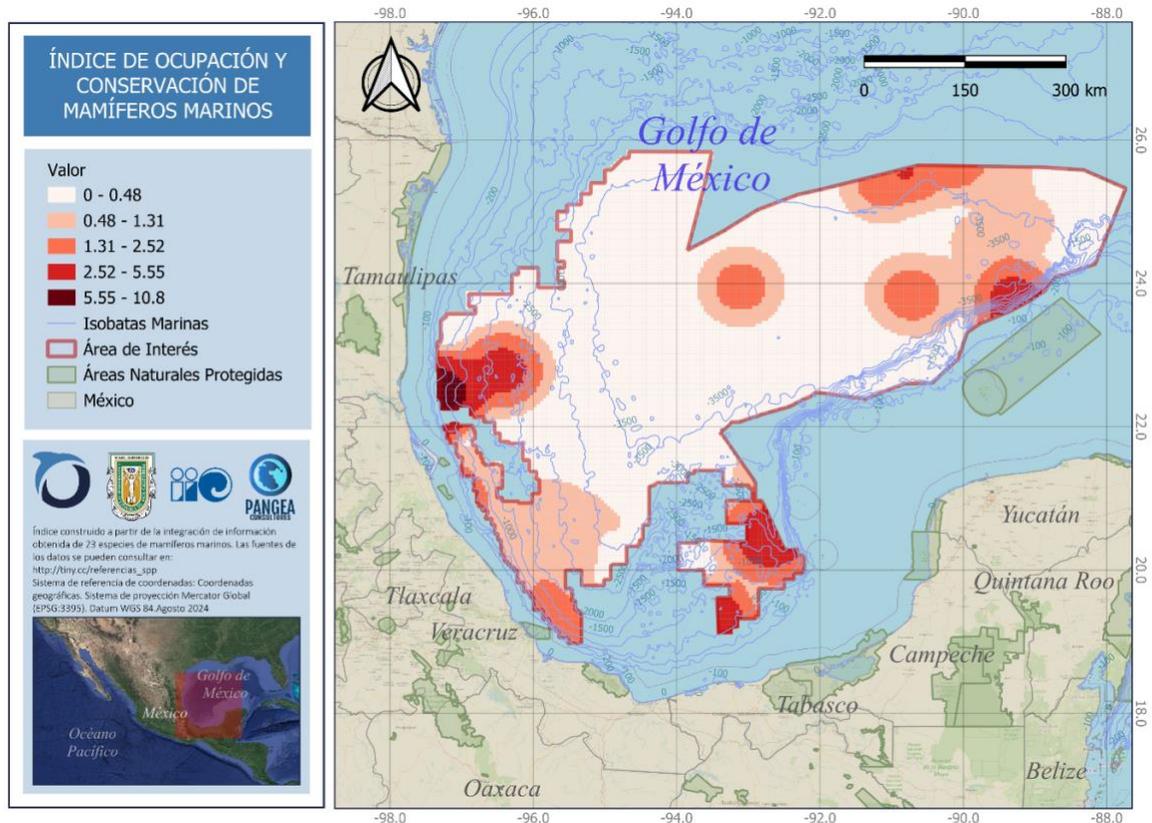


Figura 8. Distribución de la presencia ponderada por importancia de conservación de especies de mamíferos marinos presentes en la región de interés.

Finalmente, otro grupo de peces que se presenta en este trabajo son los tiburones por ser un conjunto de especies de alta importancia de conservación por su rol trófico y su valoración comercial. A pesar de ser un grupo abundante históricamente en el GoM, la disponibilidad de información es realmente escasa, está atada fuertemente a los reportes de pesquerías (en México, los tiburones no generalmente especies objetivo, sino capturadas en pesquerías atuneras principalmente) y existen muy pocos estudios dedicados a evaluar su distribución espacial.

A pesar de las dificultades para obtener información de estos grupos, se logró compilar datos de más de treinta especies. A pesar de que se conoce que varias especies de tiburones están en peligro de extinción, estas especies en México se encuentran en esquemas de manejo asociados a

pesquerías, por lo que las categorías de conservación únicamente están dadas por CITES y la lista roja de la UICN (Figura 9).

De los registros encontrados para tiburones, el tiburón mako (*Isurus oxyrinchus*) es por mucho, el más documentado, con fuerte presencia en la zona profunda de Bahía de Campeche donde realiza largas excursiones a lo largo del talud y en asociación con remolinos de la zona. Otra especie de alto interés ecológico e incluso comercial (por el turismo de avistamiento) es el tiburón ballena, que si bien ocupa estacionalmente un espacio reducido al este de Cabo Catoche, a lo largo del año deambula por grandes áreas oceánicas en busca de alimento, siendo la zona profunda del Golfo de México un espacio fuertemente utilizado, particularmente la zona de giros asociados a la Corriente de Lazo, con registros satelitales en prácticamente toda la cuenca profunda del GoM.

Otra especie de alto interés en la zona, es la cornuda o tiburón martillo en peligro crítico de extinción, y que por sus hábitos semicosteros y semioceánicos, utiliza espacios amplios del sur del Golfo de México, pero de la cuál se tienen grandes vacíos de conocimiento de su distribución en el resto del área. El género *Carcharhinus* está ampliamente representado en la zona de interés, y, a pesar de los grandes vacíos de información que existen de la distribución espacial de estas especies, se reconoce el espacio profundo y ultra profundo como espacios utilizados fuertemente, en especial de especies más oceánicas y semioceánicas como *C. falciformis*, *C. longimanus*, *C. obscurus*, *Galeocerdo cuvier*. Otras más costeras pero abundantes pueden llegar a realizar excursiones a la zona profunda como es el caso de *C. limbatus*. En este grupo se encuentra también la manta birrostris, que si bien es bentónica de zonas costeras, puede utilizar zonas semiprofundas de la Bahía de Campeche.

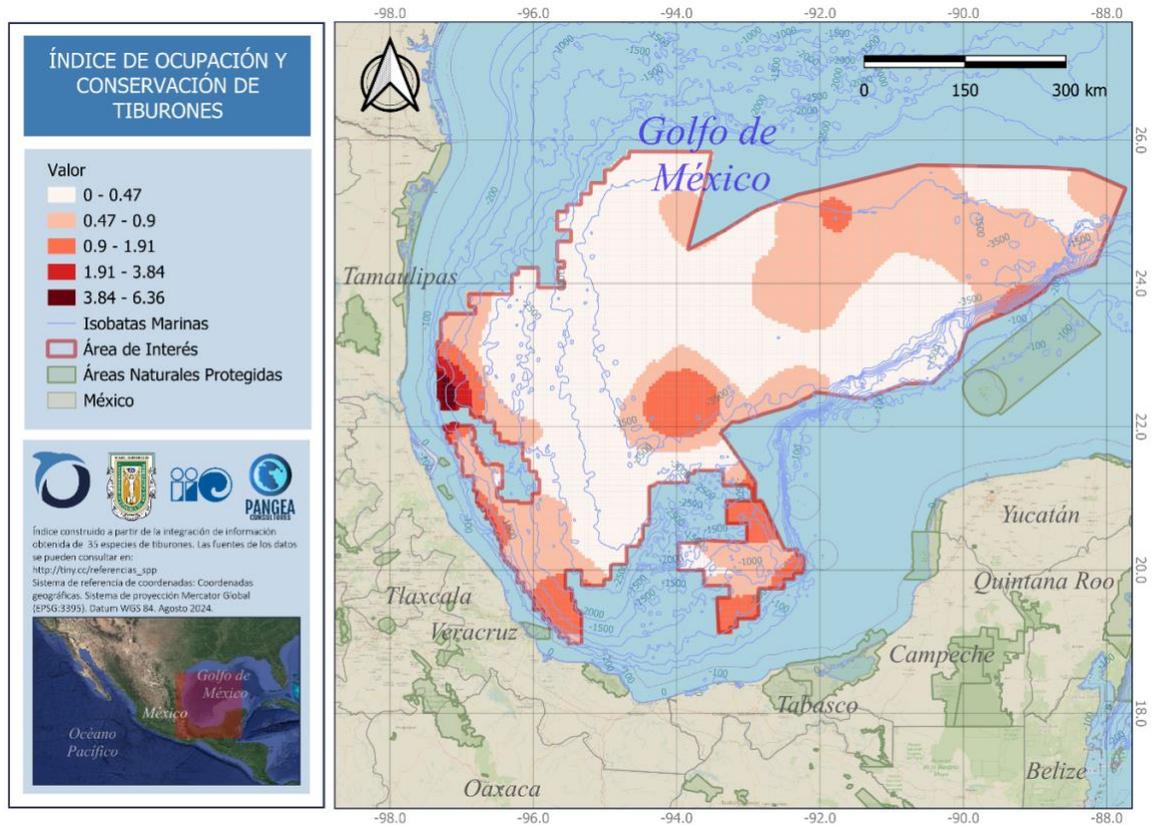


Figura 9. Distribución de la presencia ponderada por importancia de conservación de especies de tiburones presentes en la región de interés.

Clasificación de áreas de importancia de conservación

Con el fin de proveer un resumen espacialmente explícito de áreas de importancia para la conservación de las especies en el área de interés, se presenta una zonificación basada en la distribución de 88 especies, ponderadas de acuerdo a su valor de conservación dado por esquemas de conservación nacional e internacional. De estas zonas, resaltan con valores de importancia muy altos, la zona de giros de la Corriente de Lazo, ubicada ente los 92°W, 25.5°N y 89°W, 23°N; seguido de una zona de alta productividad frente a las costas del sur de Tamaulipas y parte de la cuenca este de la Bahía de Campeche. Es importante señalar que la zona de giros de la Corriente de Lazo, al noreste del área de interés, tiene un altísimo valor de conservación de especies de interés comercial, pues estacionalmente es ocupada para efectos reproductivos y liberación de larvas de atunes y otros peces pelágicos. Esto, aunado a la concentración de fito y zooplancton proveniente del Caribe, en conjunto con los procesos oceanográficos por la interacción de aguas cálidas con migración de aguas profundas ricas en nutrientes, generan una zona de muy alta productividad que alimenta toda la cuenca profunda del GoM y que promueve un hábitat rico para especies pelágicas.

En un siguiente nivel se dibuja una región frente a prácticamente toda la costa de Veracruz, pues ahí convergen todos los grupos estudiados. Queda en un nivel medio el resto de la zona de giros de la corriente de Lazo y su desplazamiento hacia el sur del GoM, por ser una zona productiva donde se encontrarán diversas especies de valor comercial.

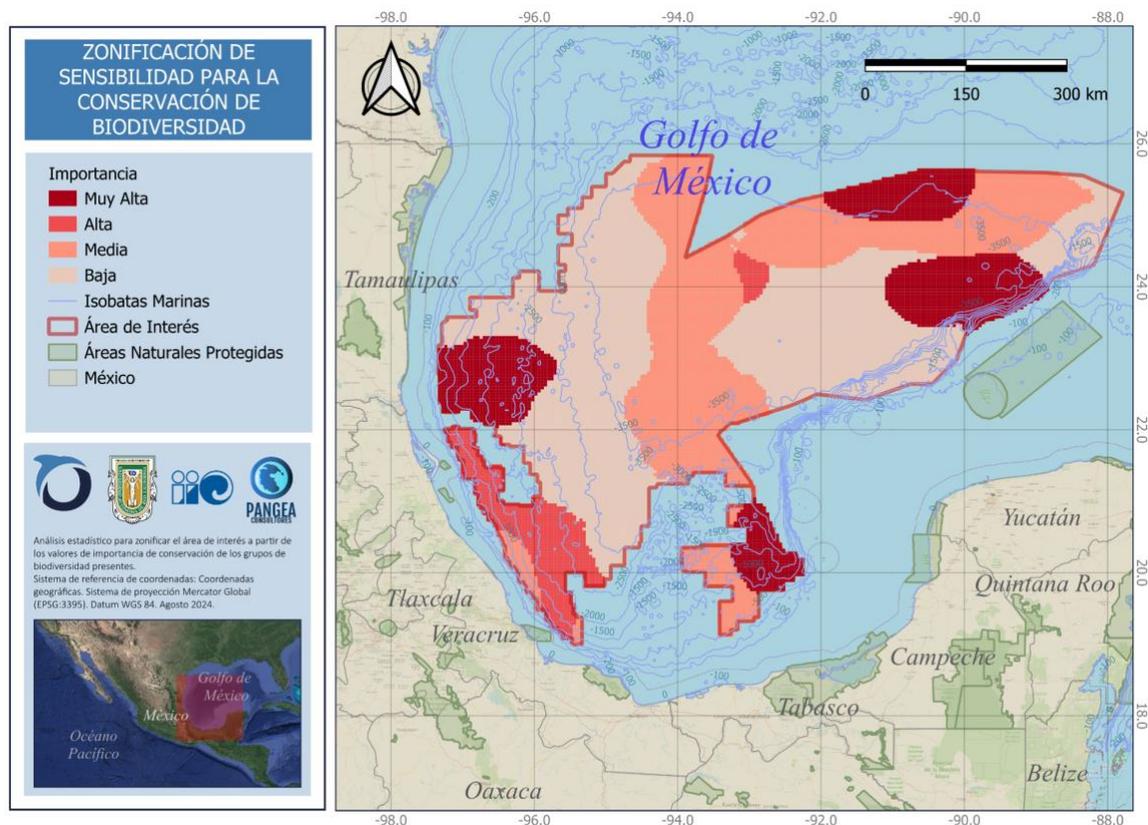


Figura 10. Zonificación en áreas de importancia para la conservación considerando la distribución espacial y el valor de conservación de 88 especies en el área de interés.

Referencias

Alonso-Aguirre, A., & Lutz, P. L. (2004). Marine turtles as sentinels of ecosystem health: Is fibropapillomatosis an indicator? *EcoHealth*, 1, 275–283.

Alonso-Aguirre, A., & Tabor, G. M. (2004). Introduction: Marine vertebrates as sentinels of marine ecosystem health. *EcoHealth*, 1(3), 236–238.

Baum, J. K., & Myers, R. A. (2004). Shifting baselines and the decline of pelagic sharks in the Gulf of Mexico. *Ecology Letters*, 7, 135–145.

Bertram, D. F., Mackas, D. L., Welch, D. W., Boyd, W. S., Ryder, J. L., Galbraith, M., Hedd, A., Morgan, K., & O'Hara, P. D. (2017). Variation in zooplankton prey distribution determines marine foraging



distributions of breeding Cassin's Auklet. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 129, 32–40.

Callejas-Jimenez, M., Santamaria-del-Angel, E., Gonzalez-Silvera, A., Millan-Nuñez, R., & Cajal-Medrano, R. (2012). Dynamic regionalization of the Gulf of Mexico based on normalized radiances (nLw) derived from MODIS-Aqua. *Continental Shelf Research*, 37, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.01.014>

Chen, Y. C. (2017). A tutorial on kernel density estimation and recent advances. *Biostatistics & Epidemiology*, 1(1), 161–187. <https://doi.org/10.1080/24709360.2017.1396742>

Capietto, A., Escalle, L., Chavance, P., Dubroca, L., de Molina, A. D., Murua, H., Floch, L., Damiano, A., Rowat, D., & Merigot, B. (2014). Mortality of marine megafauna induced by fisheries: Insights from the whale shark, the world's largest fish. *Biological Conservation*, 174, 147–151.

Denoel, M., & Ficetola, G. F. (2015). Using kernels and ecological niche modeling to delineate conservation areas in an endangered patch-breeding phenotype. *Ecological Applications*, 25(7), 1922–1931.

Diario Oficial de la Federación. (2014). Acuerdo por el que se da a conocer la lista de especies y poblaciones prioritarias para la conservación. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5334865&fecha=05/03/2014#gsc.tab=0

Dias, B. S., Lima-Martins, B. M., Moraes da Sousa, M. E., Cunha-Cardoso, A. T., & Jordaan, A. (2020). Prioritizing species of concern monitoring using GIS-based fuzzy models. *Ocean and Coastal Management*, 188, 105073. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105073>

Dong, J., Peng, J., Liu, Y., Qiu, S., & Han, Y. (2020). Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities. *Landscape and Urban Planning*, 199, 103815. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103815>

Dunham, A., Iacarella, J. C., Hunter, K. L., Davies, S. C., Dudas, S., Gale, K. S. P., & Ribidge, E. (2023). Conserving ecosystem integrity: Ecological theory as a guide for marine protected area monitoring. *Ecological Applications*, e3005. <https://doi.org/10.1002/eap.3005>

Estes, J. A., Terborgh, J., Brashares, J. S., Power, M. E., Berger, J., Bond, W. J., Carpenter, S. R., Essington, T. E., Holt, R. D., & Jackson, J. B. (2011). Degradación trófica del planeta tierra. *Science*, 333, 301–306.

Farmer, N. A., Garrison, L. P., Litz, J. A., Ortega-Ortiz, J. G., Rappucci, G., Richards, P. M., Powell, J. R., et al. (2022). Protected species considerations for ocean planning: A case study for offshore wind energy development in the U.S. Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*, 00, e10246. <https://doi.org/10.1002/mcf2.10246>

Ferretti, F., Worm, B., Britten, G. L., Heithaus, M. R., & Lotze, H. K. (2010). Patrones y las consecuencias del ecosistema de las disminuciones de tiburones en el océano. *Ecology Letters*, 13, 1055–1071.

Fortier, L., Fevre, J. L., & Legendre, L. (1994). Export of biogenic carbon to fish and to the deep ocean: The role of large planktonic microphages. *Journal of Plankton Research*, 16, 809–839.

Fossi, M. C., Casini, S., Caliani, I., Panti, C., Marsili, L., Viarengo, A., Giangreco, R., di Sciara, G. N., Serena, F., Ouerghi, A., & Depledge, M. H. (2012). The role of large marine vertebrates in the assessment of the quality of pelagic marine ecosystems. *Marine Environmental Research*, 77, 156–158.

Fossi, M. C., Coppola, D., Bains, M., Giannetti, M., Guerranti, C., Marsili, L., Panti, C., Sabata, E., & Cló, S. (2014). Large filter feeding marine organisms as indicators of microplastic in the pelagic environment: The case studies of the Mediterranean basking shark (*Cetorhinus maximus*) and fin whale (*Balaenoptera physalus*). *Marine Environmental Research*, 2014, 1–8.

Gallegos-Fernández, S. A., Trujillo-Córdova, J. A., Guzmán-Hernández, V., Abreu-Grobois, F. A., Huerta-Rodríguez, P., Gómez-Ruíz, P. A., Uribe-Martínez, A., & Cuevas, E. (2023). Marine turtles,

umbrella species undergoing recovery. *Frontiers in Amphibian and Reptile Science*, 1, 1303373. <https://doi.org/10.3389/famrs.2023.1303373>

Hazen, E. L., Carlisle, A. B., Wilson, S. G., Ganong, J. E., Castleton, M. R., Schallert, R. J., Stokesbury, M. J. W., Bograd, S. J., & Block, B. A. (2016). Quantifying overlap between the Deepwater Horizon oil spill and predicted bluefin tuna spawning habitat in the Gulf of Mexico. *Scientific Reports*, 6, 33824.

Hays, G. C. (2003). A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. *Hydrobiologia*, 503, 163–170.

Herzka, S. Z., Zaragoza-Álvarez, R. A., Peters, E. M., & Hernández-Cárdenas, G. (2021). *Atlas de Línea Base Ambiental del Golfo de México, Tomo III. Hidrografía, Biogeoquímica, Ecología y Biología. Segunda Parte, Comunidades Marinas*. CICESE, Ensenada, México. Recuperado de <https://atlasigom.cicese.mx>

Hooker, S. K., & Gerber, L. R. (2004). Marine reserves as a tool for ecosystem-based management: The potential importance of megafauna. *BioScience*, 54(1), 27–39.

Jain, A. K. (2010). Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31(8), 651–666. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>

Kazakov, E. (2022). *Attribute based clustering* (V.2.2.1). Recuperado de <https://github.com/eduard-kazakov/attributeBasedClustering>

Leben, R. (2005). Altimeter-derived loop current metrics. En W. Sturges & A. Lugo-Fernandez (Eds.), *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and models* (Geophysical Monograph Series 161).

Lyon, K., Cottrell, S. P., Siikamäki, P., & Van Marwijk, R. (2011). Biodiversity hotspots and visitor flows in Oulanka National Park, Finland. *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism*, 11(sup1), 100–111. <https://doi.org/10.1080/15022250.2011.629909>

Maire, E., Grenouillet, G., Brosse, S., & Villéger, S. (2015). How many dimensions are needed to accurately assess functional diversity? A pragmatic approach for assessing the quality of functional spaces. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 728–740. <https://doi.org/10.1111/geb.12299>

Martínez-López, B., & Zavala-Hidalgo, J. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 77(1–2), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.002>

McCauley, R. D., Fewtrell, J., Duncan, A. J., Jenner, C., Jenner, M. N., Penrose, J. D., Prince, R. I. T., Adhitya, A., Murdoch, J., & McCabe, K. (2000). Marine seismic surveys – A study of environmental implications. *APPEA Journal*, 2000, 692–708.

Miller, B. S., & Kendall, A. W. (2009). *Early life history of marine fishes* (Vol. 36, No. 4). University of California Press.

Miron, P., Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Sheinbaum, J., Pérez-Brunius, P., & Froyland, G. (2017). Lagrangian dynamical geography of the Gulf of Mexico. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07177-w>

Moore, S. E. (2008). Marine mammals as ecosystem sentinels. *Journal of Mammalogy*, 89(3), 534–540.

Nelms, S. E., Pniak, W. E. D., Weir, C. R., & Godley, B. J. (2016). Seismic surveys and marine turtles: An underestimated global threat? *Biological Conservation*, 193, 49–65.

Nowacek, D. P., Clark, C. W., Mann, D., Miller, P. J. O., Rosenbaum, H. C., Golden, J. S., Jasny, M., Kraska, J., & Sothall, B. L. (2015). Marine seismic surveys and ocean noise: Time for coordinated and prudent planning. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(7), 378–386.

Palacios, D. M., Bograd, S. J., Foley, D. G., & Schwing, F. B. (2006). Oceanographic characteristics of biological hot spots in the North Pacific: A remote sensing perspective. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(3), 250–269.

Pracheil, B. M., McManamay, R. A., Bevelhimer, M. S., DeRolph, C. R., & Cada, G. F. (2016). A traits-based approach for prioritizing species for monitoring and surrogacy selection. *Endangered Species Research*, 31, 243–258.

Roberge, J. M., & Angelstam, P. (2002). Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool. *Conservation Biology*, 18(1), 76–85.

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., & Walter, J. F. (2019). Population connectivity of pelagic megafauna in the Cuba-Mexico-United States triangle. *Frontiers in Marine Science*, 6, 456.

Salmerón-García, O., Zavala-Hidalgo, J., Mateos-Jasso, A., & Romero-Centeno, R. (2010). Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability. *Ocean Dynamics*, 61(4), 439–448. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0368-1>

Steinberg, D. K., & Landry, M. R. (2017). Zooplankton and the ocean carbon cycle. *Annual Review of Marine Science*, 9, 413–444.

Sullivan, L. J., & Kremer, P. (2011). Gelatinous zooplankton and their trophic roles. En E. Wolanski, D. McLusky, & J. G. Wilson (Eds.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science* (Vol. 6, pp. 127–171). Academic Press.

Tittensor, D. P., Mora, C., Jetz, W., Lotze, H. K., Ricard, D., Berghe, E. V., & Worm, B. (2010). Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature*, 466(7310), 1098–1101. <https://doi.org/10.1038/nature09329>

Uribe-Martínez, A., Aguirre-Gómez, R., Zavala-Hidalgo, J., Ressler, R., & Cuevas, E. (2019). Oceanographic units of Gulf of Mexico and adjacent areas: The monthly integration of surface biophysical features. *Geofísica Internacional*, 58(4), 295–315.



Uribe-Martínez, A. (2021). *Clasificación de unidades oceanográficas superficiales del Golfo de México utilizando información derivada de sensores remotos* (Tesis doctoral). Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.

Valiela, I. (2017). *Marine Ecological Processes*. Springer-Verlag.

Zhao, Q., Stephenson, F., Lundquist, C., Kaschner, J., Ayathilake, D., & Costello, M. J. (2020). Where marine protected areas would best represent 30% of ocean biodiversity. *Biological Conservation*, 244, 108536. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108536>