



Integración y análisis espacial de avistamientos de mamíferos marinos en el Caribe colombiano mediante un GeoVisor web institucional

Juan David Palencia Rivera

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Tutor: Alexandra Diaz Gil, Geóloga Magíster (MSc) y Especialista.

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2026

Cita	(Palencia-Rivera, 2026)
Referencia	Palencia Rivera, J. D. (2026). <i>Integración y análisis espacial de avistamientos de mamíferos marinos en el Caribe colombiano mediante un GeoVisor web institucional</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Grammarly y Gemini, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A Dios que no me ha dejado solo
A mi esposa Angie Martínez que es el amor de mi vida
A mis padres y mis hermanos
A cada profesional de la biología marina que me enseñaron
sobre la biodiversidad marina.

Agradecimientos

Agradecimiento con Fundación Omacha por enseñarme acerca de la conservación de cetáceos y
sirenios en Colombia.

Agradezco a la Universidad de Manizales por lo enseñado sobre los Sistemas de Información
Geográfica

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	11
Introducción	13
Planteamiento del problema	15
Antecedentes	17
Pregunta de investigación.....	27
Justificación.....	28
Objetivos	30
Objetivo general	31
Objetivos específicos.....	31
Hipótesis.....	32
Hipótesis de trabajo	32
Hipótesis nula.....	32
Referencia Legal	33
Marco teórico	36
Ecología de los mamíferos marinos en el Caribe	36
Biodiversidad marina	36
Cetáceos	36
Ecología marina	37
Oceanografía física	37
Oceanografía química	38
Tecnologías SIG y su aplicación en estudios similares.....	39
Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	39

ArcGIS ONLINE	40
ArcGIS SERVER.....	40
GeoVisores en la gestión de la información de biodiversidad.....	40
Geoprocesamiento.....	42
Capas de información	42
Servicios de mapas web (WMS/WFS)	43
Bases de datos geoespaciales y su importancia para el análisis de este tipo de información. ...	43
Base de datos espaciales	43
Geodatabase	44
Metodología	45
Enfoque metodológico	45
Tipo de Estudio	46
Procedimiento.....	47
Fase 1 Recolección de información y estructuración de base de datos.	47
Fase 2 Aplicación de herramientas de análisis espacial.....	64
Fase 3 Implementación y evaluación de la funcionalidad del GeoVisor web.	67
Resultados	72
Recolección de información y estructuración de base de datos.	72
Aplicación de herramientas SIG para el análisis espacial.....	76
Implementación y evaluación de la funcionalidad del GeoVisor web.....	95
Evaluación de la funcionalidad de la herramienta SIG – WEB.....	104
Discusión.....	108
Conclusiones	113
Recomendaciones.....	113

Bibliografía.....	116
-------------------	-----

Lista de tablas

Tabla 1 Identificación de aportes al trabajo de investigación y de los vacíos identificados.	25
Tabla 2 Información base para la construcción del formato único	47
Tabla 3 Información secundaria identificada	51
Tabla 4 Requerimientos del geovisor.....	68
Tabla 5 Definición de atributos en las variables fisicoquímicas	73
Tabla 6 Reglas topológicas aplicadas en la GDB	75

Lista de figuras

Figura 1 Estructura de la GDB construida	49
Figura 2 Procesamiento para la transformación de formato netCDF	56
Figura 3Procesamiento para la conversión de coordenadas al WGS84 en formato ráster.....	57
Figura 4 Procesamiento para la conversión de coordenadas al WGS84 en formato vector.....	58
Figura 5 Procesamiento para eliminar los pixeles con valores nulos.....	59
Figura 6 Procesamiento con la herramienta Clip Raster	60
Figura 7Procesamiento con la herramienta Reclassify	62
Figura 8 Procesamiento con la herramienta Raster to Polygon	63
Figura 9 Modelación de área de calor bajo la metodología Kernel	65
Figura 10 Reclasificación del modelo de densidad de kernel	66
Figura 11Registros de mamíferos marinos en el área del mar Caribe colombiano.....	74
Figura 12 Área de distribución de registro de mamíferos marinos	77
Figura 13 Variables ambientales analizadas mediante la aplicación de herramientas SIG.....	78
Figura 14 Atenuación difusa en el área de distribución de registros de mamíferos marinos.....	81
Figura 15 Clorofila en el área de distribución de registros de mamíferos marinos	82
Figura 16 Fosfatos en el área de distribución de registros de mamíferos marinos	84
Figura 17 Hierro en el área de distribución de registros de mamíferos marinos	85
Figura 18 Nitratos en el área de distribución de registros de mamíferos marinos	86
Figura 19 Oxígeno disuelto en el área de distribución de registros de mamíferos marinos	88
Figura 20 Productividad primaria en el área de distribución de registros de mamíferos marinos ..	89
Figura 21 Salinidad en el área de distribución de registros de mamíferos marinos.....	90
Figura 22 Silicatos en el área de distribución de registros de mamíferos marinos	92

Figura 23 Temperatura media en el área de distribución de registros de mamíferos marinos.....	93
Figura 24 Modelo tridimensional la batimetría del Mar Caribe colombiano.....	96
Figura 25 Definición simbólica de los rangos de los parámetros fisicoquímicos.....	98
Figura 26 Representación visual del Web Scene en ArcGIS Pro	99
Figura 27 Visualización del Web Scene con la información biológica y cartográfica definida ..	100
Figura 28 Web Scene integrado al aplicativo Experience Builder.....	101
Figura 29 Incorporación de widgets en el aplicativo SIG – WEB	102
Figura 30 Incorporación de línea gráfica y logotipos institucionales	103
Figura 31 Prototipo final de la herramienta SIG – WEB	103
Figura 32 Visualización de la herramienta SIG – WEB en Smartphone	105
Figura 33 Prueba de rendimiento del widget de filtro de información	107

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SIGLA	TERMINO
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OFM	Observación de Fauna Marina
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ICDE	Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
IDE	Infraestructura de Datos Espaciales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
DEM	Modelo Digital de Elevación

Resumen

La región del Caribe colombiano posee una alta diversidad de mamíferos marinos; sin embargo, la dispersión de sus registros biológicos ha limitado históricamente la planificación espacial y la formulación de estrategias de conservación. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la distribución espacial de estos organismos e implementar una plataforma web para la gestión de dicha información. Se consolidó una base de datos geoespacial con 641 registros biológicos (periodo 2008–2025), integrando variables oceanográficas como temperatura superficial, salinidad, clorofila-a, nutrientes y oxígeno disuelto. Mediante el análisis de densidad Kernel (KDE), se identificó un área de distribución estimada de 103 664,93 km², con un área núcleo (Kernel del 50 %) que representa el 15,10 % de esta superficie, localizada principalmente en la plataforma y el talud continental superior.

Estas zonas de importancia ecológica se asociaron con aguas de alta transparencia, elevada salinidad y condiciones predominantemente oligotróficas, con temperaturas superficiales bimodales marcadas (26 °C y 29 °C), lo que sugiere una especialización del hábitat vinculada a procesos de concentración física y frentes de afloramiento. Finalmente, se desarrolló un aplicativo SIG-Web mediante ArcGIS Experience Builder para facilitar la visualización y gestión dinámica de los datos. Se concluye que la integración de análisis espaciales y tecnologías SIG constituye una herramienta científica esencial para identificar hábitats críticos y apoyar la toma de decisiones en la conservación de la biodiversidad marina en Colombia.

Palabras clave: mamíferos marinos, Sistema de Información Geográfica (SIG), análisis espacial, densidad del núcleo, gestión de datos, GeoVisor.

Abstract

The Colombian Caribbean region has a high diversity of marine mammals; however, the dispersion of biological records has historically limited spatial planning and the formulation of conservation strategies. The objective of this study was to analyze the spatial distribution of these organisms and implement a web platform for managing this information. A geospatial database was consolidated with 641 biological records (2008–2025 period), integrating oceanographic variables such as surface temperature, salinity, chlorophyll-a, nutrients, and dissolved oxygen. Using Kernel Density Estimation (KDE), an estimated distribution area of 103,664.93 km² was identified, with a core area (50% Kernel) representing 15.10% of this surface area, located mainly on the continental shelf and upper slope.

These ecologically important areas were associated with highly transparent waters, high salinity, and predominantly oligotrophic conditions, with marked bimodal surface temperatures (26 °C and 29 °C), suggesting habitat specialization linked to physical concentration processes and upwelling fronts. Finally, a GIS-Web application was developed using ArcGIS Experience Builder to facilitate dynamic data visualization and management. It is concluded that the integration of spatial analysis and GIS technologies is an essential scientific tool for identifying critical habitats and supporting decision-making in marine biodiversity conservation in Colombia.

Keywords: marine mammals, Geographic Information System (GIS), spatial analysis, core density, data management, GeoVisor.

Introducción

El Caribe colombiano se reconoce como una de las regiones de mayor biodiversidad marina del país, al albergar una amplia variedad de especies de cetáceos, sirenios, peces, aves marinas y otros organismos acuáticos que se distribuyen a lo largo de ecosistemas costeros e insulares. En esta región se ha estimado la presencia de aproximadamente 31 especies de mamíferos marinos, de las cuales 22 han sido registradas oficialmente mediante monitoreos sistemáticos, avistamientos oportunistas y reportes de varamientos (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2019).

Los mamíferos marinos son considerados organismos de alta importancia ecológica, debido a su papel en la regulación de las redes tróficas, el transporte de nutrientes y su función como indicadores del estado de los ecosistemas marinos. Su presencia y distribución reflejan las condiciones ambientales de los hábitats que ocupan, por lo que constituyen un grupo biológico relevante para el análisis y la gestión de la biodiversidad marina (Rosso-Londoño, 2022; Instituto de Conservación de Ballenas, 2017).

En un contexto de aumento de las actividades antropogénicas y de los efectos del cambio climático, ha aumentado la generación de información biológica y medioambiental relacionada con la vigilancia de la biodiversidad marina. Este aumento del volumen de datos ha planteado retos en cuanto a la organización, integración, análisis y visualización de los datos, especialmente cuando la información procede de diferentes fuentes y a diferentes escalas espaciales y temporales. Esto da lugar a un déficit tecnológico debido a la dispersión de los datos en formatos heterogéneos, la falta de sistemas de referencia integrados y las limitaciones para realizar consultas eficientes, lo que restringe la capacidad de llevar a cabo análisis comparables e

incorporar los conocimientos científicos de manera oportuna en los procesos de conservación y planificación marinas.

En este escenario, las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las plataformas web geoespaciales se consolidan como herramientas estratégicas para la gestión de información científica, al permitir la integración de datos biológicos y ambientales, el análisis espacio-temporal y la visualización interactiva de la información. Sin embargo, la sola disponibilidad de datos y herramientas SIG no garantiza un uso eficaz si la información sigue estando fragmentada y no existe un entorno operativo que facilite el acceso, la exploración y la consulta a los usuarios institucionales.

En respuesta a este desafío, el presente trabajo se orientó al análisis espacial de los registros de mamíferos marinos en el Caribe colombiano mediante la aplicación de herramientas SIG, con el propósito de centralizar, visualizar y analizar información biológica y ecosistémica asociada a este grupo. Para contribuir al cierre de la brecha tecnológica identificada, se consolidó una base de datos tabular con registros de avistamientos y se integraron variables ambientales relevantes, organizando los insumos en una base de datos geoespacial.

Posteriormente, la exploración y el análisis de la información se dispusieron mediante un GeoVisor corporativo de carácter privado, implementado sobre una plataforma de visualización geográfica preexistente, que permitió la consulta interactiva, el filtrado y la visualización integrada de los datos. De este modo, el GeoVisor operativizó la integración SIG al transformar datos dispersos en información accesible y utilizable, fortaleciendo los procesos de análisis espacial y temporal como apoyo a la gestión y conservación de los ecosistemas marinos.

Planteamiento del problema

La Tierra se distingue como el único planeta del sistema solar que exhibe condiciones idóneas para el sostenimiento de la vida, lo cual se evidencia en la diversidad biológica presente en los ecosistemas tanto continentales como marinos. Esta biodiversidad se articula en distintos niveles de organización genético, de especies y ecosistémico y constituye un factor crítico para la estabilidad ecológica y el bienestar antropogénico (Fundación Biodiversidad, 2010). En este marco, Colombia se posiciona como uno de los países megadiversos a escala global, atribuido a su ubicación latitudinal, su compleja fisiografía y la heterogeneidad de sus biomas terrestres y acuáticos (Andrade-C, 2011).

Debido a su relevancia ecológica, diversas entidades públicas, privadas y organizaciones no gubernamentales han materializado esfuerzos orientados a la recopilación y sistematización de información sobre la biodiversidad nacional, con el propósito de dilucidar su distribución, representatividad y estado de conservación. Estos esfuerzos han resultado en la acumulación de volúmenes significativos de datos biológicos, particularmente en ecosistemas marinos, donde los mamíferos marinos representan un taxón de alta relevancia ecológica debido a su función como bioindicadores y su papel estructural en la regulación de las redes tróficas (Rangel-Ch, 2015).

No obstante, a pesar de la disponibilidad creciente de información biológica y ambiental, persisten deficiencias estructurales inherentes a su gestión, integración y aprovechamiento. En múltiples instancias, los conjuntos de datos se caracterizan por su dispersión, variabilidad en formatos y heterogeneidad de escalas espaciales y temporales, lo cual inhibe el análisis sinóptico y restringe su aplicación efectiva en procesos de investigación científica, planificación territorial y toma de decisiones en conservación. Esta limitación se exagera por la carencia de plataformas

tecnológicas que permitan la integración eficiente de la información biológica con variables ambientales desde una perspectiva geoespacial.

En el Caribe colombiano, esta problemática se manifiesta de manera crítica en el manejo de información derivada del monitoreo de mamíferos marinos. Si bien existen registros generados por programas de observación de fauna, consultorías e iniciativas de investigación, su aprovechamiento se ve condicionado por la dificultad de convertir dichos registros en conocimiento geográfico accionable: construcción de líneas base robustas, identificación de patrones espaciales, delimitación de zonas de mayor ocurrencia y análisis de asociaciones entre la presencia biológica y condiciones ambientales. En ausencia de un entorno integrado de análisis y visualización, la consulta y el procesamiento suelen depender de metodologías tradicionales y manuales, lo que incrementa los tiempos operativos, introduce riesgos de inconsistencias y restringe la transferencia efectiva de resultados hacia la planificación marina y la toma de decisiones en conservación.

En este contexto, la implementación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el desarrollo de plataformas geoespaciales web emergen como una solución estratégica para optimizar la gestión del conocimiento biológico marino. Estas tecnologías habilitan la integración de bases de datos estructuradas con capacidades avanzadas de visualización y análisis espacial, optimizando los tiempos de consulta y fortaleciendo los protocolos de análisis científico. No obstante, la adopción de estas soluciones aún es limitada en ciertos escenarios institucionales, atribuible a restricciones de índole técnico, económico o a la falta de interfaces que garanticen su operatividad por parte de usuarios sin experticia especializada.

La problemática central no reside en la escasez de información primaria, sino en la necesidad de establecer un esquema de integración, estandarización y publicación que procese y convierta los registros disponibles en información geográfica utilizable. Por ello, la implementación de una solución SIG-Web de carácter institucional y acceso privado basada en una plataforma de visualización geográfica preexistente que centralice la información, habilite su consulta por usuarios autorizados y facilite el análisis espacial de los registros de mamíferos marinos del Caribe colombiano, se plantea como una respuesta directa para disminuir la fragmentación de la información geoespacial, fortalecer la trazabilidad del dato y mejorar la disponibilidad de evidencia técnica para la conservación y la planificación marina.

Antecedentes

El mar Caribe colombiano ha sido abordado científicamente como un sistema marino-costero de alta complejidad, en el que la variabilidad espacio-temporal de los procesos físicos y biogeoquímicos determina la estructura ecológica, la productividad y la distribución de organismos a múltiples escalas. En este marco, los estudios de síntesis y línea base producidos para el margen continental del Caribe colombiano han permitido consolidar información integrada sobre geomorfología, dinámica oceanográfica, productividad y biodiversidad, estableciendo un referente fundamental para investigaciones posteriores orientadas a comprender patrones ecológicos y a sustentar acciones de gestión ambiental (INVEMAR, 2010). Este tipo de antecedentes resulta especialmente relevante para el análisis de mamíferos marinos, dado que su presencia y uso de hábitat se encuentran condicionados por gradientes ambientales dinámicos y por la disponibilidad espacio-temporal de recursos tróficos, lo cual exige articular registros biológicos con el contexto físico-ambiental en el que ocurren.

En relación con la dinámica física del sistema, se han desarrollado investigaciones orientadas a caracterizar componentes determinantes del funcionamiento oceanográfico regional. El estudio de la marea y su pronóstico en la cuenca Colombia del mar Caribe aporta evidencia sobre la estructura y variabilidad del nivel del mar, distinguiendo contribuciones astronómicas y meteorológicas que se expresan de manera diferencial en el espacio y el tiempo (Latandret-Solana, 2021). La importancia de este antecedente para el campo ecológico radica en que tales variaciones influyen en la conectividad hidrodinámica, en la redistribución de nutrientes y en la configuración de frentes y zonas de mezcla que pueden favorecer la agregación de presas y, por extensión, condicionar la ocurrencia de especies altamente móviles. En términos metodológicos, estos hallazgos refuerzan la necesidad de incorporar explícitamente la dimensión temporal y la variabilidad ambiental en cualquier aproximación orientada a interpretar patrones de distribución de megafauna marina, evitando lecturas estáticas de un sistema intrínsecamente dinámico.

En el componente biológico, los antecedentes sobre cetáceos en el Caribe colombiano se han fortalecido mediante esfuerzos sistemáticos de registro, observación y caracterización ecológica local. En el Caribe nororiental, investigaciones desarrolladas entre 2004 y 2012 documentaron especies presentes, patrones de ocurrencia y aproximaciones a corredores de tránsito y áreas asociadas a alimentación, empleando metodologías como puntos fijos, transectos lineales, foto identificación y construcción de etogramas para apoyar la interpretación ecológica y comportamental cautiverio (Morales-Rincon & Jaúregui, 2012). Dichos resultados constituyen una base empírica para comprender la diversidad de cetáceos en sectores específicos del Caribe y aportan insumos para reconocer asociaciones con condiciones batimétricas y geomorfológicas. Sin embargo, también evidencian una limitación recurrente en la investigación regional: la información suele consolidarse en estudios localizados, con continuidad temporal variable, lo que

restringe la comparación interregional y la identificación robusta de tendencias espacio-temporales. Esta necesidad de análisis integrados se torna crítica al considerar escenarios de presión antrópica y transformación del territorio marino-costero.

En el golfo de Urabá, una investigación doctoral centrada en delfines abordó la distribución, el uso de hábitat y las implicaciones para la conservación y el manejo costero, destacando asociaciones espaciales con áreas someras y zonas influenciadas por dinámicas estuarinas, así como la coexistencia de amenazas derivadas del tráfico marítimo, la pesca artesanal y el desarrollo de infraestructura, elementos que incrementan el riesgo ecológico sobre poblaciones locales (Rosso-Londoño, 2022). Este antecedente aporta un doble valor: por una parte, incrementa el conocimiento ecológico aplicado sobre especies focales; por otra, evidencia que la presión antrópica opera de manera espacialmente heterogénea y temporalmente variable, lo cual demanda herramientas que permitan integrar registros biológicos con capas ambientales y antrópicas para construir diagnósticos más operativos en gestión y planificación marina.

A escala regional ampliada, según López Martínez et al., (2022) se han identificado patrones similares de avance y vacíos metodológicos. Una revisión sobre la investigación de cetáceos en América Central durante el periodo 2011–2021 concluyó que, pese a la presencia de múltiples registros y esfuerzos de documentación, persisten carencias significativas en estudios poblacionales, migratorios y de largo plazo, además de limitaciones en la integración de información entre países y entidades, aspecto especialmente crítico para organismos altamente móviles. Este antecedente es pertinente para el Caribe colombiano porque sitúa la problemática en un contexto regional: la disponibilidad de datos no necesariamente se traduce en capacidad analítica y de gestión si la información permanece fragmentada, heterogénea y con baja interoperabilidad.

En respuesta a estas limitaciones, la aplicación de metodologías geoespaciales en estudios ambientales marinos ha demostrado ser un soporte técnico robusto para integrar variables de múltiples fuentes y evaluar patrones. En el campo del modelado ecológico, se ha documentado el uso de modelos de idoneidad de hábitat con algoritmos como MaxEnt para identificar variables ambientales determinantes de la presencia de (*Tursiops truncatus*), incorporando criterios como la distancia a la costa, la batimetría y las condiciones oceanográficas, lo que permite inferir potenciales áreas favorables y orientar aproximaciones de planificación y conservación basadas en evidencia espacial (Mendoza Martinez, 2022). Aunque este estudio se desarrolló en vertientes mexicanas, su aporte metodológico es transferible al Caribe colombiano: demuestra que el análisis de ocurrencia biológica adquiere mayor capacidad explicativa cuando se articula con variables ambientales en un marco espacial, con posibilidad de extenderse a componentes temporales cuando la disponibilidad de datos lo permite.

De manera complementaria, el análisis espacial multicriterio ha sido empleado para integrar criterios ambientales, técnicos y normativos en escenarios de planificación marina, evidenciando la capacidad de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para consolidar capas, ponderar variables y delimitar áreas prioritarias o compatibles según objetivos específicos. En el Caribe colombiano, un trabajo de grado aplicó análisis multicriterio para identificar áreas idóneas para la ubicación de parques eólicos *offshore*, integrando variables oceanográficas, ambientales y de restricción espacial, lo que ratifica la utilidad de los SIG para soportar decisiones complejas en territorios marinos (Renteria Mena, 2022). Aunque la finalidad sectorial difiere del presente trabajo, el antecedente resulta relevante por su estructura técnica: valida que la integración de información heterogénea bajo un marco geoespacial mejora la trazabilidad del

análisis y su reproducibilidad, principios también necesarios para analizar biodiversidad y amenazas en ecosistemas marinos.

En el ámbito del monitoreo ambiental, las aproximaciones basadas en teledetección y SIG han aportado fundamentos para integrar información remota e *in situ* y caracterizar la variabilidad espacio-temporal de variables ambientales. Una monografía de revisión sobre métodos de monitoreo de calidad de agua en Colombia destacó el valor de la percepción remota y los SIG para ampliar la cobertura, mejorar la continuidad temporal y fortalecer la interpretación espacial de variables físicoquímicas, resaltando su potencial para soportar procesos de gestión ambiental (Uribe Ospina, 2022). Si bien su foco principal es continental y de calidad de agua, el antecedente es metodológicamente pertinente para el contexto marino-costero: evidencia que la teledetección puede convertirse en un insumo clave para contextualizar registros biológicos en escenarios dinámicos, siempre que exista una estructura de datos que posibilite su integración y consulta eficiente.

En paralelo al avance metodológico, la consolidación de infraestructuras de datos y estándares internacionales ha redefinido la forma en que se gestiona la información de biodiversidad marina. El Sistema de Información Biogeográfica de los Océanos (OBIS) se estableció como una infraestructura global orientada a recopilar, integrar y estandarizar datos sobre diversidad, abundancia y distribución de vida marina, enfatizando la necesidad de datos de alta calidad para producir conocimiento aplicable a la conservación y la gestión basada en evidencia (Ocean Biodiversity Information System, 2021).

Este enfoque ha sido reforzado por iniciativas de articulación interinstitucional: el plan de acción OBIS–GBIF para datos de biodiversidad marina establece directrices para mejorar modelos de datos, coordinación, representación y reutilización de información marina, resaltando

la relevancia de mecanismos que faciliten la integración y visualización de datos marinos en plataformas interoperables (OBIS Y GBIF, 2024). En el plano operativo de publicación e interoperabilidad, estos enfoques se articulan con estándares de servicios de mapas web del OGC: WMS permite solicitar y servir imágenes de mapas georreferenciadas, mientras que WFS facilita el acceso a entidades vectoriales (features) y sus atributos para consulta e intercambio a nivel de “objeto geográfico”, favoreciendo flujos interoperables (Open Geospatial Consortium Inc., 2006).

En términos de pertinencia para el Caribe colombiano, estos antecedentes confirman que la principal brecha contemporánea no es únicamente la recolección de datos, sino la capacidad de estructurarlos bajo estándares y flujos que permitan análisis reproducibles, escalables y comparables en el tiempo.

A nivel nacional, la gobernanza de la información geoespacial se apoya en lineamientos de Infraestructura de Datos Espaciales orientados a garantizar consistencia, interoperabilidad, trazabilidad y actualización del dato, principios aplicables también a la gestión de información ambiental. Los lineamientos del marco de administración del territorio promueven prácticas para la articulación y administración de información espacial con criterios de normalización y uso coordinado, lo cual aporta un referente conceptual para evitar la dispersión de capas, la duplicidad de versiones y la pérdida de trazabilidad en procesos de análisis (Global Spatial Data Infrastructure , 2001). En este contexto, la revisión sobre geoportales y visores geográficos en Colombia analizó la evolución de estas plataformas como instrumentos para publicar, consultar y visualizar información georreferenciada, destacando su utilidad institucional cuando se articulan con repositorios estructurados y políticas claras de administración del dato (Franco, 2016). Este antecedente es relevante para el presente trabajo porque ayuda a posicionar los GeoVisores como

medios para mejorar el acceso y la comunicación de información científica, no como el objetivo central del estudio.

En el plano aplicado, existen experiencias que evidencian la utilidad operativa de geoportales y visores para la gestión marino-costera. El Geoportal de Fundación MarViva constituye un referente regional de disposición de información geoespacial orientada a océanos y costas, facilitando la consulta y el acceso a capas temáticas de interés para la conservación y planificación (Mar Viva, 2023). Adicionalmente, en el Caribe insular colombiano se implementó un GeoVisor pesquero en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, enfatizando la integración y organización de información temática, la adaptación a condiciones institucionales y la selección de componentes tecnológicos que permitan consulta y visualización operativa en entornos de gestión (Rojas Archbold, 2022). Este antecedente resulta especialmente pertinente por su proximidad territorial y por demostrar la viabilidad de implementar soluciones tipo GeoVisor como instrumento de apoyo para organizar información dispersa y mejorar su aprovechamiento analítico, sin plantearlo como un desarrollo de *software* desde cero.

En conjunto, los antecedentes revisados constituyen una base científica y metodológica indispensable para orientar el presente trabajo, al aportar, por un lado, el marco biofísico que explica la variabilidad ambiental del mar Caribe colombiano y, por otro, los registros biológicos y aproximaciones ecológicas que evidencian los patrones de presencia y uso de hábitat de los mamíferos marinos, aunque estos últimos presenten aún fragmentación y una limitada articulación espacio-temporal. De manera convergente, la revisión demuestra que la aplicación de tecnologías geoespaciales y de teledetección permite integrar fuentes heterogéneas, incorporar variables ambientales relevantes y mejorar la capacidad de examinar cambios y regularidades en el sistema. En este sentido, el presente estudio da continuidad a los esfuerzos previos al retomar

dichos aportes científicos para implementar herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y un GeoVisor web. De este modo, la investigación contribuye al análisis espacio-temporal de la información biológica de los mamíferos marinos en el Caribe colombiano, fortaleciendo la gestión y la visualización de la evidencia científica disponible.

Con el fin de resumir las contribuciones más relevantes de la bibliografía y destacar su relevancia directa para este estudio, se elaboró una tabla comparativa con información de referencia. En la **Tabla 1** incluye bibliografía revisada importante y menciona explícitamente las contribuciones científicas y metodológicas, las limitaciones identificadas y las lagunas de investigación que aún existen en la región del Caribe colombiano para cada contribución individual. Esta comparación puso de manifiesto avances significativos en la evaluación de las características biofísicas regionales, la documentación y el estudio de la ecología de los mamíferos marinos, y la aplicación de técnicas de SIG y teledetección para el análisis medioambiental y la planificación marina. Sin embargo, siguen existiendo lagunas en cuanto a la fragmentación de la información geográfica y la falta de flujos de trabajo estandarizados que faciliten su integración, referenciación y reutilización. Por consiguiente, este estudio tiene por objeto garantizar la continuidad y la coordinación en este contexto, integrando los registros biológicos y las variables medioambientales en una base de datos geográficos estructurada que permita la investigación y el análisis a través de un visor web geográfico institucional. De este modo, la información dispersa se transforma en conocimientos geográficos útiles que respaldan las actividades de conservación de la naturaleza y la toma de decisiones para la planificación marina en el Caribe colombiano. En la Tabla 1 se observa los aportes y limitantes de los antecedentes con respecto al presente trabajo de investigación.

Tabla 1

Identificación de aportes al trabajo de investigación y de los vacíos identificados.

Antecedente	Aporte principal	Vacío/limitación identificada	Cómo lo aborda este trabajo en el Caribe colombiano
INVEMAR (2010)	Línea base e integración biofísica regional; marco de referencia del sistema Caribe	Requiere vincularse operacionalmente con registros biológicos puntuales y consulta ágil	Integra registros biológicos con variables ambientales en base geoespacial para análisis y visualización
Latandret-Solana (2021)	Evidencia de variabilidad espacio-temporal de la marea y dinámica física	La información física no siempre se conecta con ocurrencias biológicas para análisis aplicado	Usa variables ambientales como contexto del análisis espacial y soporte interpretativo
Morales-Rincon & Jaúregui (2012)	Registros sistemáticos y caracterización local de cetáceos	Estudios localizados; comparabilidad limitada y continuidad variable	Centraliza registros y facilita consulta integrada para análisis espacial y síntesis
Rosso-Londoño (2022)	Distribución/uso de hábitat y amenazas en Urabá; enfoque aplicado a gestión	Necesidad de integrar capas biológicas, ambientales y antrópicas en una plataforma operativa	Base geoespacial + visor institucional para explorar patrones y apoyar gestión
López Martínez et al. (2022)	Identifica vacíos regionales: largo plazo, migración, integración de información	Fragmentación y baja interoperabilidad limitan capacidad analítica	Propone integración estructurada y disponibilidad para consulta/visualización consistente

Mendoza Martinez (2022)	Transferencia metodológica: relación ocurrencia– variables ambientales (modelado)	Requiere datos organizados y variables comparables para aplicabilidad	Estandariza e integra insumos; prepara escenarios analíticos basados en capas
Renteria Mena (2022)	Demuestra potencia SIG multicriterio en planificación marina	Enfoque sectorial distinto; depende de integración rigurosa de capas	Adopta lógica de integración/ponderación de capas para análisis ambiental de biodiversidad
Uribe Ospina (2022)	Aporta fundamentos de teledetección + SIG para monitoreo ambiental	Necesidad de flujos consistentes de integración y consulta	Integra variables ambientales (raster) y registros biológicos en un repositorio geoespacial
Franco (2016) / MarViva (2023) / Rojas Archbold (2022)	Evidencian utilidad de geoportales/visores para publicación y consulta	El visor no es el fin si no existe base estructurada y análisis aplicado	Enfatiza que el valor agregado está en la integración/análisis y en disponerlo en visor institucional

Fuente: Elaboración propia

Pregunta de investigación

¿En qué medida la aplicación de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG), desde un enfoque espacial, permite analizar la información biológica de los mamíferos marinos del Caribe colombiano y fortalecer la gestión y la visualización de los datos científicos?

Justificación

El mar Caribe colombiano se consolida como una de las regiones de mayor riqueza biológica del país, alberga una amplia diversidad de ecosistemas y especies de fauna de alta importancia ecológica, entre las cuales destacan los mamíferos marinos. Estas especies ejercen un papel fundamental en la funcionalidad de los ecosistemas marinos, actuando como reguladores de las redes tróficas y como bioindicadores del estado ambiental. Su conservación adquiere un carácter prioritario en un contexto signado por el incremento de las presiones antrópicas y los efectos del cambio climático, factores que afectan la dinámica y la estabilidad de los ecosistemas marinos costeros e insulares.

En este escenario, la generación de información biológica y ambiental asociada al monitoreo de mamíferos marinos ha escalado de manera significativa. Sin embargo, el aprovechamiento efectivo de estos datos depende de la capacidad para organizarlos, integrarlos y analizarlos mediante enfoques que permitan la comprensión de sus patrones espacio-temporales. La fragmentación de los conjuntos de datos y la ausencia de herramientas que faciliten su análisis conjunto limitan la interpretación científica rigurosa y restringen su aplicación en la formulación de estrategias de conservación y gestión ambiental basadas en evidencia.

El estudio ecológico de la distribución y el comportamiento espacio-temporal de los mamíferos marinos exige la aplicación de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de teledetección como apoyo metodológico esencial. Esto se debe a que estas tecnologías habilitan la integración de múltiples fuentes de información geoespacial, la identificación de patrones de distribución y la representación cartográfica de los resultados de manera clara y comprensible. La adopción de estas tecnologías no constituye un fin instrumental,

sino un medio para fortalecer el análisis científico y la elucidación de las dinámicas ecológicas inherentes al Caribe colombiano. En particular, la implementación de soluciones SIG en un entorno web permite estructurar y publicar información basada en estándares de interoperabilidad y gestión de la calidad, integrando estándares de documentación y metadatos que mejoran la trazabilidad y la reutilización de los datos. Para la Fundación Omacha, esto es de suma importancia. Facilita la comunicación futura de la información generada a organismos nacionales o internacionales de manera coherente y verificable, reduciendo las ambigüedades en cuanto a la fuente, el alcance, la fecha, la metodología y las restricciones de uso.

Adicionalmente, la implementación de un GeoVisor basado en la web como herramienta de apoyo a la visualización y gestión de información científica optimiza los procesos de consulta, interpretación y difusión de los resultados de los estudios medioambientales. Al proporcionar una plataforma accesible que no requiere software especial para los usuarios finales, refuerza la coordinación entre investigadores, instituciones y gestores medioambientales y aumenta la capacidad institucional para convertir datos dispersos en conocimientos geográficos aprovechables. En este sentido, el proyecto también puede entenderse como un proyecto piloto para la transformación digital de la organización, que sienta las bases técnicas y operativas para la estandarización de datos, la publicación controlada de información geográfica y la consolidación de los procesos internos de actualización de datos y gobernanza.

Desde una perspectiva académica, ambiental e institucional, el presente proyecto se justifica por su contribución directa al análisis geoespacial de la información científica sobre los mamíferos marinos del Caribe colombiano. Este enfoque aporta directamente al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): ODS 14 (Vida submarina): Al generar información integrada y analizada que apoya la conservación y el uso sostenible de los recursos y

ecosistemas marinos, ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura): Al promover el uso eficiente y aplicado de tecnologías geoespaciales para la gestión robusta de información científica, ODS 17 (Alianzas para lograr los objetivos): Al facilitar el acceso, la integración y el intercambio de información entre diversos actores de la investigación y la gestión ambiental.

En síntesis, este proyecto no solo refuerza los procesos de análisis medioambiental y la identificación de modelos pertinentes para la conservación de la naturaleza, sino que también aumenta la capacidad institucional para documentar, gestionar y difundir información científica que cumpla con los estándares de calidad, lo que favorece la toma de decisiones informadas y basadas en datos empíricos como base para la gestión sostenible de la biodiversidad marina regional.

Objetivos

Objetivo general

Analizar espacialmente la distribución de mamíferos marinos en el Caribe colombiano mediante la integración de datos biológicos y ambientales y su exploración en una plataforma GeoVisor web corporativa privada para apoyar la gestión y visualización de información científica.

Objetivos específicos

- Realizar la estructuración y organización de una base de datos geoespacial que integre información biológica de mamíferos marinos y variables ambientales relevantes del Caribe colombiano.
- Aplicar herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de teledetección para el análisis espacial de la distribución de los mamíferos marinos en el área de estudio.
- Implementar un GeoVisor web corporativo de carácter privado como herramienta didáctica principal para la socialización y divulgación de resultados, y como soporte para la visualización, consulta y gestión de la información científica asociada a los mamíferos marinos del Caribe colombiano.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

La aplicación de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de teledetección, articuladas mediante la implementación de un GeoVisor web, mejora significativamente la eficiencia del análisis espacio-temporal, la gestión y la visualización de la información biológica de los mamíferos marinos en el mar Caribe colombiano, en comparación con las metodologías tradicionales de consulta y procesamiento de datos.

Hipótesis nula

La aplicación de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de teledetección, articuladas mediante la implementación de un GeoVisor web, no genera mejoras significativas en la eficiencia del análisis espacio-temporal, la gestión ni la visualización de la información biológica de los mamíferos marinos en el mar Caribe colombiano.

Hipótesis alterna.

La aplicación de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y herramientas de teledetección, articuladas mediante la implementación de un GeoVisor web, optimiza la eficiencia en la visualización y consulta de la información biológica de los mamíferos marinos en el mar Caribe colombiano, pero no genera mejoras significativas en el análisis espacio-temporal.

Referencia Legal

Marco Normativo	Descripción	Fuente
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente, reorganiza el sector público encargado de la gestión ambiental y establece el Sistema Nacional Ambiental (SINA).	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1993).
Decreto 3851 de 2006	Establece la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE) con el fin de asegurar la calidad, almacenamiento y consulta de la información básica del país.	(Presidencia de la Republica de Colombia, 2006).
Documento CONPES 3585 de 2009	Busca fortalecer la producción, intercambio, acceso y uso de información geográfica en Colombia, promoviendo la consolidación de la ICDE.	(Departamento Nacional de Planeación, 2009).
Documento CONPES 3762 de 2013	Define lineamientos de política para proyectos estratégicos de interés nacional (PINES), destacando la planeación integral y la coordinación interinstitucional.	(Departamento Nacional de Planeación, 2013).

Ley 1712 de 2014	Establece la Ley de Transparencia y el Derecho al Acceso a la Información Pública Nacional en Colombia.	(Congreso de la Republica, 2014).
Decreto 1170 de 2015	Reglamenta el sector administrativo de información estadística y refuerza la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE).	Departamento Nacional de Estadística, 2015
Agenda 2030	Plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia.	(Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015)
Resolución 2182 de 2016	Define directrices para la actualización y estandarización de productos cartográficos y geográficos para el SIAC.	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).
Documento CONPES 3920 de 2018	Establece lineamientos para el aprovechamiento de grandes volúmenes de datos en Colombia, fomentando la digitalización y el análisis de datos.	(Departamento Nacional de Planeación, 2018).
Resolución 421 de 2020	Fija especificaciones técnicas mínimas para productos de cartografía básica oficial en Colombia, adoptando	(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020).

	MAGNA-SIRGAS como sistema de referencia.	
Documento CONPES 4007 de 2020	Define recomendaciones y lineamientos para fortalecer la gobernanza mediante el uso de información geoespacial interoperable.	(Departamento Nacional de Planeación, 2020).
Resolución 460 de 2022	Expide el Plan Nacional de Infraestructura de Datos, como parte de la Política de Gobierno Digital, para optimizar la gestión y uso de datos en el país.	(Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones, 2022).
Resolución 899 de 2023	Define la conformación y funcionamiento de la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE), promoviendo la cooperación interinstitucional.	(Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2023).

Fuente: Elaboración propia

Marco teórico

Ecología de los mamíferos marinos en el Caribe

Biodiversidad marina

Se refiere a la variedad y variabilidad de organismos vivos presentes en los océanos, mares y zonas costeras, incluyendo la diversidad genética, especies y ecosistemas marinos. Esta definición abarca desde microorganismos hasta mamíferos marinos, así como los hábitats que ocupan, como arrecifes de coral, praderas marinas, manglares, aguas estuarinas y aguas profundas. La biodiversidad marina es fundamental para el funcionamiento ecosistémico oceánico, mantenimiento de los ciclos biogeoquímicos, provisión de diversos servicios ecosistémicos y el sustento económico y cultural de comunidades humanas asentadas en cercanías de áreas costeras y marinas (IPBES, 2019).

Cetáceos

Los cetáceos son un conjunto de unas 80 especies de mamíferos completamente adaptados a la vida acuática, que se agrupan en dos subórdenes muy diferentes: los odontocetos (delfines y especies dentadas) y los mysticetos (ballenas y rorcuales), que evolucionaron independientemente de formas terrestres. Tienen adaptaciones morfológicas y fisiológicas específicas, como cuerpos hidrodinámicos, extremidades transformadas en aletas, espiráculos dorsales para respirar y grandes depósitos de grasa para evitar la hipotermia. Respiran con pulmones y tienen que salir a la superficie después de cada inmersión, que puede ser más profunda y durar más cuanto mayor sea el tamaño del animal.

Son animales con un alto grado de sociabilidad: los odontocetos, por su parte, viven en grupos familiares, y aunque los mysticetos tienden a ser solitarios durante las migraciones, se reúnen en áreas de alimentación o reproducción. Se les considera indicadores clave del impacto

climático debido a que su reproducción es lenta y la inversión parental se extiende, lo cual los hace susceptibles a las variaciones en el medio ambiente. A pesar de que pueden competir con la pesca en ecosistemas alterados, no tienen depredadores naturales (exceptuando al ser humano) y cumplen una función ecológica esencial como depredadores apicales, regulando las redes tróficas marinas (Ecologistas en acción, 2017).

Ecología marina

La ecología marina es una parte esencial de la biología que se centra en investigar las interacciones entre los seres vivos que residen en ecosistemas marinos y su medio físico, químico y biológico. Su análisis posibilita entender la manera en que las especies marinas se distribuyen, se adaptan y establecen vínculos ecológicos dentro de redes tróficas complejas, además del rol que juegan en la conservación del equilibrio ecológico y el funcionamiento de los océanos. Esta disciplina permite detectar flujos de energía, ciclos biogeoquímicos, patrones de biodiversidad y dinámicas poblacionales; estos son componentes fundamentales para desarrollar estrategias de conservación y administración sustentable de los recursos marinos. Además, la ecología de los océanos proporciona información vital para determinar el efecto de las actividades humanas, como la contaminación, el cambio climático y la sobrepesca en los ecosistemas oceánicos, lo cual es esencial para tomar decisiones informadas que busquen protegerlos y gestionarlos de manera integral. (Instituto Español de Oceanografía, 2025)

Oceanografía física

La oceanografía física es la disciplina de las ciencias marinas que examina y anticipa los fenómenos físicos que tienen lugar en el océano, tales como las corrientes, mareas, oleaje, mezcla, dispersión e intercambio de energía con la atmósfera; además de la propagación de energía térmica, acústica y luminosa en diferentes entornos marítimos. El propósito central de la

investigación es entender la interacción entre océano y atmósfera, el movimiento oceánico y la distribución térmica, componentes esenciales para controlar el clima mundial. Los fenómenos oceánicos se pueden prever a través de modelos numéricos avanzados y mediante la dinámica de fluidos geofísicos. Esto es porque el comportamiento del océano depende del balance entre varias fuerzas: atmosféricas, gravitacionales y de fricción. La temperatura, la salinidad y la densidad del agua son elementos que influyen en los movimientos verticales y horizontales del océano, lo que impacta directamente en los ecosistemas marinos. La investigación oceanográfica se lleva a cabo utilizando instrumentos especializados, como el CTD, que posibilita la obtención de parámetros físicos fundamentales para el estudio de corrientes, remolinos, olas y mareas. (Instituto Español de Oceanografía, 2025)

Oceanografía química

La oceanografía química es una disciplina de las ciencias marinas que analiza la composición química del agua marina, sus componentes y cómo influye en ella los procesos geológicos, físicos y biológicos. Examina el comportamiento de elementos compuestos, gases y nutrientes, además de los cambios que se producen al incorporar sustancias orgánicas e inorgánicas provenientes de las actividades humanas, a las que se les denomina contaminación marina. Esta disciplina también estudia los ciclos biogeoquímicos, en particular los que involucran al nitrógeno, carbono y fósforo, fundamentales para la producción primaria y el desempeño de las redes tróficas del mar. La productividad biológica está determinada por la disponibilidad de nutrientes y luz, que se ven afectados por procesos como los afloramientos y las mezclas verticales. Asimismo, se emplean variables como la salinidad, los nutrientes, la temperatura y la concentración de oxígeno para describir las masas de agua y entender cómo están distribuidas. Para comprender los procesos biogeoquímicos oceánicos y valorar las

modificaciones medioambientales a largo plazo, es esencial la supervisión constante de estos constituyentes.

Tecnologías SIG y su aplicación en estudios similares

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los SIG es la integración de hardware, software, datos geográficos y profesional, diseñada para analizar, procesar, manejar, modelar e integrar en diferentes formas y dimensiones la información cartográficamente representada con el propósito de solucionar problemas de alta complejidad en la planificación y gestión territorial (Sastres Olmos, 2010). Por otro lado, podemos definir los SIG como una forma particular de integrar las bases de datos espaciales con las bases de datos tradicionales dentro de un sistema de información, siendo un conjunto interactivo de varios sistemas y subsistemas que orienta la organización y la captura de toda la información georreferenciada con la finalidad de aportar para la toma de decisiones. (Saenz Saavedra, 1992).

Por otro lado, la información geográfica se define como la información sobre un elemento de la superficie terrestre, los cuales tienen las siguientes características: Es multidimensional, esta información mediante coordenadas puede definir cualquier posición en la tierra. La información geográfica depende de la resolución geográfica, es decir, del nivel de detalle que almacena. Puede ser voluminosa, es decir, que puede almacenar grandes cantidades de datos y esta se puede representar en diferentes formatos que pueden incidir en sus resultados, por último, puede ser representada en superficies planas y requiere métodos únicos para su análisis (Rodríguez Lloret & Olivella, 2009).

Los datos geográficos es la manera de como representamos la información en el espacio, permitiendo enlazar con sus aplicaciones o situaciones específicas, es decir, es una abstracción de

la realidad. Estos datos se pueden considerar como valores, cadenas de caracteres o símbolos que proporciona información de la localización geográfica al usuario que los necesite. Los datos geográficos tienen tres tipos de componentes: Contiene información asociada sobre la localización, atributos de información asociada a la temática y por último un componente temporal (Rodríguez Lloret & Olivella, 2009).

ArcGIS ONLINE

Es una plataforma SIG ofrecida en la nube por ESRI que permite el desarrollo de soluciones SIG WEB ofreciendo herramientas para crear y compartir datos espaciales, crear aplicaciones y herramientas geoespaciales de forma colaborativa a través de internet, permitiendo el uso de múltiples usuarios, accediendo en tiempo real a información almacenada en la nube, pero protegiendo los datos mediante la administración. Funciona como un Software as a Service (SaaS) lo que significa que no requiere instalación local y puede acceder desde cualquier dispositivo con acceso a internet. (Esri, 2025)

ArcGIS SERVER

Es un software de servidor desarrollado por ESRI que permite publicar, administrar y distribuir datos espaciales, mapas, y herramientas de análisis a través del internet, hace parte de los servicios de la plataforma ArcGIS Enterprise posibilitando a usuario de ArcGIS accedan a la información espacial centralizada. Este servidor soporta formatos vectoriales, ráster en 2D y 3D, además de servicios OGC (WMS, WFS, WCS) garantizando la interoperabilidad con otras plataformas. (ESRI, 2025).

GeoVisores en la gestión de la información de biodiversidad

Las tecnologías geoespaciales hacen referencia a todas las tecnologías que se utilizan para recopilar, almacenar y organizar la información geoespacial, en estas se incluyen los satélites que

permitieron la generación de cartografía y análisis de la Tierra, estas tecnologías se identifican en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y la Teledetección.

La Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) es un sistema informática integrado mediante un conjunto de recursos (catálogos, servidores, programas, aplicaciones, páginas web, entre otros) permitiendo el acceso y la gestión de datos y servicios geográficos que están disponibles en internet, cumpliendo una serie de normas, estándares y especificaciones garantizando la interoperabilidad de la información geográfica, por otra parte, es importante establecer un marco legal que asegure los datos producidos por las entidades o instituciones Zuccino et al. (2025).

Los Servicios de Información Geográfica es la operación o el conjunto de operaciones que se desarrollan mediante una aplicación informática por medio de datos geográficos o metadatos, estas operaciones se deben realizar de manera remota por lo que se utilizan a menudo servicios WEB. Esos servicios se pueden organizar en cinco grupos: a) servicios de información, estos servicios permiten la visualización y la sobreposición de información espacial tanto en formato ráster como en formato vector; b) servicios de localización permiten la búsqueda de grandes conjuntos de datos geográficos, partiendo de la información contenida en los metadatos; c) servicios de descarga permiten acceder a los datos y a generar copias para poder descargarlas y acceder a la información geográfica; d) los servicios de transformación permite adaptar los datos para garantizar su interoperabilidad; Otro servicios permiten la provisión y el acceso a los servicios WEB-SIG. (Zucchino et al., 2025)

Los geoportales es el acceso a los recursos geoespaciales basados en servicios WEB, que permiten ser un punto de encuentro entre el usuario, productores, y proveedores de servicios IDE,

los geo portales deben garantizar las funcionalidades básicas a los usuarios (funciones de localización, visualización, descarga y procesamiento) según el perfil y las capacidades de los usuarios, pero como es parte de una IDE debe cumplir con las mismas especificaciones técnicas y objetivos que esta trazados desde la misma (Zucchini et al., 2025).

Geoprocesamiento

En el campo de los sistemas de información geográfica (SIG), el geoprocesamiento se define como un marco y un conjunto de herramientas para procesar datos geográficos y sus atributos, lo que permite la gestión automatizada de datos y el análisis espacial repetible. En teoría, una operación de geoprocesamiento toma una o más entradas (capas vectoriales, puntuales o tabulares) y aplica transformaciones o análisis específicos (como recorte, reproyección, unión espacial, interpolación o validación topológica), y genera resultados de salida que se incorporan a la siguiente fase del flujo de trabajo metodológico. En la investigación del medio marino, el geoprocesamiento actúa como un elemento operativo que permite la estandarización espacial, la resolución de conflictos y la creación de productos analíticos complejos, como zonas de densidad y zonificación. Esto garantiza que los resultados sean trazables y técnicamente sólidos. (Esri, 2023)

Capas de información

Una capa es una representación visual y operativa de un conjunto de datos geográficos dentro de un entorno de cartografía digital. En teoría, las capas se corresponden con capas temáticas de la realidad geográfica (como registros de observación, mediciones de profundidad, ecosistemas, áreas protegidas, etc.), asemejándose a la leyenda de la cartografía tradicional. Dentro de las plataformas SIG, las capas organizan la información por tema o tipo de forma (punto, línea, polígono, ráster), lo que permite la aplicación de símbolos, etiquetas, filtros y consultas de atributos. Metodológicamente, la lógica de las capas es crucial para integrar datos heterogéneos.

Cada capa funciona como una unidad de entrada o salida en operaciones de superposición y extracción espacial, transformando conjuntos de datos y variables en conocimiento geográfico interpretable (Esri, 2025).

Servicios de mapas web (WMS/WFS)

Los servicios de mapas web son mecanismos estandarizados para la publicación y consumo de información geoespacial a través de internet, favoreciendo la interoperabilidad entre plataformas. El estándar WMS (Web Map Service), definido por el Open Geospatial Consortium (OGC), establece una interfaz para solicitar imágenes de mapas georreferenciadas (tales como PNG o JPEG) generadas a partir de una o varias capas; su propósito central es la visualización del mapa renderizado. En contraste, el estándar WFS (Web Feature Service) proporciona acceso a la información a nivel de entidades (features) y atributos, permitiendo la consulta e intercambio de geometrías vectoriales y sus propiedades, lo cual soporta análisis avanzados en el lado del cliente. En términos aplicados, el WMS es idóneo para compartir cartografía como producto visual, mientras que el WFS es fundamental cuando se requiere reutilizar datos vectoriales como insumo analítico en diversos entornos; ambos estándares son complementarios en arquitecturas SIG Web al facilitar la integración de capas provenientes de múltiples organismos (Open Geospatial Consortium Inc., 2006).

Bases de datos geoespaciales y su importancia para el análisis de este tipo de información.

Base de datos espaciales

La base de datos espaciales es el sistema de gestión de bases de datos el cual ha sido diseñado para almacenar, consultar y manipular los datos representados en el espacio, estos datos permiten describir espacialmente las siguientes características como atributos (representación de las características de los objetos), localización (representación de la geometría y su ubicación) y

topología (permite mejorar la interpretación semántica y determinar jerarquías de los elementos a través de sus relaciones) (Gutiérrez, 2006). Las bases de datos permiten evitar:

- Redundancia de los datos
- Falta de control de los datos
- Inadecuada manipulación de datos
- Programación excesiva

Por otro lado, las bases de datos permiten tener datos debidamente estructurados, una mayor dependencia y flexibilidad para el procesamiento de la información, integridad de los datos y por último una mayor duración en la información (Gutiérrez, 2006).

Geodatabase

Es un conjunto de datasets geográficos de distintas clases que están almacenados en una carpeta común del sistema de archivos o un sistema de administración de bases de datos relacionales, la cual puede tener muchos tamaños, poseer un numero variados de usuarios e inclusive pasar de ser una base de datos pequeña a ser una gran base de datos. Por otro lado, se puede definir como una estructura nativa de ArcGIS bajo un modelo de información completo para representar y administrar información geográfica integrando una seria de tablas que almacenas clases de entidad, dataset, ráster y atributos. Además, los objetos de datos de SIG avanzado agregan comportamientos, reglas para la administración de la integridad espacial y herramientas para trabajar una gran cantidad de relaciones espaciales de las entidades, ráster y atributos. (ESRI, 2025).

Metodología

La metodología para el presente trabajo se desarrolló utilizando un enfoque cuantitativo y aplicado, con un alcance descriptivo y analítico, y un diseño no experimental. El objetivo de este estudio es analizar la información biológica sobre los mamíferos marinos del Caribe colombiano desde una perspectiva espacial y temporal, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Partiendo, de la recopilación, verificación y estandarización de datos biológicos con referencia geográfica para garantizar la coherencia taxonómica, espacial y temporal. A continuación, esta información se organizó en una base de datos geográficos según criterios de calidad, trazabilidad e interoperabilidad. Posteriormente, se incluyeron variables oceanográficas y ambientales como datos explicativos y se aplicaron métodos de análisis espacial para determinar los patrones de distribución de las especies y las variaciones temporales. Por último, los datos y los productos derivados se publicaron en un GeoVisor, implementado a través de la plataforma ArcGIS Experience Builder, con el fin de mejorar la gestión integrada, la referenciación y la visualización interactiva de la información científica.

Enfoque metodológico

El estudio se llevó a cabo utilizando un enfoque metodológico cuantitativo y aplicado, de carácter descriptivo y analítico, centrado en el tratamiento sistemático de los registros biológicos georreferenciados de los mamíferos marinos y las variables oceanográficas en el mar Caribe colombiano. De acuerdo con los objetivos propuestos, el estudio se basó en la integración, revisión y unificación de la información con el fin de organizar una base de datos geoespacial, así como en el uso de técnicas de análisis espacial mediante sistemas de información geográfica.

(SIG), lo que permitió identificar patrones de distribución y variabilidad biológica, respaldados por información ambiental seleccionada según criterios de relevancia y disponibilidad.

El diseño metodológico fue de carácter no experimental, dado que no se realizó la manipulación deliberada de variables; en su lugar, se analizó la información observacional proveniente de fuentes secundarias. Adicionalmente, el presente trabajo incorporó la implementación herramientas SIG – WEB mediante la configuración de un GeoVisor en la plataforma de ArcGIS Experience Builder. Esta herramienta se utilizó como instrumento de soporte para la gestión y visualización de la información científica integrada, facilitando procesos de consulta, filtrado y representación cartográfica bajo un enfoque espacio–temporal, sin que esto requiriera el desarrollo de *software* desde código fuente.

Tipo de Estudio

El tipo de estudio esta investigación es de carácter correlacional, descriptivo y explicativo permitiendo entender la relación entre variables naturales con los registros de mamíferos marinos identificados en el área de estudio, además, describiendo las variables que más peso tienen con respecto a las diferentes especies de cetáceos observadas para luego analizar y determinar patrones para conocer el estado de conservación de los ecosistemas marinos, asimismo, identificar las áreas en las cuales se están realizando actividades de exploración y explotación de hidrocarburos y su relación con los registros biológicos. Por otro lado, esta investigación permite evaluar los aportes de los Sistemas de Información Geográfica y del manejo adecuado de bases estructuradas y su contribuyendo como herramienta de almacenamiento, visualización y análisis de información científica marina que contribuye a la toma de decisiones para la conservación de

especies que por causas del aceleramiento del cambio climático están siendo afectadas y que son de gran importancia en las dinámicas trópicas y ecológicas de estos ecosistemas.

Procedimiento

Esta investigación se realizó en tres fases que se describen a continuación:

Fase 1 Recolección de información y estructuración de base de datos.

Recopilación de información primaria

Esta fase metodológicamente se desarrolló mediante la recolección, depuración y normalización de la información espacial que alimentará la herramienta SIG - WEB, inicialmente, se desarrolló la consulta de información primaria obtenida de las bitácoras de campo y de los respectivos informes técnicos con la finalidad de identificar la información base de los registros de mamíferos marinos en el Caribe colombiano en una temporalidad entre el año 2008 hasta el año 2025, lo que permitió reconocer la calidad de los datos y de los campos fundamentales (Taxonómica, Datos de embarque, información del observador, tiempo, características del avistamiento y la información geográfica) y asimismo, construir la base para la consolidación y unificación de criterios técnicos, biológicos y geográficos para el almacenamiento de la información de mamíferos marinos como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2

Información base para la construcción del formato único

CAMPOS	DESCRIPCIÓN	TIPO DE DATO
ID	Identificador único de cada registro	Double
CONTRATO	Nombre del proyecto financiador	Text
TIPO DE CONTRATO	tipo de actividad de Observación de Fauna Marina	Text
REGION	Región de monitoreo	Text
EMBARCACIÓN	Nombre de la embarcación	Text

OBSEVADOR	Persona que realizó la observación	Text
FECHA	Fecha de la observación	Date
HORA_I	Hora inicial de la observación	Float
HORA_F	Hora final de la observación	Float
PROF_M	Profundidad del punto de observación	Double
GRUPO	Descripción taxonómica del individuo	Text
ORDEN		Text
SUBORDEN		Text
FAMILIA		Text
GENERO		Text
ESPECIE		Text
NOM_COMUN		Text
ANG_OBS	Angulo de observación	Double
COMPORTAMIENTO	Comportamiento de los individuos observados	Text
NUM_IND	Número total de individuos identificados	Double
NUM_ADULT	Número de adultos identificados	Double
NUM_JUV	Número de individuos juveniles	Double
DIRE_GRUPO	Dirección de los individuos observados	Text
LATITUD	Coordenada en Y	Double
LONGITUD	Coordenada en X	Double

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se llevó a cabo el flujo de trabajo para procesar y organizar los datos espaciales, que se organizó como un proceso lógico que comenzaba con la depuración de las tablas y terminaba con la habilitación del uso de la información dentro de GeoVisor. En primer lugar, los registros de datos biológicos recopilados en formatos Excel y CSV se sometieron a un proceso de depuración y unificación, en el que se verificaron los tipos de datos, la coherencia de la clasificación, los formatos de fecha y hora, la existencia de duplicados y la integridad de las características principales. Paralelamente, se llevó a cabo un proceso de validación de

coordenadas para garantizar la calidad espacial. Se verificaron los valores cero, las latitudes y longitudes válidas, la inversión de signos, los errores de entrada y la coherencia de las ubicaciones en relación con la zona de estudio. En esta fase, se determinó el sistema de referencia especificado explícitamente por la fuente de información, teniendo en cuenta la compatibilidad con WGS 1984 (EPSG:4326). Cuando fue necesario, se realizó una conversión a MAGNA-SIRGAS (EPSG:4686), el estándar nacional oficial, para garantizar la coherencia de las ubicaciones de los datos de entrada y la trazabilidad geodésica.

Una vez depurada la matriz tabular, los registros se transformaron en información geoespacial en el software ArcGIS Pro mediante la generación de una capa de puntos a partir de las coordenadas de latitud y longitud; en este proceso se asignó el sistema de referencia correspondiente y se verificó su correcta interpretación en términos de ubicación, proyección y unidades. A continuación, se estructuró una base de datos geoespacial en formato File Geodatabase (GDB) para organizar y almacenar temáticamente los insumos del estudio como se puede observar en la Figura 1. Este procedimiento incluyó la creación de feature datasets, los cuales permitieron una agrupación lógica de entidades bajo un mismo sistema de coordenadas y facilitaron la aplicación consistente de propiedades de integridad y control de calidad. En esta fase, se implementaron procedimientos de validación de geometrías, consistencia de atributos y control de duplicados; asimismo, para capas vectoriales específicas, se aplicaron reglas de integridad espacial y validaciones topológicas a nivel de dataset. Finalmente, los datos consolidados en la GDB se prepararon para su publicación en el entorno web, garantizando que las capas contaran con atributos normalizados, metadatos básicos y parámetros de visualización compatibles con su despliegue y exploración en el GeoVisor institucional.

Figura 1

Estructura de la GDB construida

Name	Type
Abiotica	File Geodatabase Feature Dataset
Biotico	File Geodatabase Feature Dataset
LimitesAdministrativos	File Geodatabase Feature Dataset
ParametrosFisicoQuimicos	File Geodatabase Feature Dataset
Batimetria_Mar_Caribe	File Geodatabase Raster Dataset

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de garantizar la integridad y coherencia espacial de los datos, se definieron y aplicaron reglas topológicas específicas dentro del feature dataset. Se implementó la regla Must Be Disjoint (deben ser disjuntos) para la capa de puntos de registros biológicos, lo que permitió identificar y corregir la presencia de registros duplicados o redundantes en una misma localización geográfica. Asimismo, se validó la consistencia de la información mediante la regla Must Be Properly Inside (deben estar propiamente dentro) en relación con el polígono de delimitación del área de estudio, asegurando que la totalidad de los datos se encontrara estrictamente dentro de los límites geográficos del mar Caribe colombiano. Este proceso de validación técnica permitió mitigar errores de posicionamiento y asegurar la precisión cartográfica necesaria para los análisis de distribución y variabilidad temporal posteriores.

Recopilación de información secundaria

Luego de identificar la información primaria, se realizó la consulta de información secundaria que complementara los procesos de análisis de información de la herramienta SIG – WEB para ello, se indago en diferentes fuentes de información geográfica a escala mundial hasta

escala nacional con el propósito de seleccionar las variables que tienen una correlación con los registros de mamíferos marinos en el área del Caribe colombiano.

A continuación, como se observa en la Tabla 3 la información cartográfica identificada:

Tabla 3

Información secundaria identificada

Nombre de la variable	Descripción	Tipo de geometría	Información cartográfica	Fuente de información
Batimetría	Permite describir la profundidad y los respectivos relieves del fondo marino	Ráster	Año: 2025 Resolución espacial: 300m	(GEBCO, 2025)
Clorofila	Indicador directo de la biomasa Fito planctónica y de la productividad primaria, que constituye la base de la cadena trófica marina. Altos niveles de clorofila suelen asociarse a mayor presencia de presas de cetáceos.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Fosfatos	Nutriente limitante para el crecimiento del fitoplancton. Su concentración regula la productividad biológica y, por	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución	(Bio-ORACLE, 2025)

	ende, la disponibilidad de presas para cetáceos.		espacial: 300m	
Hierro	Es un micronutriente esencial para el fitoplancton, favoreciendo la fotosíntesis y la productividad primaria. Variaciones en su concentración determinan la disponibilidad de alimento en los ecosistemas marinos.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Nitratos	Nutriente clave para la fotosíntesis del fitoplancton. La dinámica de nitratos controla la productividad de ecosistemas marinos y las cadenas alimenticias superiores.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Oxígeno Disuelto	Refleja la calidad del agua y la disponibilidad de oxígeno para organismos marinos. Bajos niveles afectan la distribución de peces y otras	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)

	presas de cetáceos, influyendo en su distribución.			
PH	Regula la acidez del agua y está relacionado con procesos de acidificación oceánica que afectan la disponibilidad de carbonatos y, por ende, la base de la cadena trófica (fitoplancton y zooplancton), de la cual dependen los cetáceos de forma indirecta.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Salinidad	Afecta la densidad del agua, la circulación oceánica y la distribución de organismos. Cambios en salinidad pueden modificar la disponibilidad de presas y las rutas de migración de cetáceos.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Silicatos	Nutrientes esenciales para diatomeas, un grupo Fito planctónico clave en la productividad marina. Su	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución	(Bio-ORACLE, 2025)

	abundancia regula la biomasa primaria y afecta indirectamente a los cetáceos a través de la red trófica.		espacial: 300m	
Productividad primaria	Es la tasa de generación de biomasa Fito planctónica. Constituye la base energética de los ecosistemas marinos, determinando la abundancia de niveles tróficos superiores y la presencia de cetáceos.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Atenuación difusa	Indica la penetración de la luz en la columna de agua y, por tanto, la disponibilidad de energía para la fotosíntesis. Afecta directamente la productividad fitoplanctónica y la dinámica trófica asociada a los cetáceos.	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución espacial: 300m	(Bio-ORACLE, 2025)
Temperatura del océano	Factor determinante en la distribución espacial de especies, al influir en la	Ráster	Año: 2010 – 2020 Resolución	(Bio-ORACLE, 2025)

	estratificación, circulación y disponibilidad de nutrientes. Condiciona migraciones y áreas de concentración de cetáceos.		espacial: 300m	
Ecosistemas Marinos	Describe los ecosistemas marinos existentes en el área marina de Colombia	Vector	Año 2021 Escala: 1:500.000	(INVEMAR, 2021)
Mapa de tierras	Visualiza las áreas con licenciamiento para explotación y exploración de hidrocarburos	Vector	Año: 2025 Escala: 1:100.00	(ANH, 2025)
Limites administrativos	Límites administrativos departamentales y límites entre países	Vector	Año 2022 Escala: 1:100.000	(IGAC, 2022)
Límite marino del Caribe Colombiano	Limite administrativo marino de Colombia	Vector	Año 2022 Escala: 1:100.000	(IGAC, 2022)

Fuente: Elaboración propia

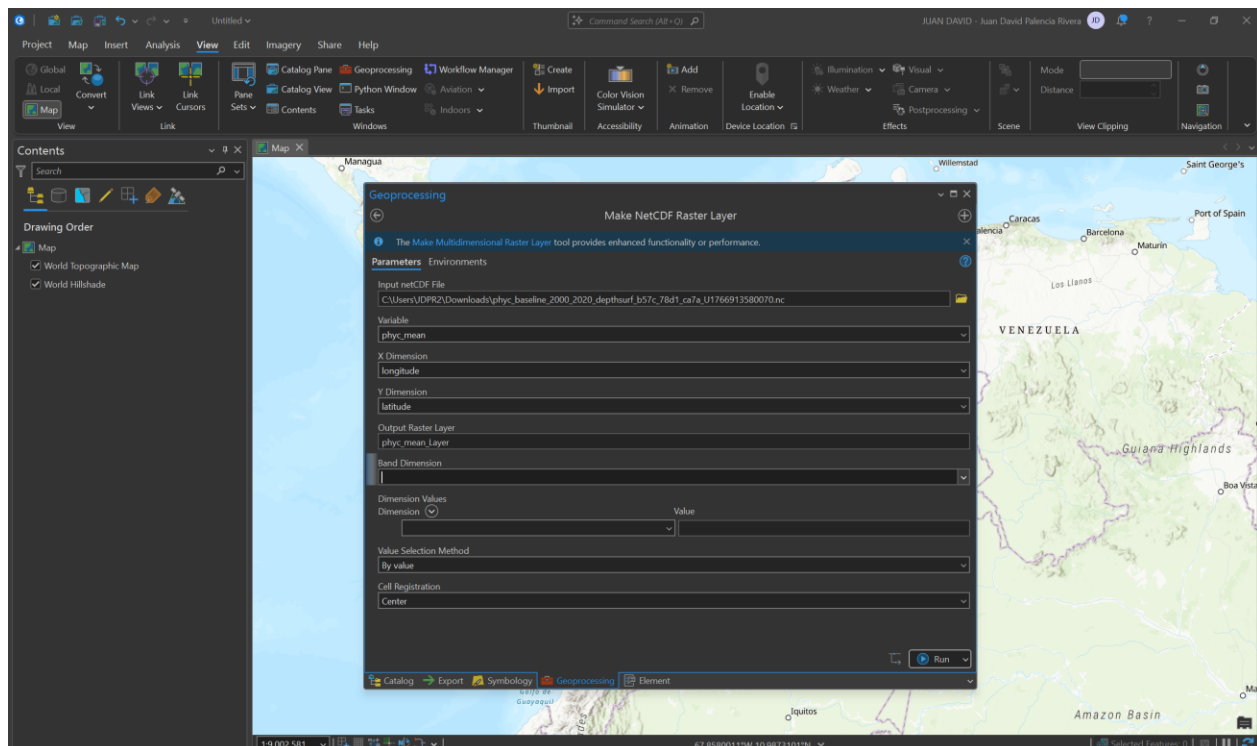
Procesamiento de información temática

Transformación de formato netCDF a TIF

Debido a que la información relativa a los parámetros fisicoquímicos se encontraba almacenada en formato NetCDF¹ (formato de datos científicos multidimensionales), se procedió con la transformación de dichos archivos a formato TIFF. Para este propósito, se empleó inicialmente la herramienta Geoprocessing > Toolboxes > Multidimension Tools > Make NetCDF Raster Layer (Ver Figura 2), lo cual permitió generar una capa ráster preliminar. Posteriormente, cada variable fisicoquímica contenida en el archivo original tales como temperatura, salinidad o presión fueron exportada de manera individual en formato GeoTIFF.

Figura 2

Procesamiento para la transformación de formato netCDF



¹NetCDF: Es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección. Cada una de estas variables se puede mostrar mediante una dimensión (por ejemplo, tiempo).

Fuente: Elaboración propia

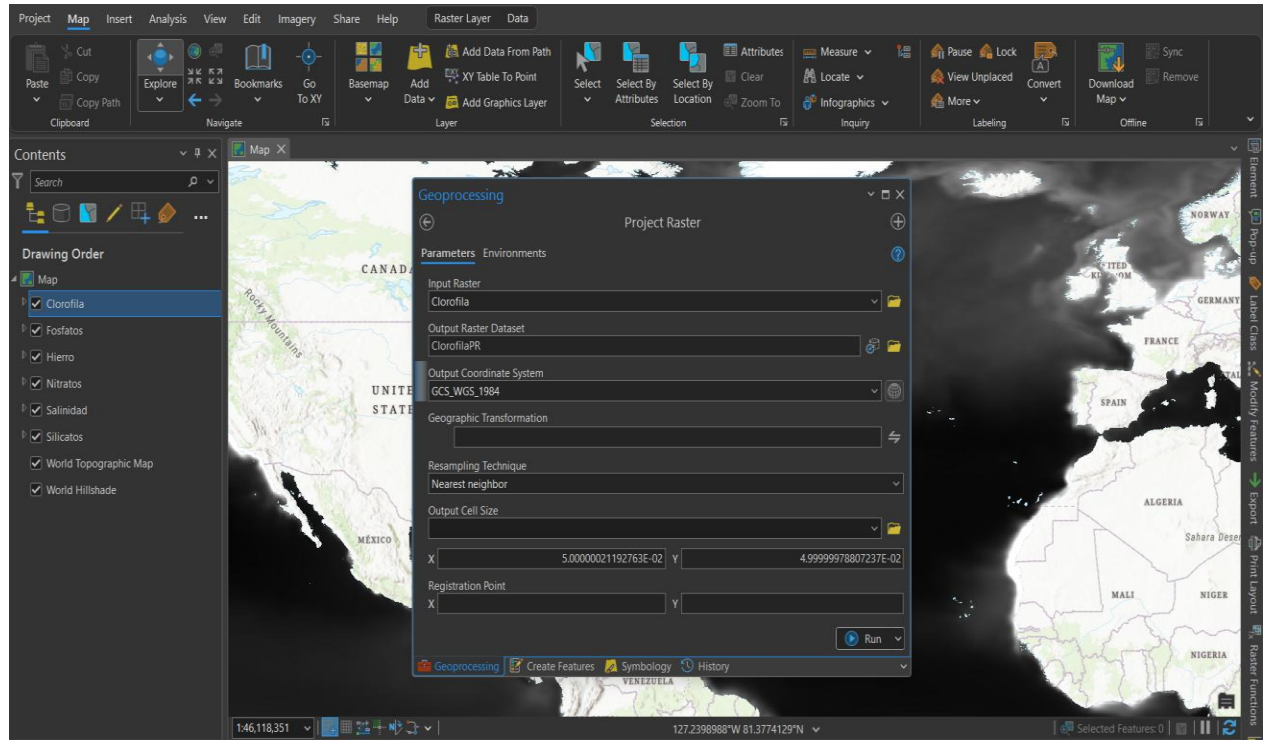
Proyección de sistemas de coordenadas

A continuación, se llevó a cabo un procesamiento secundario de la información para almacenar los datos en una base de datos geográfica (GDB) diseñada para organizar las variables de selección que conforman la solución Web-SIG. Para realizar este procesamiento se utilizó el software ArcGIS Pro. Se unificó el sistema de coordenadas de referencia de toda la información geográfica. Esto fue necesario porque los parámetros espaciales eran diversos, ya que los datos se obtuvieron de diversas fuentes.

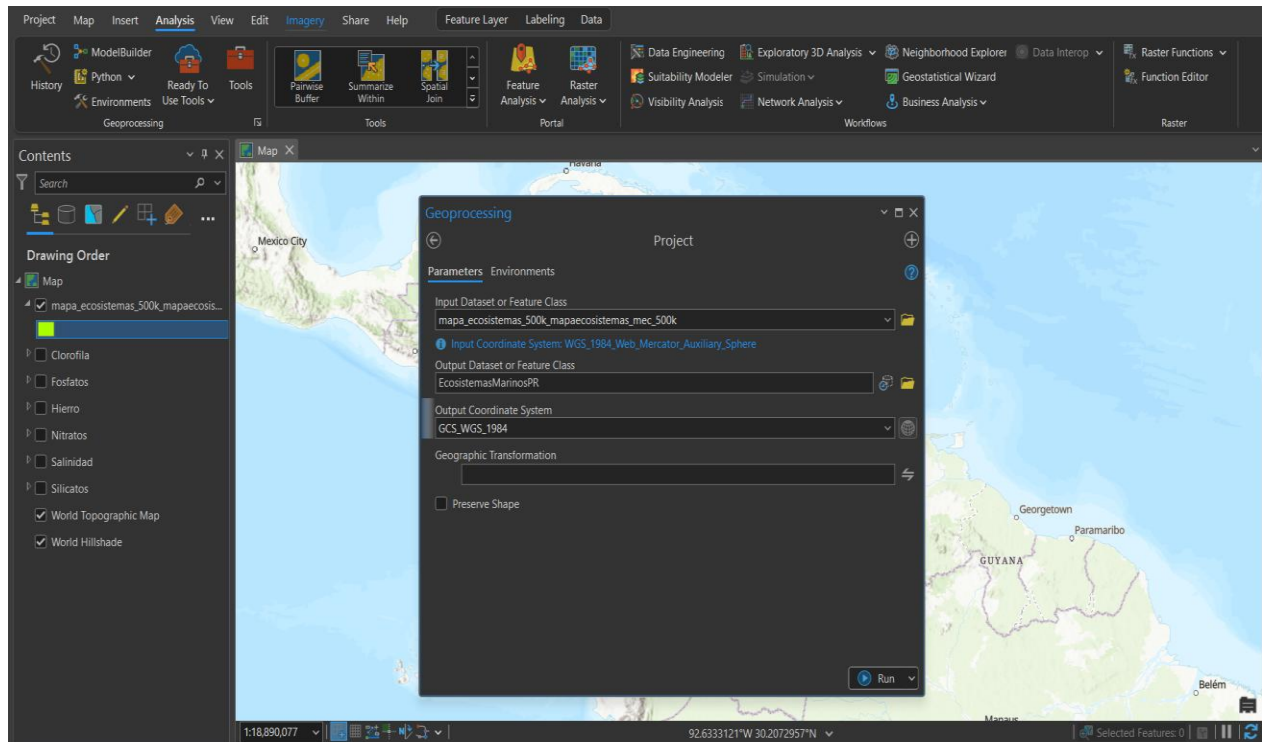
Como resultado, se asignó el sistema de coordenadas geográficas WGS 1984 a todos los datos introducidos. Se utilizaron herramientas específicas para convertir los datos según el tipo de archivo. En el caso de la información en formato vectorial, se utilizó la secuencia Geoprocessing > Toolboxes > Data Management Tools > Projections and Transformations > Project como se observa en la Figura 3; para la información en formato ráster, se aplicó la ruta Geoprocessing > Toolboxes > Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster (Ver Figura 4).

Figura 3

Procesamiento para la conversión de coordenadas al WGS84 en formato ráster



Fuente: Elaboración propia

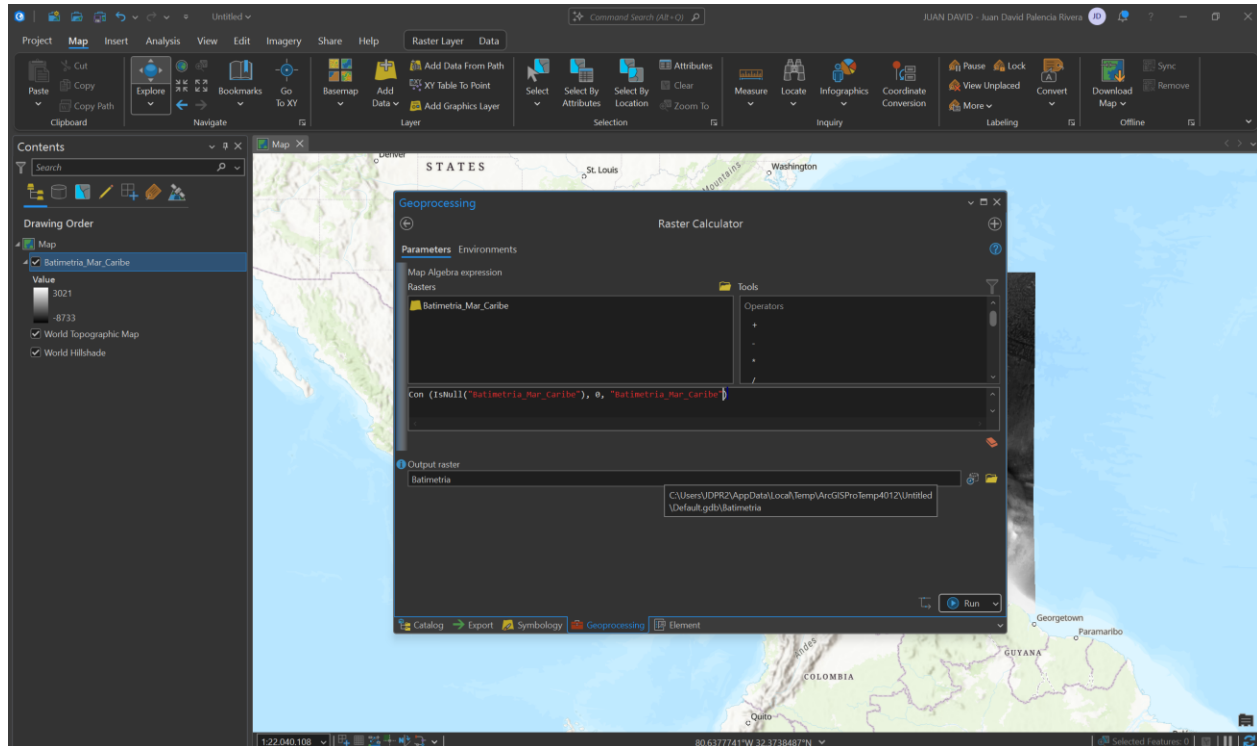
Figura 4*Procesamiento para la conversión de coordenadas al WGS84 en formato vector**Fuente:* Elaboración propia

Eliminación de vacíos de información

Posterior a la unificación del sistema de referencia de coordenadas para cada una de las variables, se identificaron celdas con valores nulos o sin datos (NoData). Con el propósito de corregir esta inconsistencia, se empleó la herramienta Geoprocessing > Toolboxes > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator, mediante la cual se aplicó una expresión condicional basada en álgebra de mapas. La fórmula utilizada fue `Con (IsNull("Temp_Med"), 0, "Temp_Med")` como se puede observar en la Figura 5, la cual permitió rellenar los píxeles identificados como nulos con un valor numérico de '0', garantizando así la continuidad de la capa ráster para los análisis posteriores.

Figura 5

Procesamiento para eliminar los pixeles con valores nulos



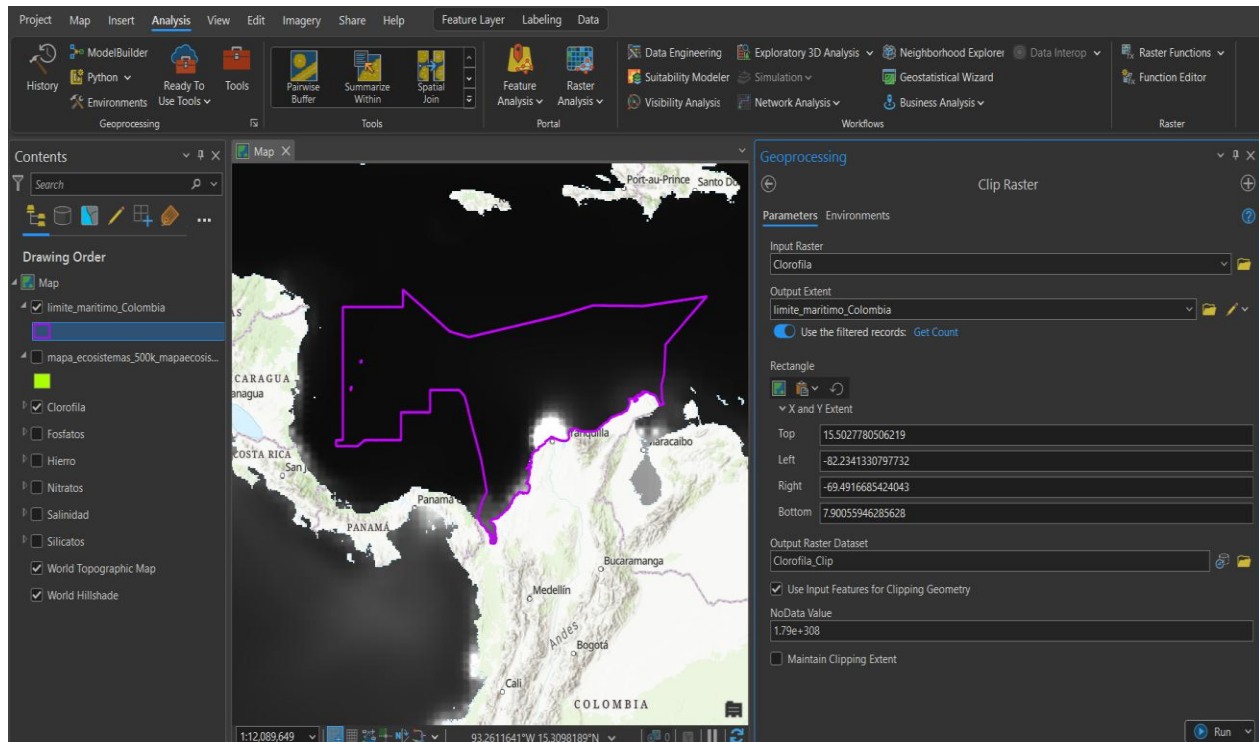
Fuente: Elaboración propia

Delimitación de la información al área de estudio

Posteriormente, se procedió con el recorte de las capas ráster de acuerdo con la delimitación del área de estudio definida. Para este proceso, se tomó como referencia el límite marino del Caribe colombiano y se empleó la herramienta Clip Raster, localizada en la ruta Geoprocessing > Toolboxes > Data Management Tools > Raster > Raster Processing > Clip Raster (Ver Figura 6). Esta operación permitió restringir la extensión espacial de las variables ambientales y oceanográficas exclusivamente a la zona de interés, optimizando así el almacenamiento y el procesamiento de la información dentro de la base de datos.

Figura 6

Procesamiento con la herramienta Clip Raster



Fuente: Elaboración propia

Clasificación de valores

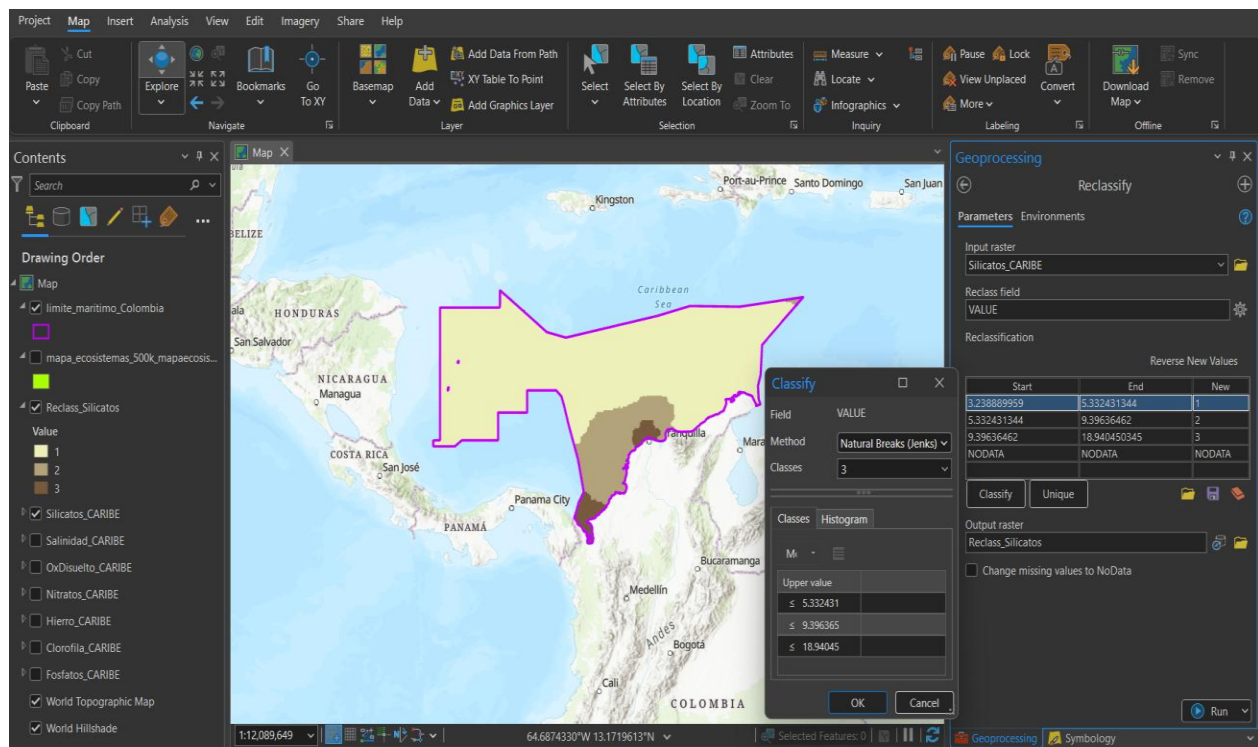
Una vez realizado el recorte de las variables fisicoquímicas al área de estudio, se utilizó la herramienta Reclassify, localizada en la ruta Geoprocessing > Toolboxes > Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify como se observa en la Figura 7. A través de este procedimiento, se buscó agrupar los valores de los píxeles en rangos o clases definidas. Entre los diversos métodos estadísticos disponibles para la discretización de datos, se optó por el método de cortes naturales o Natural Breaks (Jenks), debido a que la información no presentaba variaciones atípicas respecto a lo consultado en la literatura de referencia.

Este método consistió en agrupar los valores numéricos en clases, garantizando la mayor homogeneidad posible a nivel interno y maximizando la heterogeneidad entre los grupos

resultantes. En términos técnicos, el algoritmo identificó los puntos de quiebre que minimizaron la varianza dentro de cada clase y maximizaron la varianza entre clases (ArcGIS, 2025). Como resultado de este análisis, se determinó la clasificación de los parámetros fisicoquímicos en tres rangos específicos.

Figura 7

Procesamiento con la herramienta Reclassify



Fuente: Elaboración propia

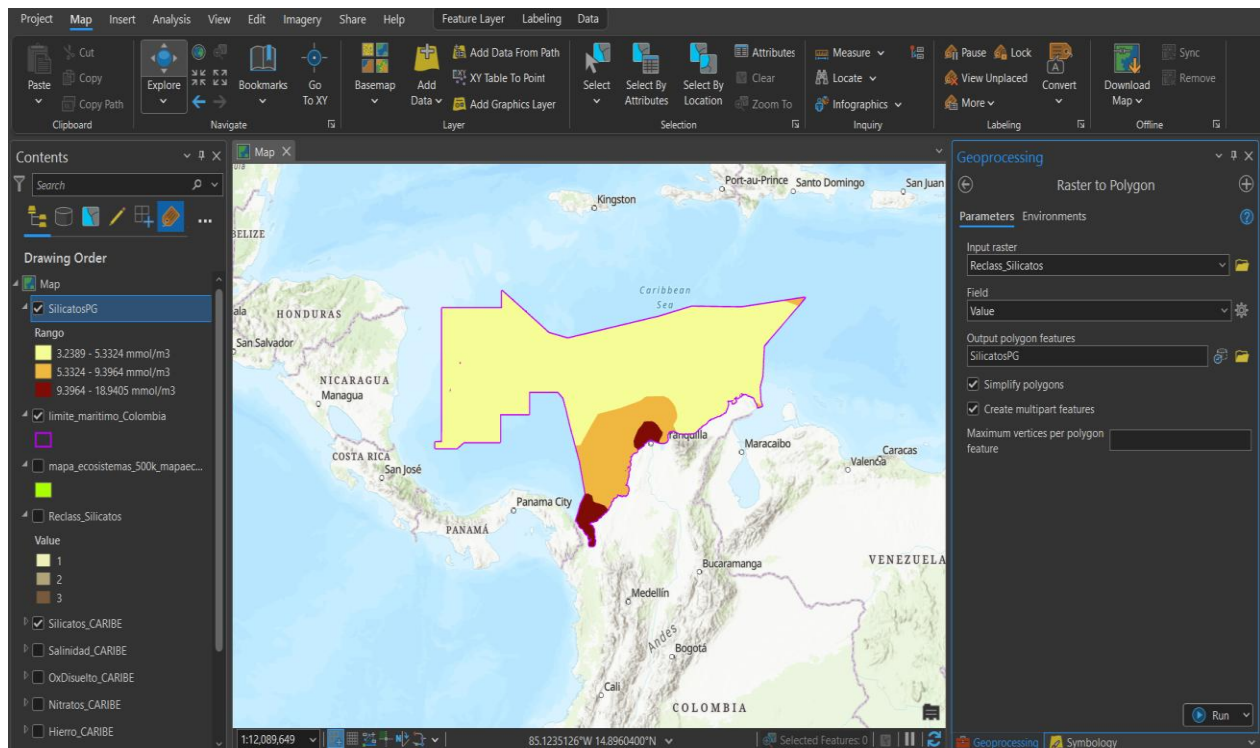
Vectorización de formato raster a vector

Posterior a la clasificación de los rangos de las variables fisicoquímicas, se procedió con la conversión de los datos del formato ráster al formato vectorial. Este proceso tuvo como finalidad la unificación de la información geográfica bajo una estructura de entidades poligonales. Para tal fin, se empleó la herramienta Raster to Polygon, localizada en la ruta Geoprocessing > Toolboxes > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon como se

observa en la Figura 8. Dicha transformación permitió integrar los parámetros ambientales con las capas de registros biológicos, facilitando la gestión y el almacenamiento de los resultados en la geodatabase del proyecto.

Figura 8

Procesamiento con la herramienta Raster to Polygon



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, esta información se almacenó en la GDB (Geodatabase) de acuerdo con la estructura temática definida en el modelo de datos espacial. Este procedimiento garantizó que la totalidad de los insumos integrados cumpliera con los estándares de calidad establecidos, verificando la ausencia de inconsistencias geométricas, topológicas y sistemáticas. La organización bajo estos criterios técnicos aseguró la integridad de la base de datos, facilitando su posterior publicación y consulta interactiva en el entorno Web – SIG.

Visualización de información, y estandarización de aspectos cartográficos

Para la visualización tridimensional de la información geográfica, se empleó el software ArcGIS Pro mediante la herramienta Global Scene, la cual permite representar datos en un entorno 3D. La batimetría fue incorporada como fuente de elevación utilizando la función Add Elevation Source Layer, con el fin de generar una superficie base de representación por medio de la opción Elevation Surface Layer permite darle todas las características de elevación y exageración para la representación tridimensional de la batimetría, para lo cual se maneja una exageración vertical entre 8 a 10, permitiendo visualizar los aspectos marinos.

Posteriormente, se integraron capas vectoriales (Parámetros fisicoquímicos, registros de mamíferos marinos, límites administrativos, isobatas) y ráster (Modelo batimétrico) correspondientes a los registros biológicos y a las variables fisicoquímicas, definiendo criterios de simbología diferenciada según la naturaleza de los datos (puntual, ráster o temática). Este proceso tuvo como propósito estandarizar la representación cartográfica y garantizar una visualización coherente que sirviera de soporte para la implementación posterior del GeoVisor.

Fase 2 Aplicación de herramientas de análisis espacial

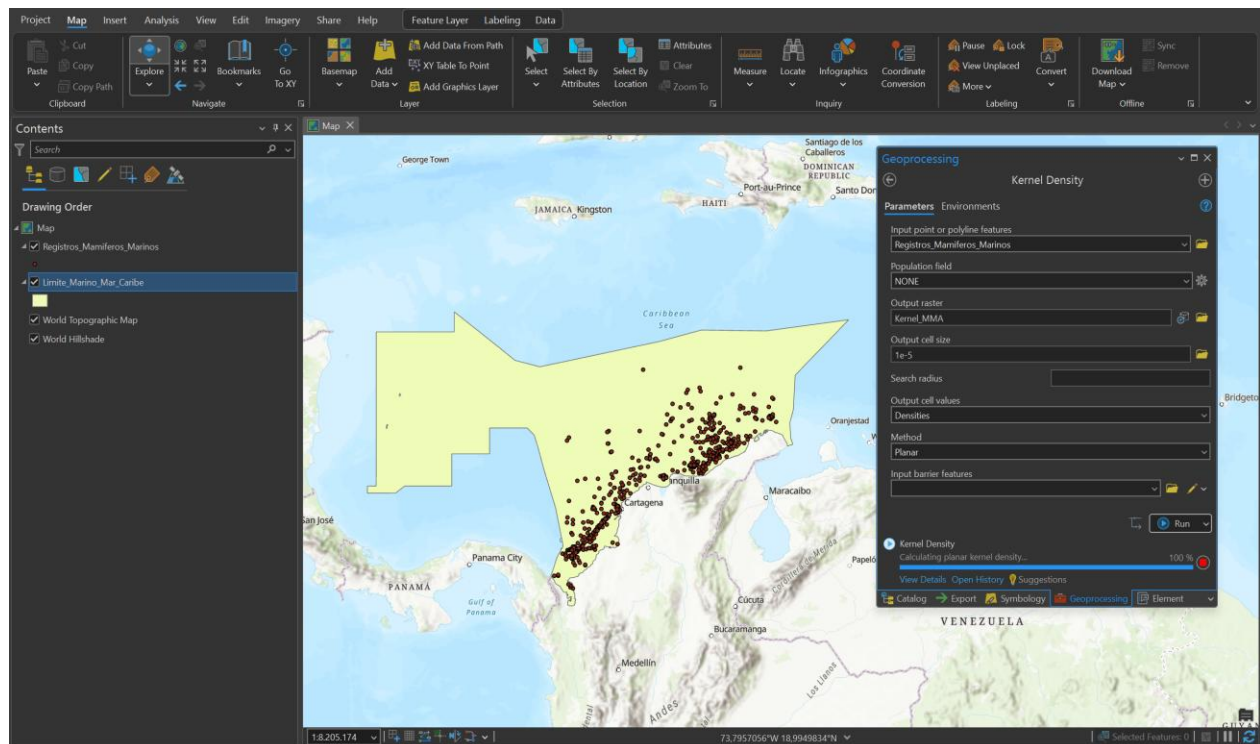
En esta fase se introdujo un procedimiento sistemático para integrar datos de referencia geográficos sobre la presencia biológica y las variables ambientales asociadas, con el fin de analizar la dinámica de los mamíferos marinos y determinar sus patrones de distribución en el Caribe. Este proceso comenzó con el uso de conjuntos de datos que se habían mejorado y estandarizado en una base de datos geográficos, tras verificar su integridad geométrica, su sistema de referencia y la coherencia de atributos importantes como el tipo, la fecha, la fuente y

la calidad. A continuación, se seleccionaron variables ambientales como la salinidad, la temperatura del agua, la clorofila, el fosfato, el silicato, la productividad primaria a partir de teledetección y capas de apoyo. Estos datos introducidos previamente se procesaron adaptándolos al área de estudio, re proyectando las coordenadas, homogeneizando la resolución espacial y procesando los valores NoData para garantizar la compatibilidad con el análisis espacial integrado.

El análisis espacial se desarrolló mediante una secuencia de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se elaboraron mapas de distribución por familias taxonómicas y se evaluaron las áreas de mayor ocurrencia mediante la herramienta Geoprocessing > Toolboxes > Spatial Analyst Tools > Density > Kernel Density, la cual permitió estimar las zonas de mayor concentración de registros según su densidad y cobertura (Ver Figura 9).

Figura 9

Modelación de área de calor bajo la metodología Kernel

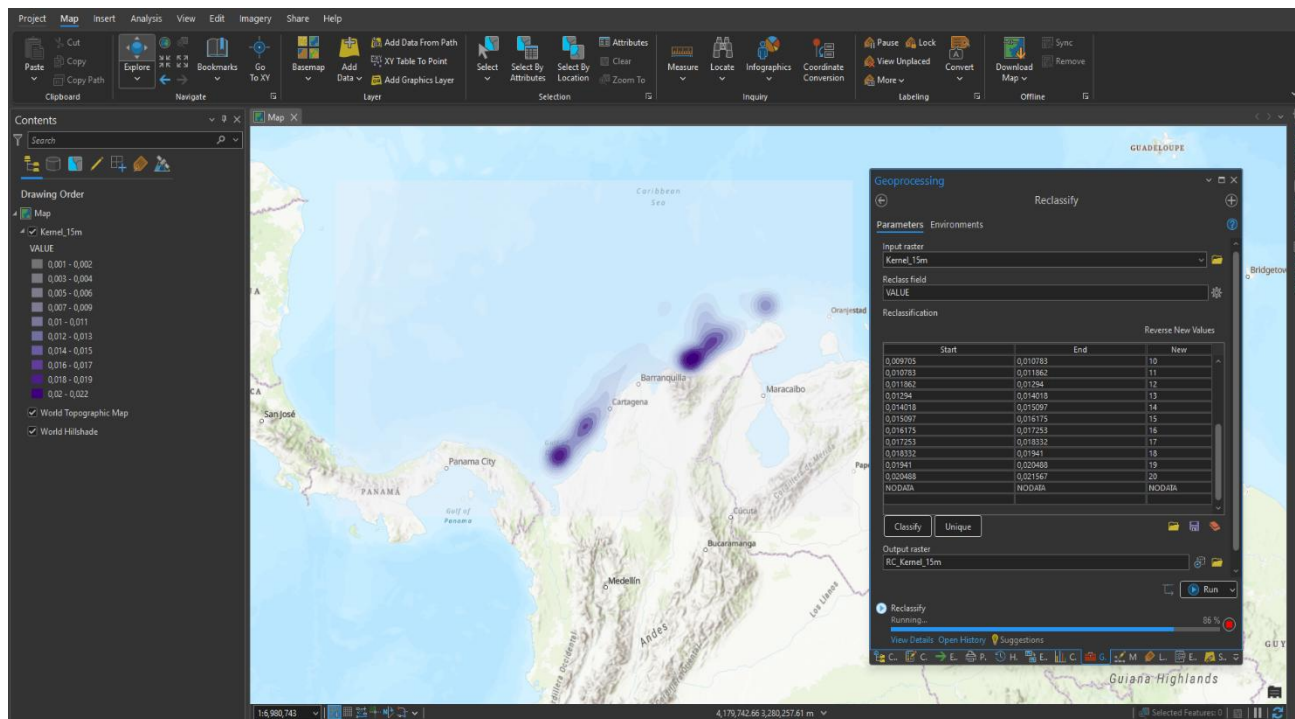


Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procedió a reclasificar los valores derivados del análisis de densidad de Kernel (Kernel Density Estimation - KDE) mediante la herramienta Reclassify (Spatial Analyst Tools > Reclass) (ver Figura 10). El propósito de este proceso fue normalizar la distribución de los valores; para ello, se empleó un método de clasificación en 20 intervalos iguales, donde cada estrato representó el 5% de la densidad acumulada. Finalmente, se llevó a cabo la vectorización de la capa ráster resultante utilizando la función Raster to Polygon (Conversion Tools > From Raster). Este procedimiento permitió delimitar geográficamente los polígonos correspondientes al área de distribución general de los registros (isopleta del 95%) y al área núcleo o de máxima concentración de mamíferos marinos (isopleta del 50%).

Figura 10

Reclasificación del modelo de densidad de kernel



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, mediante la sobreposición de capas (overlay analysis) y la intersección espacial entre las variables ambientales y el área de distribución de los registros de mamíferos marinos, se realizaron los cálculos estadísticos necesarios para comprender las dinámicas ecológicas de las especies en el mar Caribe colombiano. Este flujo metodológico permitió describir la distribución espacial, identificar las zonas de mayor recurrencia y contextualizar los patrones observados en función de los determinantes ambientales predominantes en el área de estudio.

Fase 3 Implementación y evaluación de la funcionalidad del GeoVisor web.

Requerimientos del aplicativo

Antes de implementar GeoVisor, se llevó a cabo una fase de recopilación y definición de requisitos para determinar la funcionalidad, las restricciones de acceso y las condiciones operativas de la aplicación web en ArcGIS Online. Durante esta fase, se identificaron los requisitos funcionales relativos a la visualización de mapas, las consultas de atributos, el filtrado por tipo y período, la sincronización de tablas de mapas y los productos de análisis pre-calculados. Además, se definieron los requisitos de datos necesarios para la publicación desde la base de datos geográficos (GDB) a las capas alojadas (capas de entidades alojadas y capas de imágenes alojadas) con el fin de garantizar la estandarización de campo, la coherencia espacial y los aspectos temporales.

Al mismo tiempo, se definieron los requisitos de seguridad en función de la naturaleza específica de GeoVisor, incluyendo la autenticación obligatoria, el uso compartido restringido por grupo u organización y el control de acceso basado en perfiles de usuario. Además, se definieron los requisitos no funcionales para garantizar el funcionamiento en un entorno web, en

particular las normas de rendimiento relacionadas con la optimización por tamaño y el manejo de puntos de alta densidad como se observa en la Tabla 4. También se tuvo en cuenta la compatibilidad con los navegadores modernos y el diseño adaptable, junto con la trazabilidad a través de metadatos y registros de actualización. El resultado de esta fase fue la estandarización de la matriz.

Tabla 4

Requerimientos del geovisor

ID	Requerimiento	Tipo	Prioridad
RF-01	Autenticación obligatoria para el acceso al GeoVisor (aplicativo privado).	Seguridad	Alta
RF-02	Compartición del GeoVisor y sus ítems asociados (capas y Web Map) restringida por grupo u organización.	Seguridad	Alta
RF-03	Consumo de un Web Map como núcleo cartográfico de la experiencia.	Funcional	Alta
RF-04	Visualización de registros biológicos (puntos) con simbología temática por especie/grupo.	Funcional	Alta
RF-05	Configuración de pop-ups científicos con campos clave (especie, fecha, fuente, calidad, observaciones).	Funcional	Alta
RF-06	Filtrado por especie (lista controlada) aplicado a mapa y tabla.	Funcional	Alta
RF-07	Visualización temporal mediante widget de navegación temporal o filtros temporales equivalentes.	Funcional	Media

RF-08	Tabla de atributos vinculada al mapa (selección sincronizada mapa–tabla).	Funcional	Media
RF-09	Búsqueda por atributos (p. ej., especie o ID de registro) desde el GeoVisor.	Funcional	Media
RF-10	Inclusión de capas ambientales relevantes (raster/vector) como contexto de análisis.	Funcional/Datos	Media
RF-11	Visualización de productos analíticos pre-computados (densidad, grillas, hotspots u otros).	Funcional	Media
RF-12	Sección de metadatos y fuentes dentro del GeoVisor (origen, fecha, limitaciones).	Funcional	Media
RD-01	Publicación de datos desde la GDB como Hosted Feature Layer (puntos/líneas/polígonos).	Datos	Alta
RD-02	Normalización de campos mínimos en capa biológica (especie, fecha, fuente, calidad).	Datos	Alta
RD-03	Campo fecha en tipo Date y preparado para uso temporal.	Datos	Alta
RNF-01	Rendimiento: tiempos de carga inicial y de filtros dentro de rangos aceptables.	No funcional	Alta
RNF-02	Optimización para alta densidad de puntos (visibilidad por escala, clustering o generalización).	No funcional	Alta
RNF-03	Disponibilidad y estabilidad del GeoVisor en navegadores modernos (Chrome/Edge/Firefox).	No funcional	Media
RNF-04	Diseño responsivo para escritorio y tablet/móvil (lectura y navegación funcional).	No funcional	Media

RNF-05	Trazabilidad: bitácora de actualización y control de versiones de datos/capas.	No funcional	Media
RNF-06	Integridad: consistencia entre la GDB y lo publicado (campos, conteos, dominios).	No funcional/Datos	Alta
RS-01	Restricción de edición: capas de consulta configuradas como no editables para usuarios visor.	Seguridad	Alta
RS-02	Control de acceso por roles (administrador/editor/visor) según necesidad del proyecto.	Seguridad	Media
RS-03	Resguardo de información sensible: ocultamiento de campos o uso de vistas si aplica.	Seguridad/Datos	Media

Fuente: Elaboración propia

Implementación del GeoVisor en Experience Builder ArGIS

Para el diseño y construcción de la herramienta SIG – WEB se estructuró en tres fases: preparación de la información cartográfica, publicación de información espacial en la nube y la configuración del aplicativo web. Inicialmente, la preparación de la información se realizó con el software ArcGIS Pro, donde las variables vectoriales y ráster fueron organizadas, simbolizadas y estructuradas de acuerdo con las características y los objetivos propuestos; posteriormente, fueron exportadas como Web Map y Web Scene, por medio de las opción que permite el software de almacenar información cartográfica en la nube de almacenamiento de la organización en ArcGIS Online, permitiendo mantener los atributos y las características simbólicas definidas previamente. Con esta acción, se garantizó su disponibilidad y accesibilidad para la construcción de la herramienta SIG – WEB.

Publicada la información espacial que alimentará la herramienta SIG – WEB, se procedió con la construcción de la herramienta por medio de la aplicación Experience Builder de ArcGIS Online. Iniciando con la selección de una plantilla base en blanco con el fin de diseñar y estructurar un modelo que cumpla con los requerimientos técnicos y de fácil interpretación visual. Posteriormente, se incorporó el Web Map y el Web Scene desarrollado anteriormente junto con los widgets funcionales necesarios para optimizar la funcionalidad y usabilidad del aplicativo los cuales podemos destacar leyenda, lista de capas, filtros de atributos, barras de búsqueda, herramientas de conversión de coordenadas, entre otras. Permitiendo afianzar y fortalecer la herramienta con una serie de widgets interactivos facilitando los procesos de análisis, consulta y filtrado de información en un entorno SIG – WEB.

Finalmente, se realizó la fase de personalización y validación del GeoVisor, para lo cual se ajustaron los aspectos visuales de la interfaz siguiendo la línea grafica institucional (colores, tipografía, logotipos y elementos visuales). Posteriormente, se configuraron las interacciones entre los distintos widgets con la finalidad de optimizar la experiencia entre usuario y herramienta SIG – WEB. Para validar la aplicación, se empleó la función Preview de Experience Builder que permitió realizar pruebas de funcionabilidad verificando el desempeño de carga de los datos, funcionalidad de las herramientas integradas y respuesta de consulta. De esta manera, se consolidó un prototipo funcional de la herramienta SIG – WEB con características técnicas adecuadas para la implementación como herramienta de apoyo en el análisis de la información espacial de mamíferos marinos.

Evaluación de la funcionalidad del GeoVisor

Para esta fase, la metodología se desarrolló a partir de la implementación de un conjunto de pruebas de desempeño y usabilidad; estas pruebas se enfocaron en validar la capacidad de la herramienta para procesar y representar las variables, garantizando la integridad de los atributos, consistencia en la simbología y la correcta visualización en entornos dinámicos. Para ello, se cargó todos los datasets representativos (Registros de mamíferos marinos, variables fisicoquímicas, límites administrativos, información ecosistémica, información batimétrica).

En primer lugar, se aplicaron criterios de funcionalidad que permiten medir la eficiencia de la aplicación, para ello, se revisa los tiempos de carga del visor, la facilidad de navegación en diferentes dispositivos (portátiles, teléfonos móviles) claridad en la presentación de las capas temáticas y leyenda, así como la efectividad de los widgets, filtros y herramientas incorporadas. Estas pruebas permitieron estimar el rendimiento en cuanto a velocidad de carga, estabilidad de la aplicación y facilidad de interacción con los diferentes widgets incorporados. Los resultados de este proceso metodológico proporcionaron un insumo clave para determinar el grado de funcionalidad del GeoVisor como un modelo dinámico de apoyo a la gestión y análisis de información biológica y ambiental.

Resultados

Recolección de información y estructuración de base de datos.

Se recopilaron los registros de mamíferos marinos en el mar Caribe colombiano a partir del análisis sistemático de bitácoras de campo e informes técnicos correspondientes al periodo 2008–2025. La información biológica se consolidó inicialmente en una base de datos tabular, estructurada mediante un esquema estandarizado que integró atributos taxonómicos, identificación del observador, condiciones ambientales del evento, información operativa del avistamiento y un código único por registro. Como resultado de este proceso, se obtuvieron 641 registros para el área de estudio, agrupados en cuatro familias y 18 especies (Figura 11). Estos datos se transformaron en información geoespacial mediante la generación de una capa de puntos basada en coordenadas geográficas, asignándoles un sistema de referencia espacial consistente y validando su ubicación dentro de los límites del área de estudio.

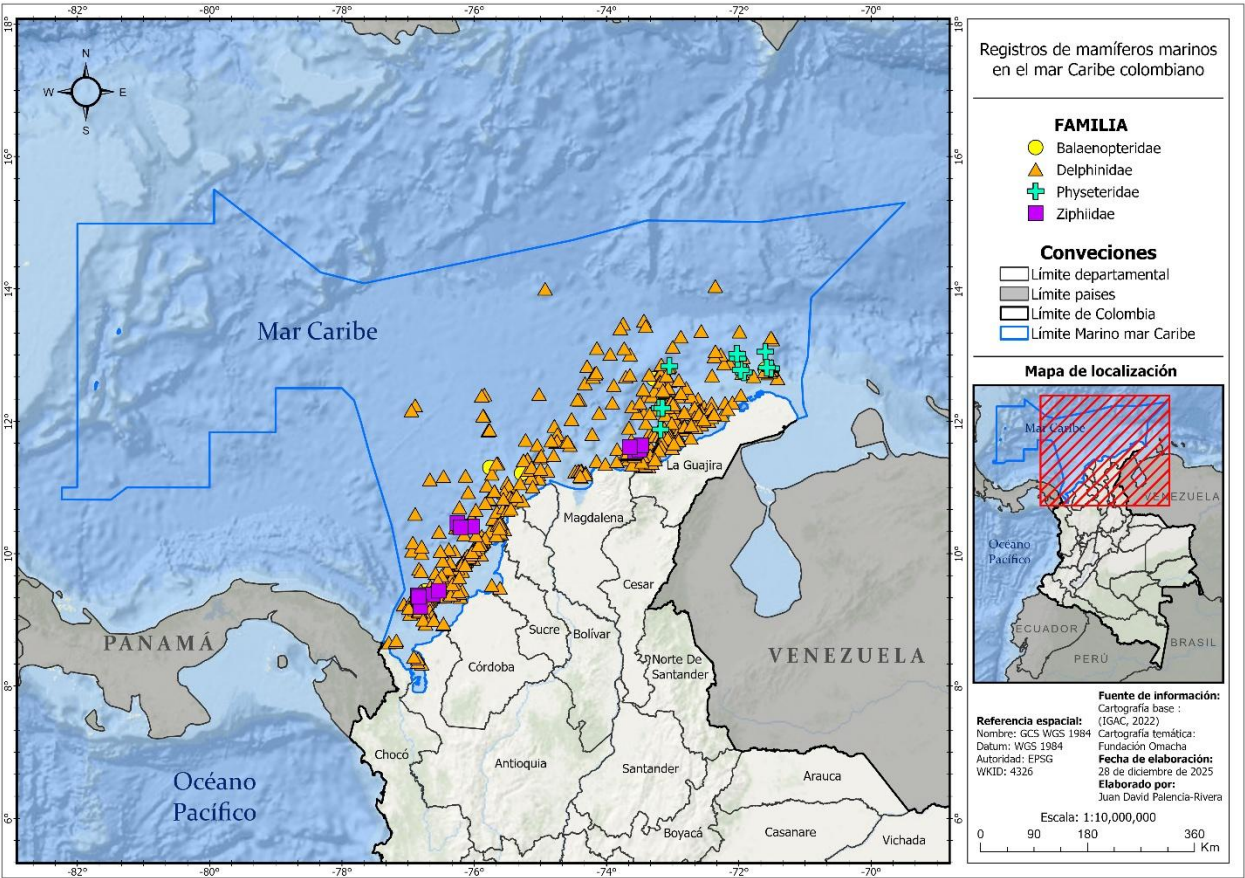
Seguidamente, se consolidó la información ambiental secundaria proveniente de diversas fuentes regionales y globales. Dicha información fue procesada en ArcGIS Pro con el fin de delimitarla al área de estudio, homogeneizar los sistemas de referencia, corregir inconsistencias geométricas y ejecutar controles de calidad sobre las tablas de atributos. En el caso de las variables fisicoquímicas, debido a su naturaleza ráster, se realizó un pretratamiento orientado a mejorar la continuidad espacial mediante la corrección de valores nulos (NoData) y se aplicó una reclasificación por rangos de interés. Asimismo, se definió los atributos que estructurarán la información de las variables fisicoquímica (Tabla 6) y para fines de integración temática, algunas variables fueron convertidas a formato vectorial, preservando el ráster original como insumo base.

Tabla 5
Definición de atributos en las variables fisicoquímicas

Campo	Tipo	Descripción	Dominio
Rango	String	Define el rango de la variable estimada	N/A
Fuente	String	Describe la fuente donde se obtuvo la información	N/A
Area_Km2	Double	Área en kilómetros cuadrados	N/A

Fuente: Elaboración propia

Figura 11
Registros de mamíferos marinos en el área del mar Caribe colombiano



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la información biológica y ambiental se integró en una Geodatabase (GDB) organizada en cuatro feature datasets: Abiótico (áreas de exploración de hidrocarburos e isóbatas), Biótico (ecosistemas marinos a escala 1:500.000 y registros georreferenciados de mamíferos marinos), Límites administrativos (divisiones departamentales y fronteras marítimas) y Parámetros fisicoquímicos (Atenuación difusa, Clorofila, Fosfatos, Hierro, Nitratos, Oxígeno Disuelto, PH, Salinidad, Silicatos, Productividad primaria y Temperatura del océano) y por último el modelo ráster de batimetría . En cada unidad se definieron reglas de validación y topología, garantizando la integridad estructural, la consistencia espacial y la trazabilidad de la base de datos geoespacial integrada (Tabla 6).

Tabla 6

Reglas topológicas aplicadas en la GDB

Feature Dataset	Capa	Tipo geometría	Regla topológica	Propósito
Límites administrativos	Límites departamentales, marinos, y fronterizos.	Polígono	Must Not Overlap / Must Not Have Gaps	Integridad de cobertura
Biótico	Ecosistemas marinos	Polígono	Must Not Overlap / Must Not Have Gaps	Evitar solapes/vacíos
	Registros Mamíferos Marinos	Punto	Must Be Disjoint / Must Be Properly Inside	Evitar registros fuera del área de trabajo / control

				de duplicidad de atributos
Abiótico	Bloques hidrocarburos	Polígono	Must Not Overlap	Evitar duplicidad espacial
	Isóbatas	Línea	Must Not Self-Intersect	Integridad geométrica
Parámetros físicoquímicos	Atenuación Difusa	Polígono	Must Not Overlap / Must Not Have Gaps	Evitar solapes/vacíos
	Clorofila			
	Fosfatos			
	Hierro			
	Nitratos			
	Oxígeno disuelto			
	PH			
	Productividad primaria			
	Salinidad			
	Silicatos			
	Temperatura			

Fuente: Elaboración propia

Aplicación de herramientas SIG para el análisis espacial

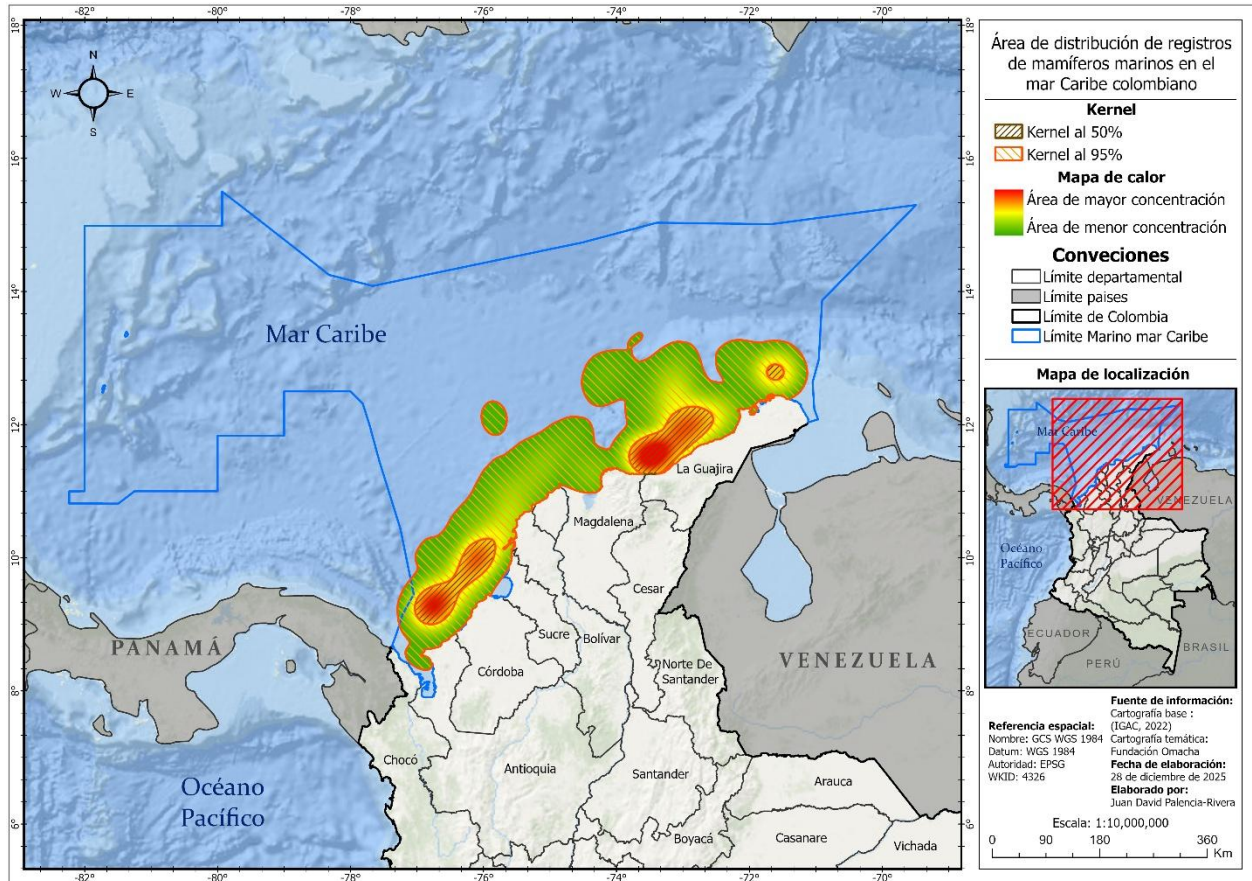
Mediante la aplicación de herramientas de análisis espacial integradas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), específicamente a través del algoritmo de Densidad de Kernel

(Kernel Density Estimation - KDE), se determinó el área de concentración de los registros de presencia de mamíferos marinos en el mar Caribe colombiano. Esta modelación permitió identificar las zonas de mayor densidad biológica, representadas cartográficamente mediante superficies de intensidad como se puede observar en la **Figura 12**. El análisis arrojó un área de distribución de 103.664,93 km², lo cual equivale al 21,14% del territorio marino del Caribe colombiano; no obstante, solo el 15,10% de dicha superficie correspondió a las zonas de máxima concentración de registros (áreas núcleo).

En cuanto a su ubicación espacial, las áreas de mayor densidad se localizaron principalmente en la zona costera de la plataforma continental, extendiéndose aproximadamente 225 km desde la línea de costa hacia el talud continental. A nivel de paisaje, se identificaron diversas geoformas marinas que describen la complejidad topográfica del fondo oceánico, destacándose escarpes, espolones, abanicos marinos, bancos, valles submarinos y deltas. Desde una perspectiva ecológica, en esta área se identificaron ecosistemas estratégicos de corales y pastos marinos, los cuales representan hábitats críticos para el refugio, alimentación y cría de una amplia diversidad de fauna y flora marina.

Figura 12

Área de distribución de registro de mamíferos marinos

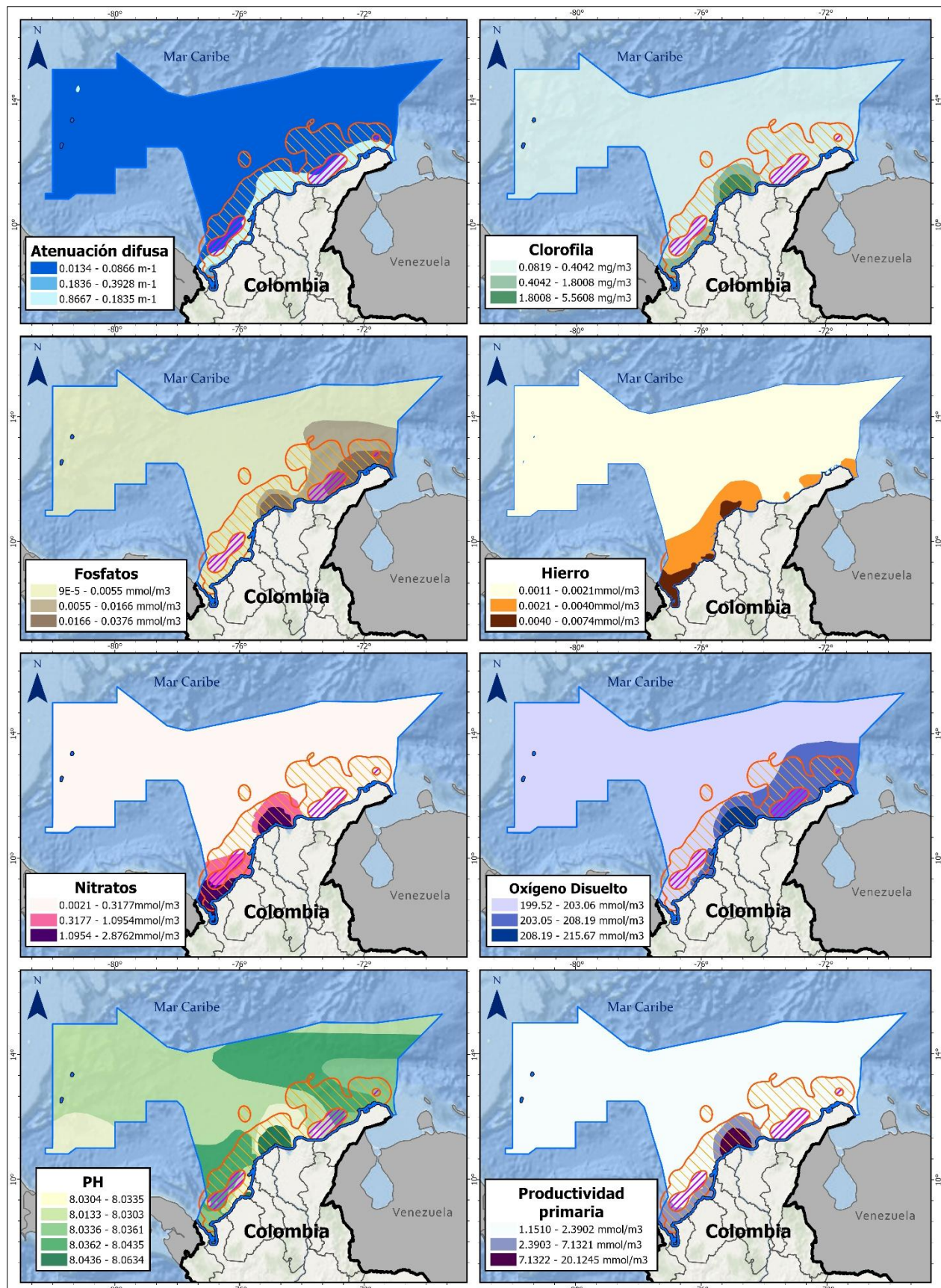


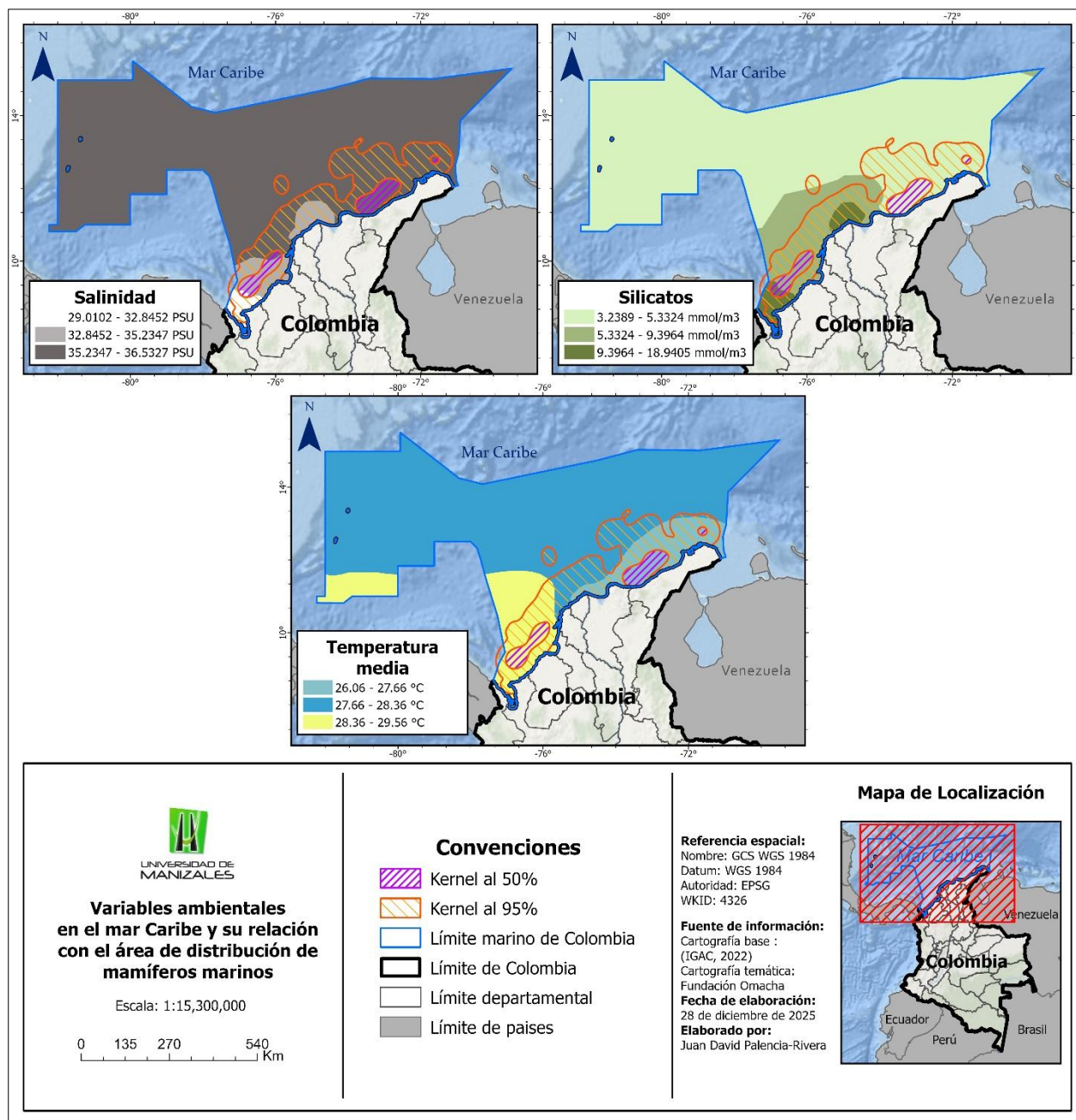
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la relación entre el área de distribución de los registros de presencia y las variables ambientales, se procedió a ejecutar un análisis espacial mediante la herramienta de (Intersect). Este procedimiento permitió la sobreposición de capas de información y la integración de bases de datos geográficas, facilitando la comprensión de las dinámicas ecológicas de los mamíferos marinos en el mar Caribe colombiano. A través de este proceso de geoprocésamiento, se logró caracterizar las variables que tiene una relación mayor en área de mayor concentración de registros, estableciendo una correlación directa entre la localización de los avistamientos y las condiciones fisicoquímicas del entorno marino (Ver Figura 13).

Figura 13

Variables ambientales analizadas mediante la aplicación de herramientas SIG





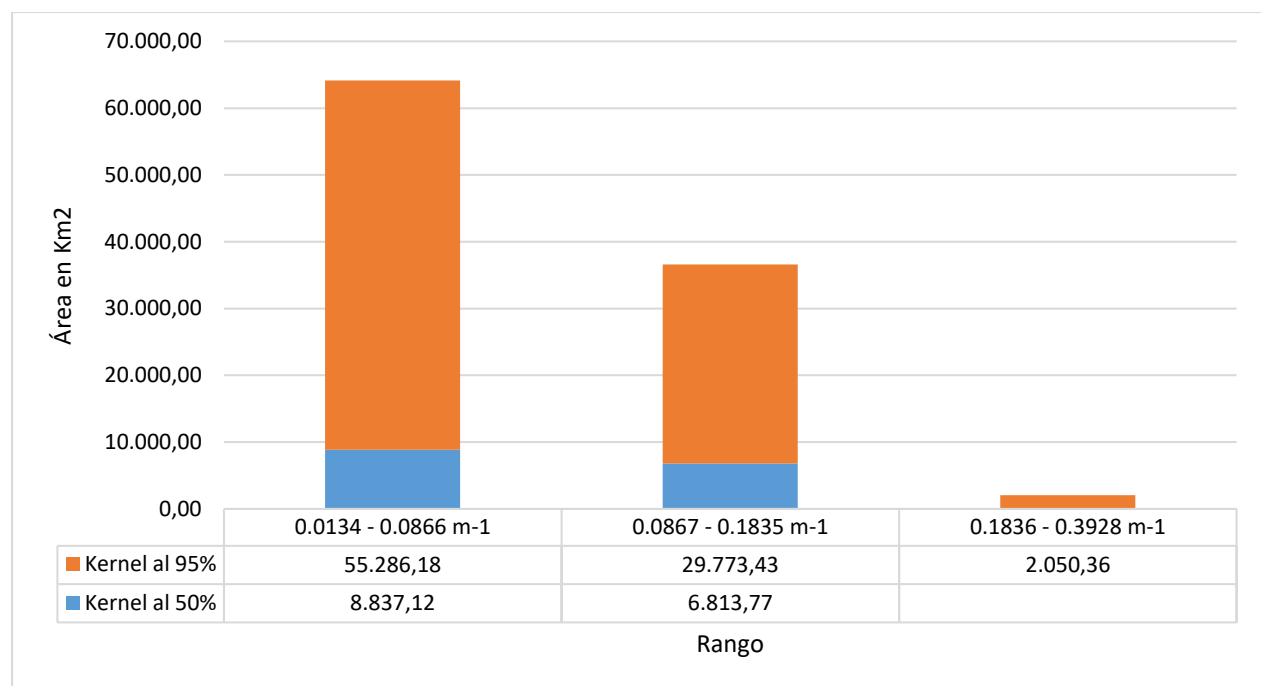
Fuente: Elaboración propia

Los resultados referentes a la variable de atenuación difusa indicaron que tanto el área de distribución general de los registros de mamíferos marinos (Kernel al 95%) como el área núcleo de mayor densidad biológica (Kernel al 50%) se asociaron principalmente con aguas claras de

baja a moderada atenuación, evidenciando un gradiente costa-océano consistente con el patrón espacial cartografiado. En el área de distribución general predominó el rango bajo ($0,0134-0,0866 \text{ m}^{-1}$) con una superficie de $55.286,18 \text{ km}^2$ (63,5%), seguido por el rango moderado ($0,0867-0,1835 \text{ m}^{-1}$) con $29.773,43 \text{ km}^2$ (34,2%), mientras que el rango de alta atenuación ($0,1836-0,3928 \text{ m}^{-1}$) aportó únicamente $2.050,36 \text{ km}^2$ (2,4%); esto sugirió que las condiciones de mayor turbidez u opacidad ocuparon una fracción mínima del espacio de ocurrencia de las especies. En cuanto al área núcleo se concentraron $8.837,12 \text{ km}^2$ (56,5%) en el rango bajo y $6.813,77 \text{ km}^2$ (43,5%) en el rango moderado, sin registrarse una participación significativa de aguas con alta atenuación. El área de menor atenuación se localiza en la región del Golfo de Urabá y en las desembocaduras de Bocas de Cenizas en el departamento del Atlántico. (Ver Figura 14).

Figura 14

Atenuación difusa en el área de distribución de registros de mamíferos marinos

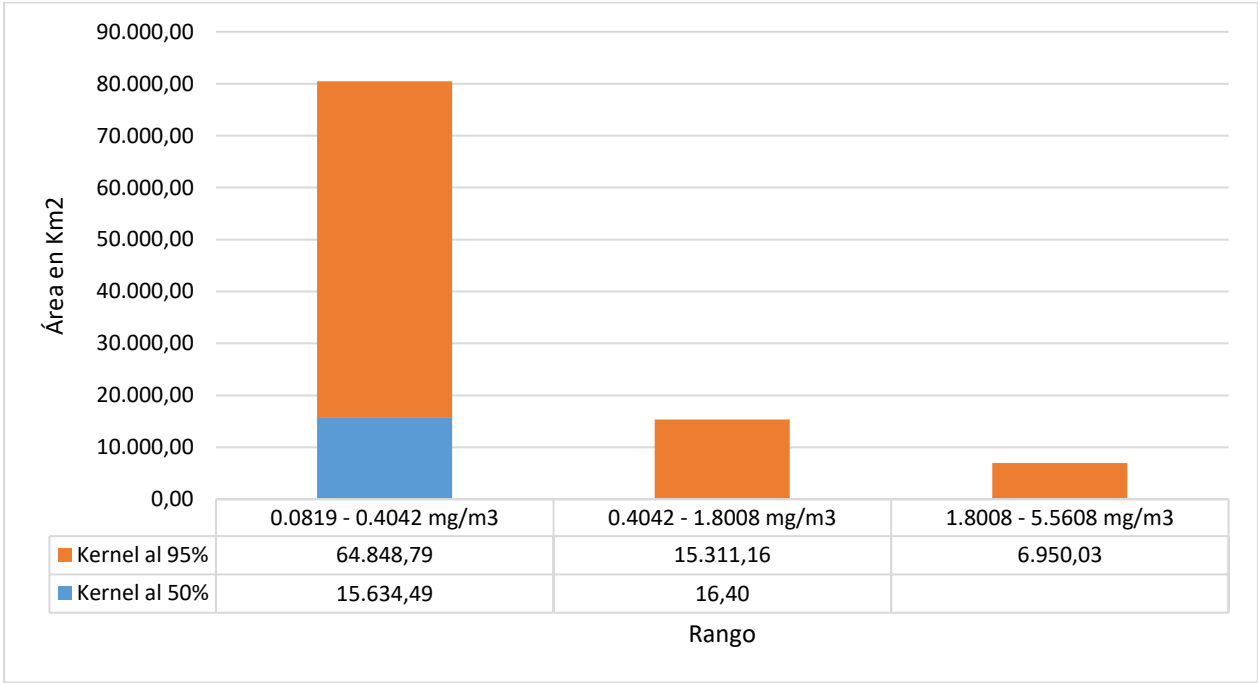


Fuente: Elaboración propia

Respecto a la clorofila, el análisis del área de distribución evidenció un claro predominio de concentraciones bajas en el mar Caribe colombiano. En el área de distribución general (Kernel al 95%), el rango de 0,0819–0,4042 mg/m³ abarcó 64.848,79 km² (74,4%), mientras que los intervalos de 0,4042–1,8008 mg/m³ y 1,8008–5,5608 mg/m³ representaron 15.311,16 km² (17,6%) y 6.950,03 km² (8,0%), respectivamente; esto indicó que las condiciones de productividad biológica moderada y alta ocuparon una proporción menor del área total evaluada. En cuanto al área de mayor concentración o área núcleo (Kernel al 50%), se identificó que el 99% de su superficie (15.634,49 km²) se localizó en zonas de baja concentración de clorofila, mientras que solo el 1% restante se ubicó en áreas de concentración moderada. Estos resultados demostraron que en las zonas oceánicas la concentración de clorofila fue menor en comparación con los sectores costeros, donde se registraron niveles más elevados asociados a las descargas de aguas continentales y su consecuente aporte de nutrientes, respecto a la localización de las áreas de mayor concentración, el foco principal se sitúa en inmediaciones de la ecorregión de Gaalerazamba y Golfo de Salamanca, mientras que las concentraciones moderadas están localizadas se encuentra desde el Golfo de Urabá hasta el Golfo de Morrosquillo. (Ver

Figura 15)

Figura 15
Clorofila en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



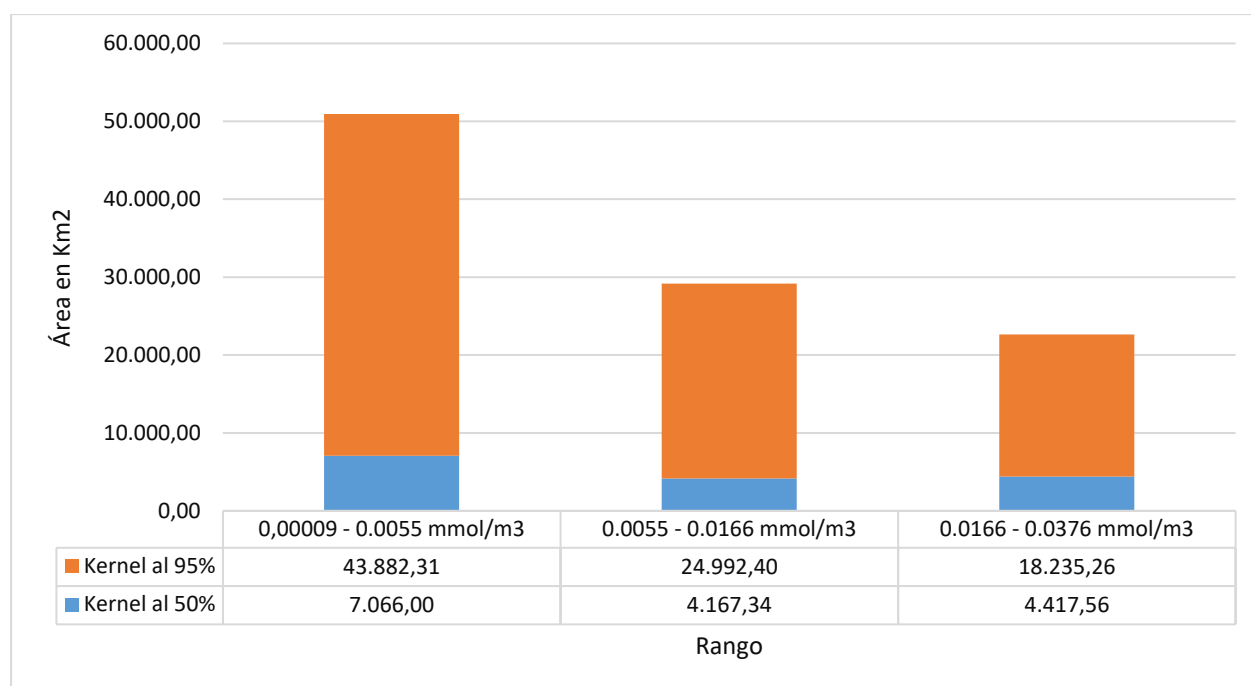
Fuente: Elaboración propia

En relación con los fosfatos, se evidenció que el área de distribución general de los registros de presencia (Kernel al 95%) se asoció principalmente con el rango más bajo (0,00009–0,0055 mmol/m³), el cual abarcó 43.882,31 km² (50,4%), seguido por el rango intermedio

(0,0055–0,0166 mmol/m³) con 24.992,40 km² (28,7%) y el rango alto (0,0166–0,0376 mmol/m³) con 18.235,26 km² (20,9%). Por su parte, en el área núcleo o de mayor densidad biológica (Kernel al 50%), el patrón presentó un mayor equilibrio y destacó una representatividad relativa superior de concentraciones altas: el rango bajo concentró 7.066,00 km² (45,2%), el intermedio 4.167,34 km² (26,6%) y el alto 4.417,56 km² (28,2%) como se observa en la Figura 16. Este comportamiento indicó que en las zonas oceánicas la concentración de fosfatos fue menor, mientras que en las aguas marinas próximas a la costa los niveles aumentaron, coincidiendo con la influencia de ambientes continentales que presentan una mayor carga de nutrientes, por otro lado, las concentraciones altas de fosfatos se localizaron en la región norte de Colombia, entre los departamentos de La Guajira, Magdalena y Atlántico con una extensión que abarca los 50 a 80 km de longitud con respecto a la línea de costa. En cuanto a las concentraciones moderadas se ubican en la región norte con un área que se amplía hasta los 165 km de longitud.

Figura 16

Fosfatos en el área de distribución de registros de mamíferos marinos

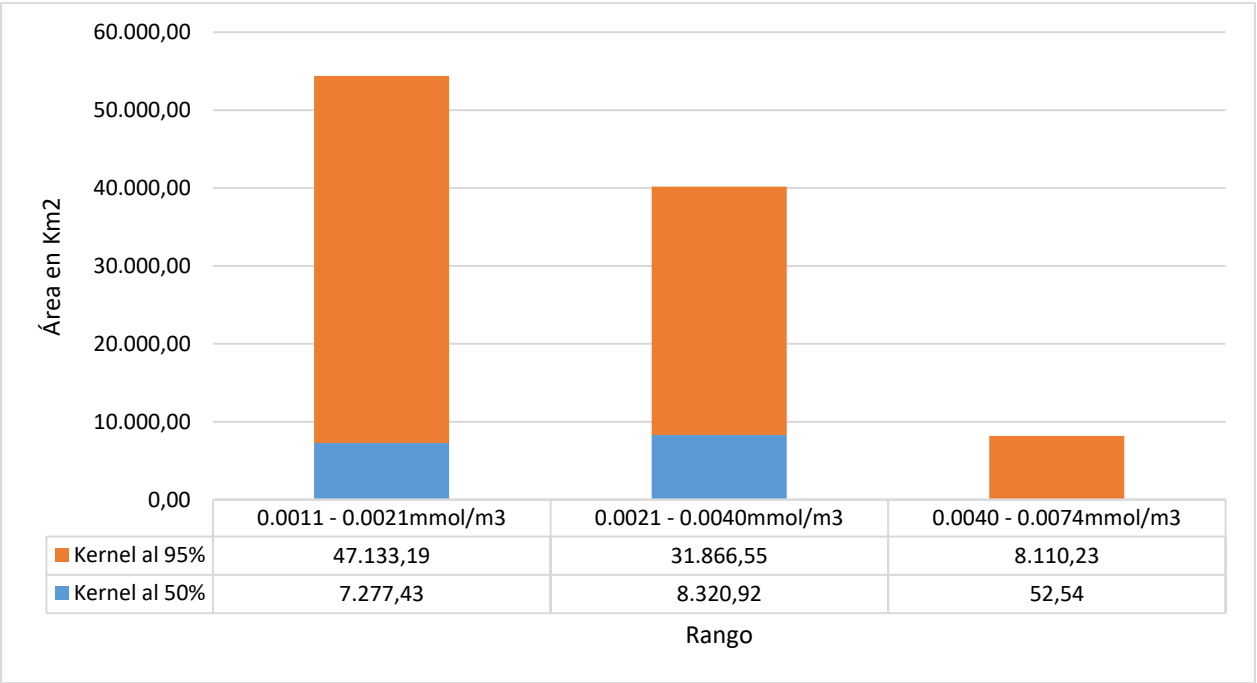


Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la variable de hierro, el área de distribución general (Kernel al 95%) presentó un predominio de concentraciones bajas a intermedias; el rango de 0,0011–0,0021 mmol/m³ concentró 47.133,19 km² (54,1%), seguido por el intervalo de 0,0021–0,0040 mmol/m³ con 31.866,55 km² (36,6%) y una contribución menor del rango alto (0,0040–0,0074 mmol/m³) con 8.110,23 km² (9,3%). Por su parte, en el área núcleo o de mayor densidad biológica (Kernel al 50%), los registros se localizaron mayoritariamente en el rango intermedio con 8.320,92 km² (53,2%) y en el rango bajo con 7.277,43 km² (46,5%), mientras que la presencia del rango alto fue prácticamente inexistente con solo 52,54 km² (0,3%). Espacialmente, las concentraciones bajas se distribuyeron de manera amplia en las zonas oceánicas, mientras que los valores intermedios se asociaron a la franja costera; finalmente, los niveles más altos se vincularon a las desembocaduras de los ríos principales, debido al aporte de hierro proveniente de la descarga de sedimentos continentales, destacándose la región del Golfo de Urabá, Golfo de Morrosquillo y la

desembocadura del río Magdalena en Bocas de Cenizas, las áreas de mayor concentración de hierro. (Ver Figura 17).

Figura 17
Hierro en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



Fuente: Elaboración propia

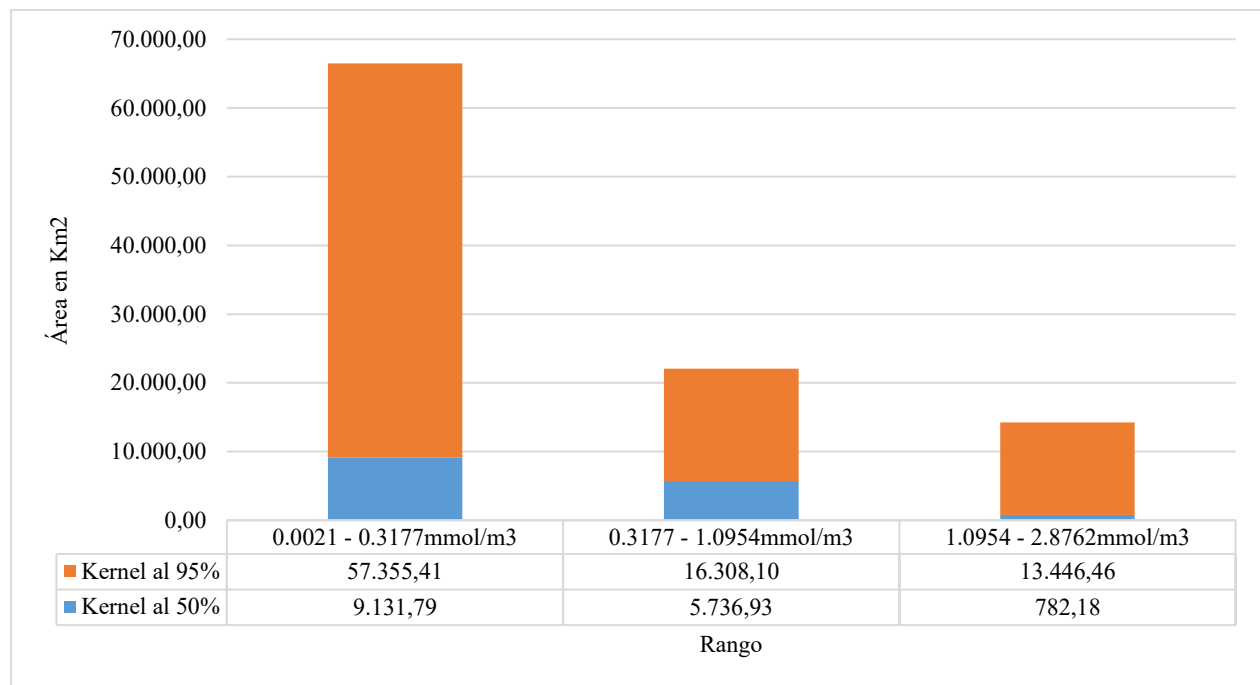
Con respecto a los nitratos, se reveló que el área de distribución general de los registros de presencia (Kernel al 95%) se asoció predominantemente a concentraciones bajas (0,0021–0,3177 mmol/m³), representando el 65,8% del área evaluada. Respecto a las categorías moderada (0,3177–1,0954 mmol/m³) y alta (1,0954–2,8762 mmol/m³), sus proporciones se situaron en torno al 18,7% y 15,4%, respectivamente; esta tendencia indicó que los avistamientos de mamíferos marinos se localizaron mayoritariamente en áreas de baja concentración de nutrientes al norte del área marina, principalmente en entornos oligotróficos, mientras que las concentraciones medias y altas presentaron una menor representación, ubicándose en zonas

costeras y áreas de descarga de aguas continentales con alta productividad. Por su parte, las zonas de mayor densidad de registros o áreas núcleo (kernel al 50%) mostraron una asociación aún más estrecha con niveles bajos y moderados de nitrato: el 58,3% de la superficie central perteneció a la clase de concentración baja, el 36,7% a la moderada y solo el 5,0% a la categoría alta.

Espacialmente, este comportamiento se alineó con un escenario donde las bajas concentraciones predominaron en el ambiente oceánico de mar abierto, los niveles moderados se distribuyeron a lo largo de la plataforma continental y las altas concentraciones ocurrieron de forma local. El Golfo de Urabá y la ecorregión del Golfo de Salamanca son las regiones que concentran los rangos altos y moderados. (Ver

Figura 18).

Nitratos en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



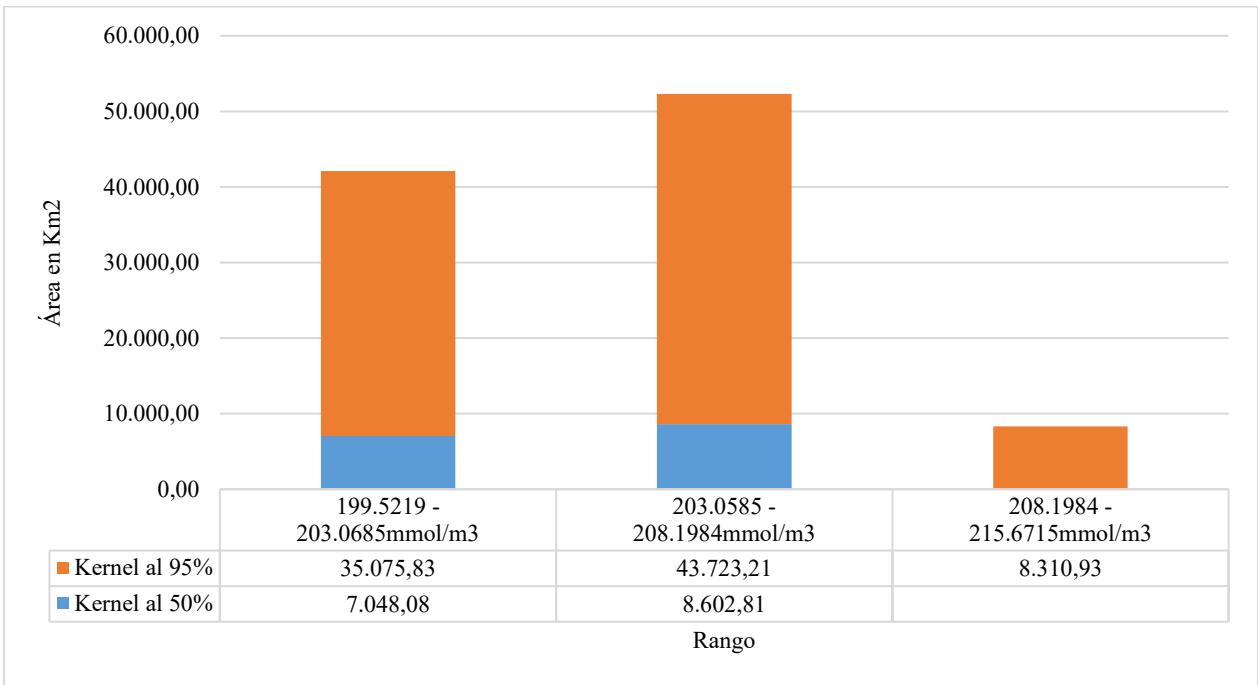
Fuente: Elaboración propia

Respecto al oxígeno disuelto, los niveles en el área de distribución de los registros se concentraron principalmente en valores intermedios. En el área de distribución general (Kernel al 95%), el rango de 203,0585–208,1984 mmol/m³ resultó el más representativo con una superficie de 43.723,21 km² (50,2%), seguido por el intervalo de 199,5219–203,0685 mmol/m³ con 35.075,83 km² (40,3%), mientras que el rango superior (208,1984–215,6715 mmol/m³) aportó únicamente 8.310,93 km² (9,5%). En el área núcleo o de mayor densidad biológica (Kernel al 50%), se reforzó este patrón, debido a que la totalidad del núcleo se ubicó entre los rangos intermedio (8.602,81 km², 55,0%) y bajo (7.048,08 km², 45,0%), sin presentar una representación significativa del rango alto (Ver Figura 19). Estos resultados demostraron que las mayores concentraciones de oxígeno disuelto se localizaron en zonas de alto dinamismo físico u oleaje, principalmente en la ecorregión del Golfo de Salamanca, mientras que los niveles bajos e

intermedios se distribuyeron predominantemente en áreas oceánicas más alejadas de la línea de costa a excepción del Golfo de Morrosquillo que desde la línea de costa las concentraciones intermedias se localizan en una longitud hacia mar adentro de 45 kilómetros aproximadamente.

Figura 19

Oxígeno disuelto en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



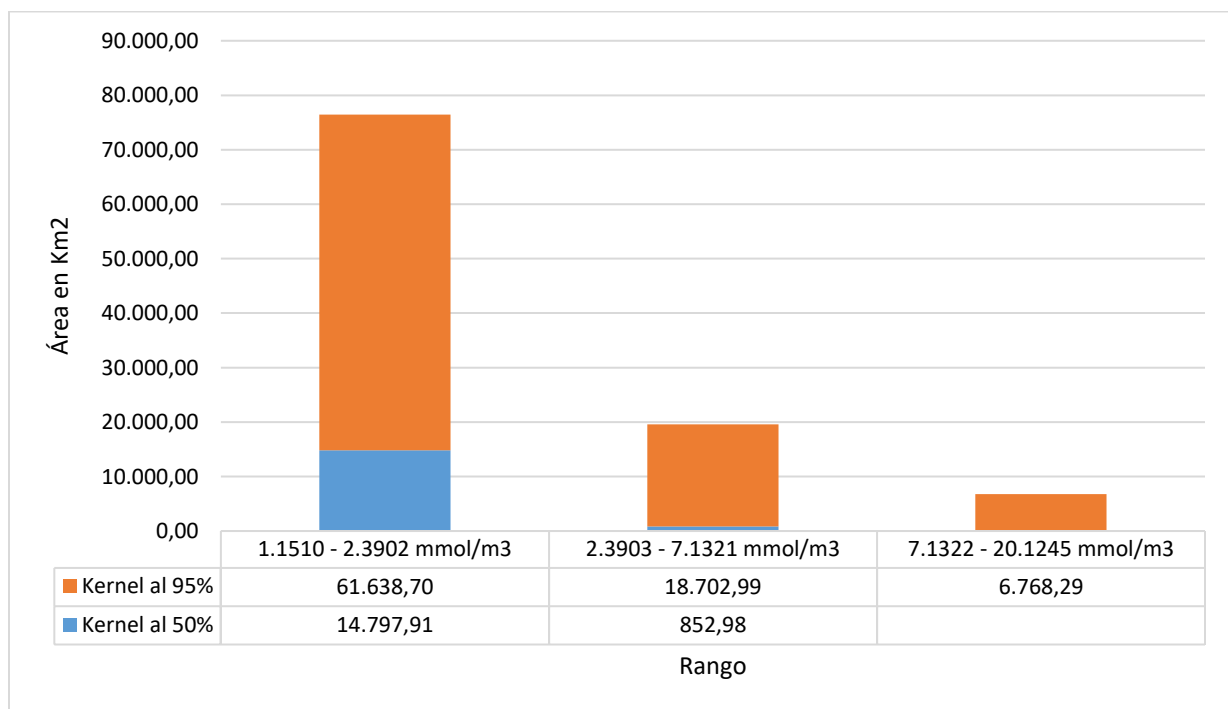
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la productividad primaria en el área de estudio, se identificó una relación predominante con valores bajos tanto en el área de distribución general (Kernel al 95%) como en el área núcleo de mayor densidad (Kernel al 50%). En la distribución general, el rango de 1,1510–2,3902 mmol/m³ concentró 61.638,70 km² (71,0%), seguido por el intervalo de 2,3903–7,1321 mmol/m³ con 18.702,99 km² (21,5%), mientras que los valores altos (7,1322–20,1245 mmol/m³) representaron únicamente el 7,8% (6.768,29 km²). En el área núcleo, esta tendencia fue aún más pronunciada, localizándose casi la totalidad de su superficie en el rango bajo con

14.797,91 km² (94,5%), con una contribución mínima del rango intermedio (852,98 km²; 5,5%) y una ausencia práctica de valores altos como se observa en la Figura 20. Los patrones identificados permitieron visualizar una productividad primaria baja en las zonas oceánicas, mientras que las concentraciones moderadas a altas se localizaron en franjas y parches costeros, asociados directamente a las desembocaduras de los principales ríos y a zonas de alta acumulación de nutrientes por escorrentía continental, por lo tanto, se concentran en las regiones del Golfo de Urabá y en la ecorregión del Golfo de Salamanca con la desembocadura del río Magdalena.

Figura 20

Productividad primaria en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



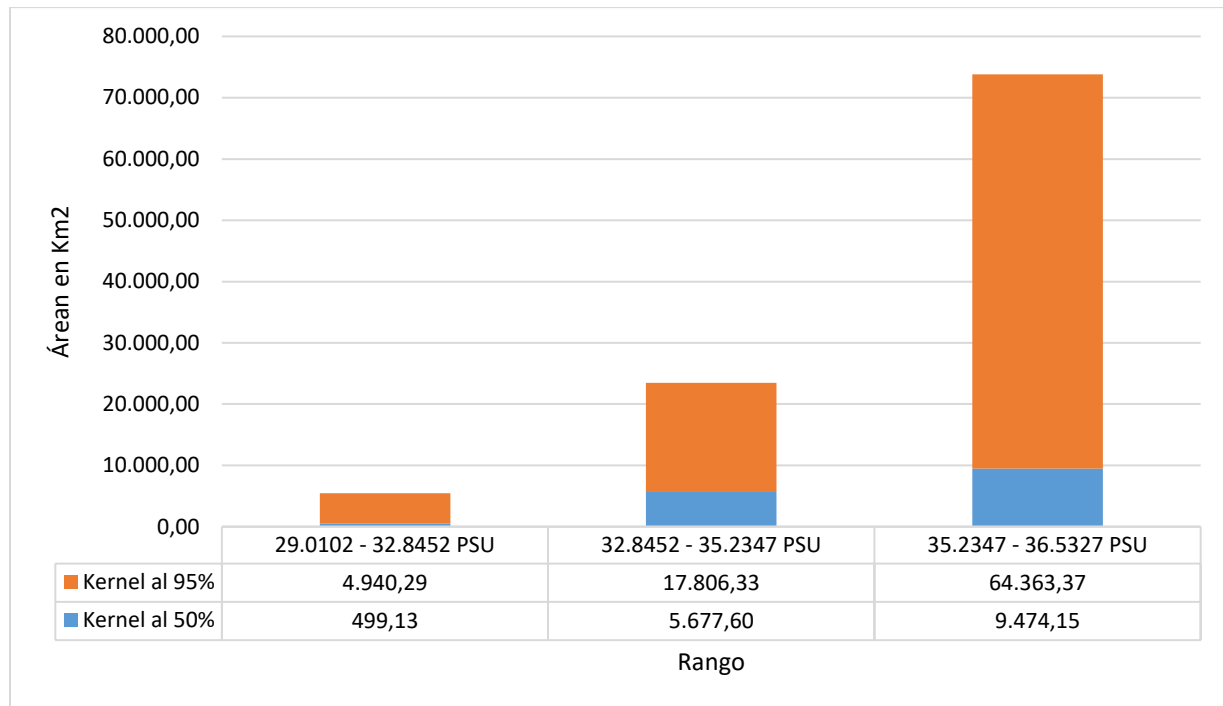
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la variable de salinidad en el área de estudio, se observó un claro predominio de concentraciones elevadas en la distribución de los registros de mamíferos marinos. En el área

de distribución general (Kernel al 95%), el rango de 35,2347–36,5327 PSU concentró 64.363,37 km² (73,9%), seguido por el intervalo de 32,8452–35,2347 PSU con 17.806,33 km² (20,4%), mientras que los valores de salinidad más baja (29,0102–32,8452 PSU) representaron únicamente el 5,7% (4.940,29 km²). En cuanto al área núcleo o de mayor densidad biológica (Kernel al 50%), se mantuvo la misma tendencia: predominó el rango alto con 9.474,15 km² (60,5%), seguido por un aporte significativo del rango intermedio con 5.677,60 km² (36,3%), mientras que el rango bajo fue marginal con solo 499,13 km² (3,2%) como se observa en la Figura 21. Espacialmente, las mayores concentraciones de salinidad se localizaron en las zonas oceánicas del norte y noreste, mientras que los niveles intermedios se asociaron a las franjas costeras sujetas a la confluencia de masas de agua continentales; finalmente, las concentraciones bajas se restringieron a sectores reducidos del suroccidente, influenciados por descargas fluviales y regímenes de precipitación. En conjunto, este comportamiento espacial correspondió a un gradiente costa-océano, donde la salinidad menor se vinculó a los aportes continentales costeros y los valores mayores se posicionaron hacia mar abierto, zona donde se concentró la mayor extensión tanto del área general como del núcleo de registros. Es importante destacar que se evidencio que las concentraciones bajas esta localizadas en regiones de desembocadura de aguas continentales, destacándose el Golfo de Urabá, Golfo de Morrosquillo, Golfo de Salamanca y Bocas de Cenizas (región donde desemboca el río Magdalena).

Figura 21

Salinidad en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



Fuente: Elaboración propia

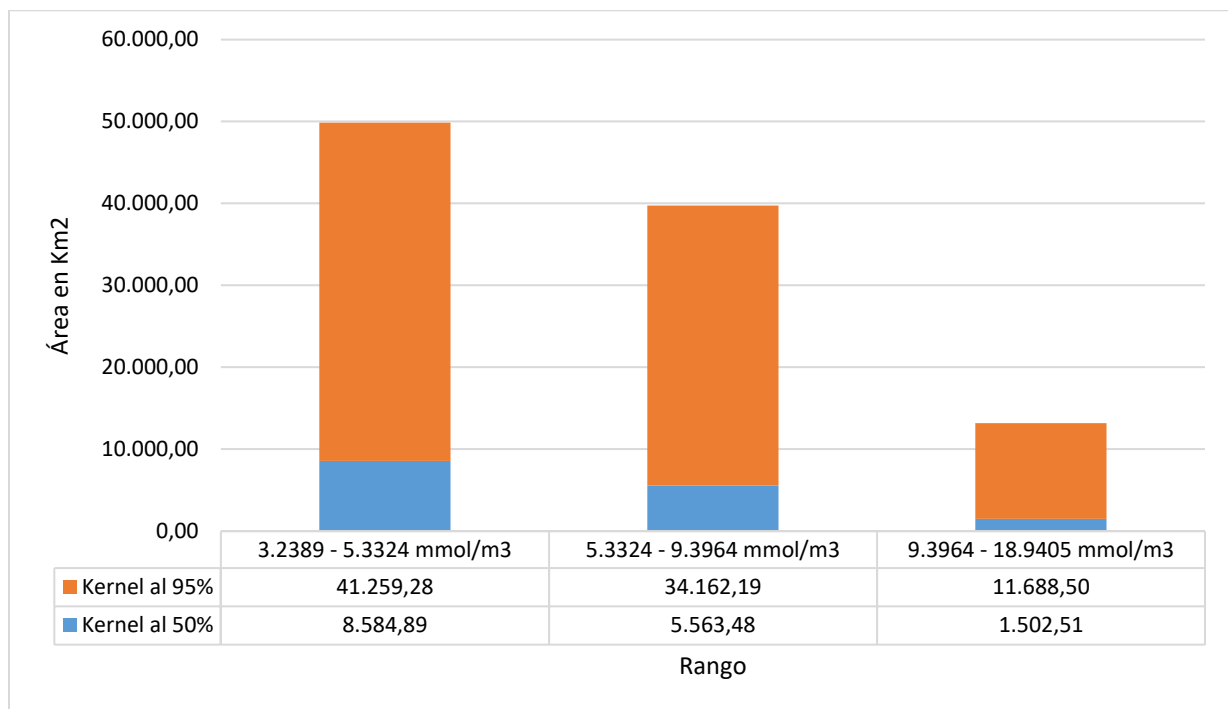
En relación con los silicatos, se identificó un predominio de concentraciones bajas a intermedias, con presencia de valores altos únicamente en sectores puntuales. En el área de distribución general (Kernel al 95%), el rango de 3,2389–5,3324 mmol/m³ concentró 41.259,28 km² (47,4%), seguido por el intervalo de 5,3324–9,3964 mmol/m³ con 34.162,19 km² (39,2%) y, en menor proporción, el rango de 9,3964–18,9405 mmol/m³ con 11.688,50 km² (13,4%). En el área núcleo o de mayor densidad biológica (Kernel al 50%), se reforzó la asociación con condiciones bajas a moderadas, donde el 54,9% del núcleo (8.584,89 km²) correspondió al rango bajo y el 35,5% (5.563,48 km²) al intermedio, mientras que el rango alto aportó solo el 9,6% (1.502,51 km²) como se observa en la Figura 22.

Este patrón evidenció un gradiente costa-océano, en el cual las concentraciones bajas de silicatos predominaron en las zonas oceánicas alejadas de la influencia terrestre; por el contrario, los valores elevados se localizaron en sectores con aportes de aguas continentales, las regiones

que mayor concentración de Silicatos presenta se localizan en la región del Golfo de Urabá y en la desembocadura del río Magdalena en el sector de Bocas de Cenizas (Departamento de Atlántico), mientras que las concentraciones moderadas se extienden mar adentro con un ancho aproximado de 300 kilómetros de longitud. Dado que el silicato favorece el desarrollo de diatomeas, estos parches podrían representar zonas de potencial incremento en la productividad primaria y mayor disponibilidad de presas para los mamíferos marinos.

Figura 22

Silicatos en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



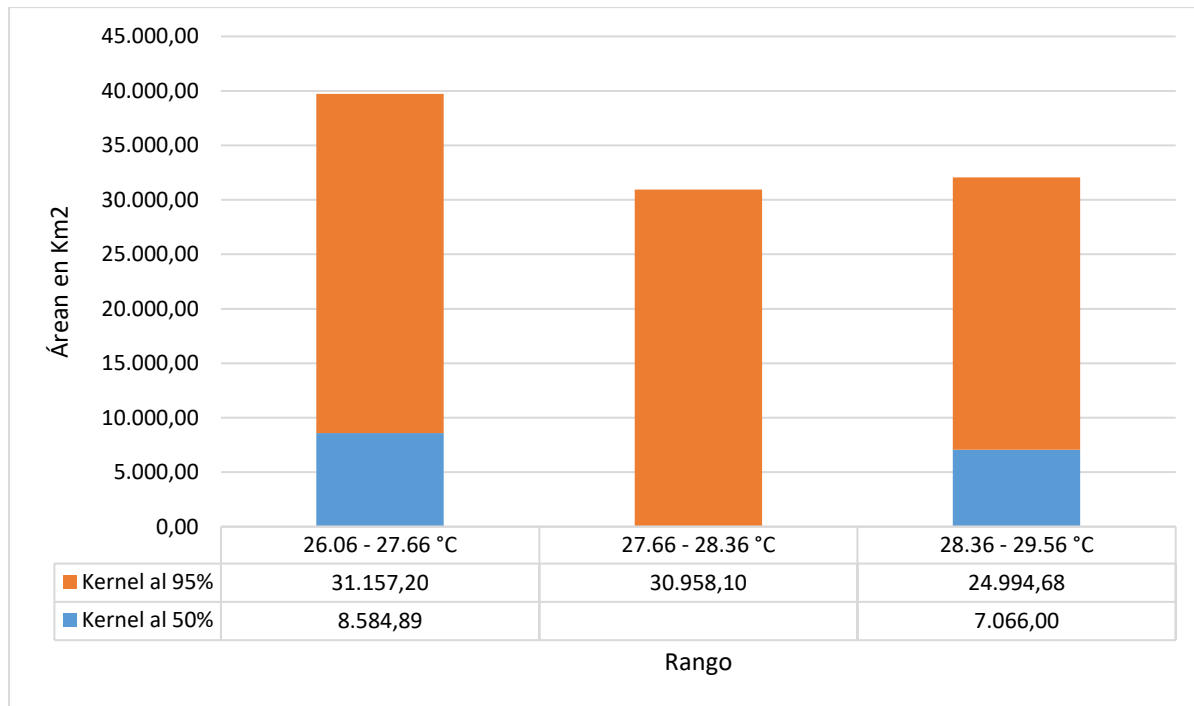
Fuente: Elaboración propia

En relación con la temperatura media en el área de estudio, se identificó una distribución espacial de los registros de mamíferos marinos relativamente equilibrada. En el área de distribución general (Kernel al 95%), la superficie se fragmentó en proporciones similares: 31.157,20 km² (35,8%) en el rango térmico inferior, 30.958,10 km² (35,5%) en el rango

intermedio y 24.994,68 km² (28,7%) en el rango superior, lo que indicó que la distribución general de los registros abarcó un gradiente térmico amplio. En contraste, el área núcleo o de mayor densidad biológica (Kernel al 50%) se asoció principalmente con los extremos térmicos, localizándose el 54,9% de la superficie (8.584,89 km²) en el rango de 26,06–27,66 °C y el 45,1% restante (7.066,00 km²) en el rango de 28,36–29,56 °C, sin registrarse una representación apreciable del intervalo intermedio (Ver Figura 23). Estos resultados demostraron que las temperaturas menores se localizaron hacia el norte y noreste (sector oceánico frente a La Guajira), asociadas posiblemente a fenómenos de surgencia, mientras que las temperaturas más elevadas se concentraron hacia el suroccidente del Caribe colombiano, quedando el rango intermedio como una franja de transición térmica.

Figura 23

Temperatura media en el área de distribución de registros de mamíferos marinos



Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, en las áreas núcleo de mayor densidad biológica (Kernel al 50%), se determinó que los mamíferos marinos se asociaron predominantemente con condiciones oceánicas de alta transparencia y salinidad, evidenciadas por el predominio de niveles de salinidad elevados y coeficientes de atenuación difusa bajos a moderados. Paralelamente, el núcleo se localizó casi en su totalidad en zonas de baja concentración de clorofila-a y reducida productividad primaria; este hallazgo sugirió que los puntos críticos no coincidieron con las zonas de máxima señal productiva superficial, sino con áreas donde la disponibilidad de recursos tróficos podría estar regulada por procesos de concentración física, tales como frentes oceánicos y zonas de transición plataforma-océano, en lugar de floraciones algales extensas.

Desde una perspectiva biogeoquímica, el núcleo de mayor concentración de registros estuvo dominado por niveles bajos a moderados de nitratos, silicatos y hierro, mientras que los fosfatos presentaron una representatividad significativa de valores altos dentro del núcleo. Este

patrón indicó un escenario de enriquecimiento moderado y espacialmente heterogéneo, compatible con zonas de transición donde los aportes costeros o los procesos de mezcla no generaron eutrofía generalizada, pero sí sostuvieron pulsos de productividad y el mantenimiento de cadenas tróficas para los cetáceos. En este marco, el silicato funcionó como un proxy de condiciones favorables para las diatomeas y, por extensión, para redes tróficas que sustentan al zooplankton y peces forrajeros, incluso cuando la clorofila media no alcanzó valores máximos.

Finalmente, el oxígeno disuelto en el núcleo se concentró en rangos bajos a intermedios, coherentes con aguas superficiales estables, mientras que la temperatura media mostró un patrón bimodal. Esto sugirió la coexistencia de dos contextos oceanográficos en las áreas de mayor registro: sectores relativamente más frescos asociados a zonas de mezcla o frentes térmicos (vinculados potencialmente al forrajeo) y sectores más cálidos compatibles con el tránsito o la permanencia estacional. En conjunto, la evidencia indicó que los puntos críticos de registros se estructuraron mediante la interacción entre masas de agua oceánicas claras y salinas con gradientes fisicoquímicos que favorecieron la agregación de presas.

Implementación y evaluación de la funcionalidad del GeoVisor web.

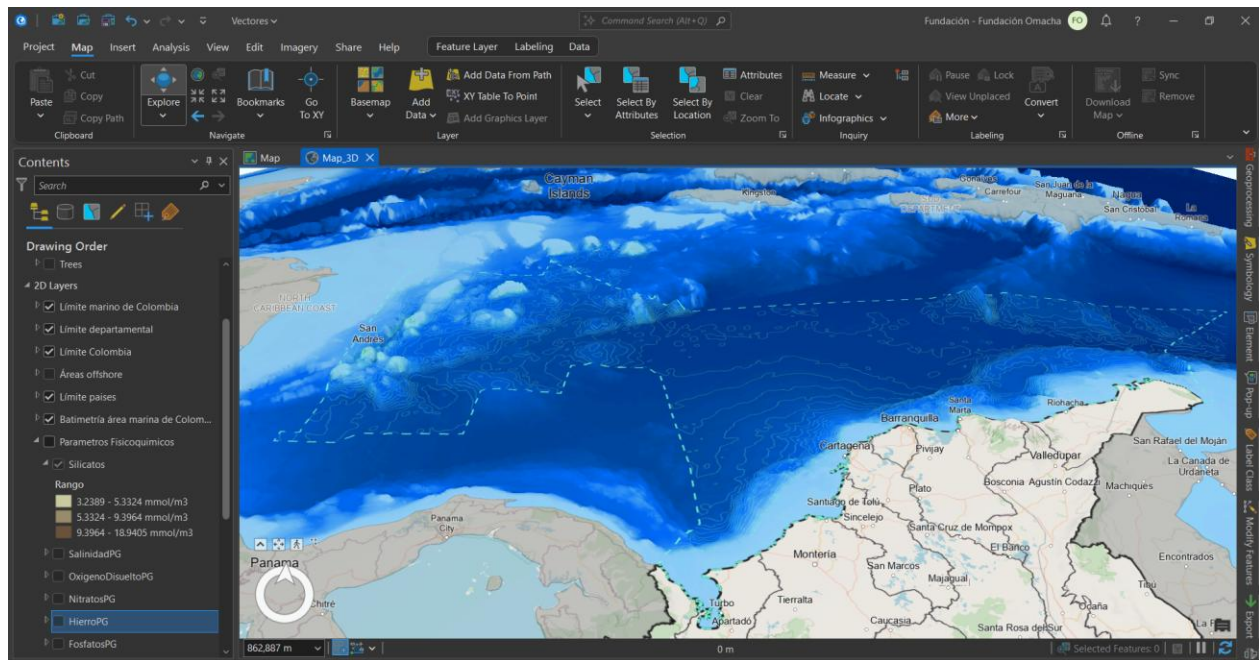
En esta fase, se obtuvo la primera representación visual de la solución WebGIS, partiendo de la modelación tridimensional del mar Caribe colombiano. Para este propósito, se procesó la variable de batimetría dentro del entorno Global Scene de ArcGIS Pro, lo cual permitió resaltar las características geomorfológicas del fondo oceánico. El modelo generado evidenció con precisión las variaciones topográficas al aplicarse un factor de exageración vertical con valores de

8 a 10; este ajuste facilitó la interpretación de estructuras submarinas críticas, tales como depresiones, cañones y otras formaciones del relieve presentes en el área de estudio.

Con el objetivo de optimizar la comprensión visual del modelo, se configuró la simbología mediante un degradado cromático en escala de azules, donde los tonos claros representaron las cotas superficiales y los tonos oscuros indicaron las zonas de mayor profundidad. Este esquema, además de cumplir con los estándares cartográficos para la representación batimétrica, favoreció la lectura diferencial de los valores de elevación, permitiendo identificar áreas de interés para el posterior análisis ecológico y espacial como se observa en la Figura 24. El resultado final consistió en un modelo 3D que ofreció una aproximación detallada a la complejidad del fondo marino del Caribe colombiano, constituyéndose como un insumo fundamental para la integración de variables fisicoquímicas y biológicas en las fases subsiguientes de configuración del GeoVisor.

Figura 24

Modelo tridimensional la batimetría del Mar Caribe colombiano



Fuente: Elaboración propia

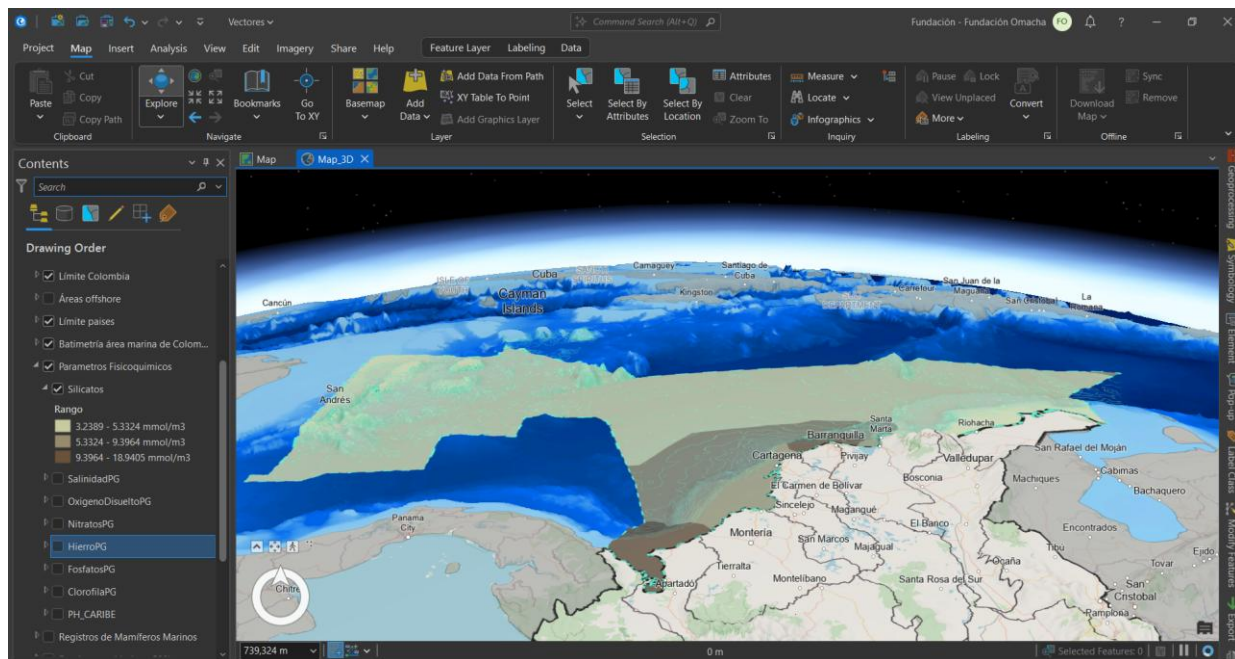
Posteriormente, se cargó la información vectorial previamente procesada en la interfaz Global Scene de ArcGIS Pro, integrándola con el modelo batimétrico tridimensional del Caribe colombiano. Este procedimiento permitió obtener una primera aproximación visual del prototipo de la solución WebGIS con la totalidad de las variables seleccionadas. En primer lugar, se incorporó la información biológica de mamíferos marinos; para ello, se estableció una simbología que permitiera diferenciar los registros de cetáceos. Dado que se trataba de datos puntuales, se seleccionó el atributo taxonómico 'FAMILIA', lo cual respondió a la necesidad de simplificar la interpretación de la información al agrupar los registros en las cuatro familias reportadas, en lugar de representar gráficamente las 18 especies identificadas, lo que habría dificultado la legibilidad del modelo.

Por otro lado, la información referente a los parámetros fisicoquímicos fue normalizada previamente en tres rangos definidos según sus respectivas unidades de medida, lo que facilitó la

aplicación de un esquema de simbología en degradado monocromático como se puede observar en la Figura 25. Este diseño permitió representar los valores mínimos con tonos claros y los valores máximos con tonos oscuros, asegurando una visualización coherente de los gradientes fisicoquímicos en la columna de agua. Esta estandarización cartográfica garantizó que el usuario final pudiera identificar rápidamente las áreas con mayor o menor concentración de cada variable ambiental analizada.

Figura 25

Definición simbólica de los rangos de los parámetros fisicoquímicos



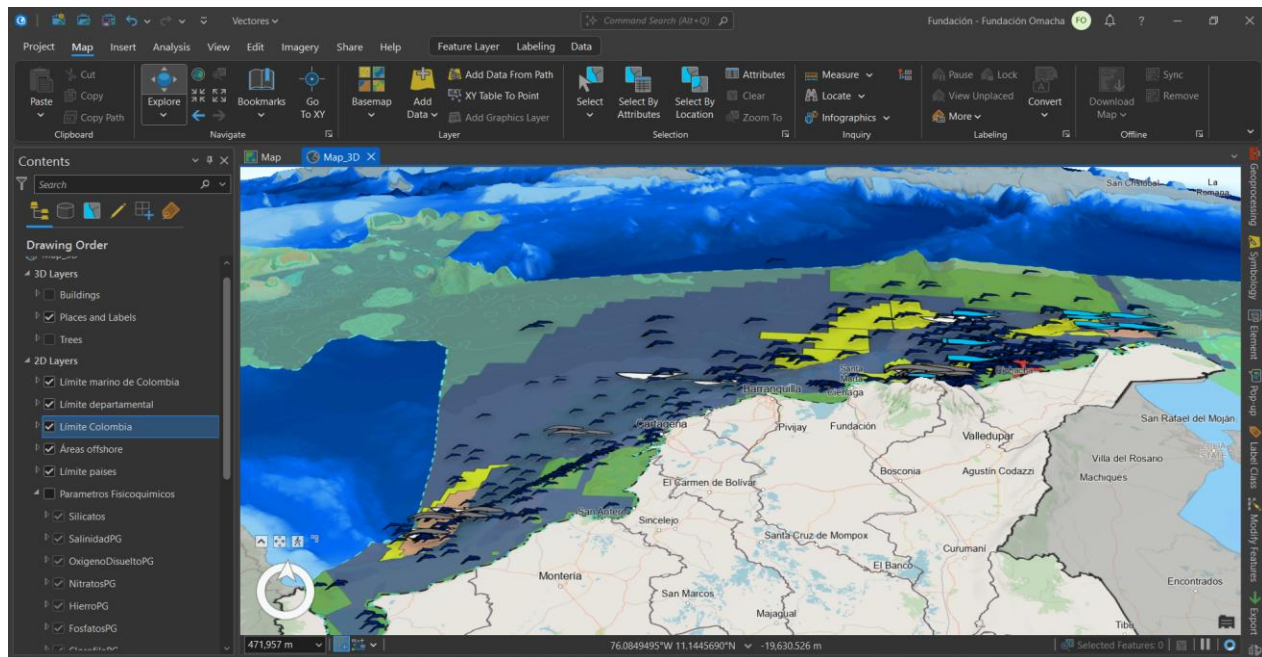
Fuente: Elaboración propia

El resultado de esta fase consistió en un modelo de visualización unificado que integró la información biológica y ambiental del mar Caribe colombiano, lo cual proporcionó una aproximación visual integral de la solución WebGIS. Este producto constituyó la base técnica para la construcción definitiva de la herramienta, debido a que las funcionalidades de ArcGIS Pro permitieron compartir estas plantillas digitales de mapas en formatos 2D y 3D directamente hacia

la infraestructura en la nube de la organización (ArcGIS Online). Esta transferencia de servicios de mapas (Web Maps) y escenas (Web Scenes) garantizó que la simbología y los atributos configurados en el entorno de escritorio se preservaran con fidelidad para su posterior implementación en la interfaz interactiva de ArcGIS Experience Builder como se observa en la Figura 26.

Figura 26

Representación visual del Web Scene en ArcGIS Pro



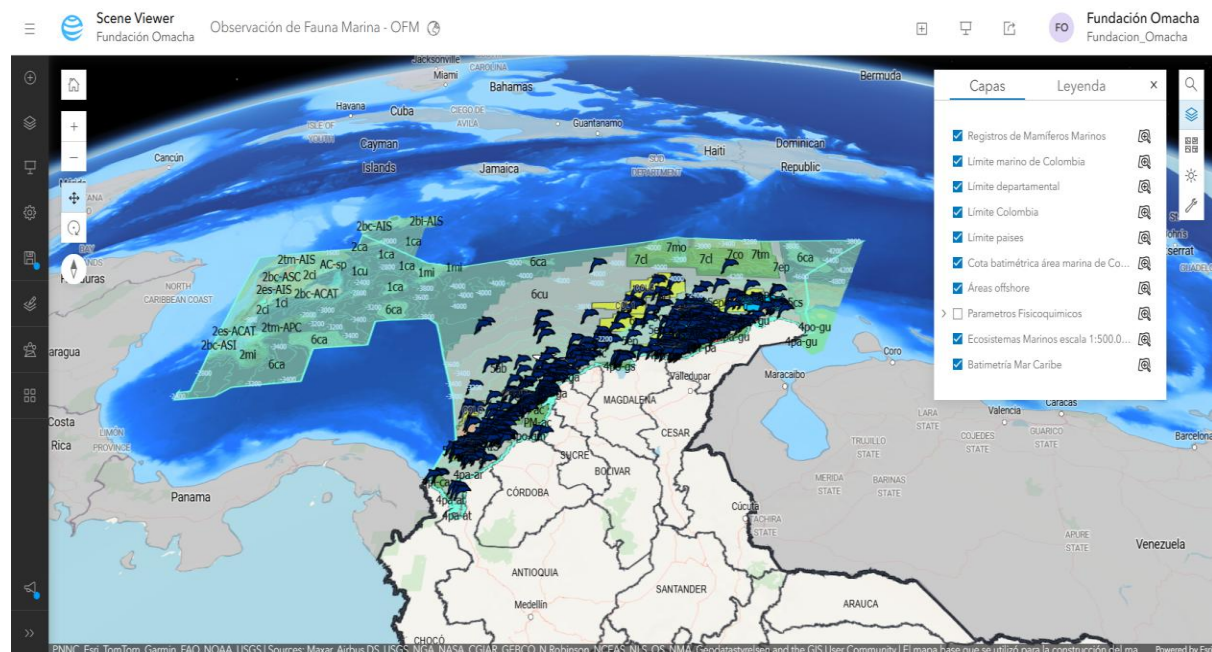
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se consolidó la información cartográfica estructurada en el software ArcGIS Pro. Estas variables, que incluyeron los registros de mamíferos marinos, parámetros fisicoquímicos, límites administrativos, áreas de exploración de hidrocarburos e isóbatas, fueron organizadas con el fin de mantener los estándares simbólicos y asegurar la coherencia con los objetivos del estudio. Este proceso permitió homogeneizar la información secundaria, evitando inconsistencias geométricas y semánticas. La exportación directa de los datos desde ArcGIS Pro

hacia la infraestructura en la nube de la organización en ArcGIS Online garantizó la preservación de la simbología definida y la transferencia íntegra de los atributos hacia una Web Scene, la cual sirvió como insumo fundamental para la construcción de la solución WebGIS (Ver Figura 27).

Figura 27

Visualización del Web Scene con la información biológica y cartográfica definida



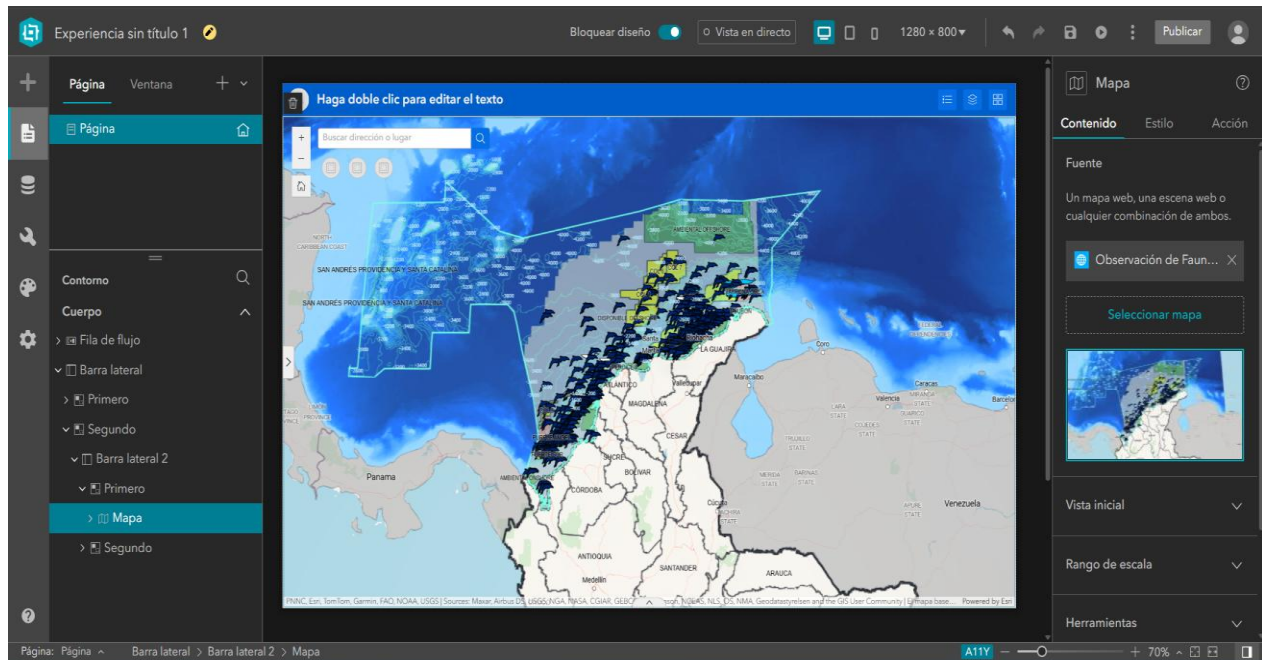
Fuente: Elaboración propia

Una vez publicada la información en la infraestructura en la nube de la organización, se procedió con la configuración del GeoVisor mediante la aplicación ArcGIS Experience Builder de ArcGIS Online. Este procedimiento inició con el diseño estructural de la interfaz, buscando un equilibrio visual que no comprometiera la funcionalidad técnica. Para tal fin, se empleó una plantilla en blanco (blank canvas) con el propósito de personalizar los entornos, tales como la ventana de visualización de datos espaciales, la disposición de las herramientas y widgets funcionales, y la inclusión de avisos legales sobre la política de tratamiento de la información. Finalmente, se integró en el entorno visual la Web Scene previamente configurada, la cual contenía

la información cartográfica y la simbología establecida en las fases anteriores del proyecto como se observa en la Figura 28.

Figura 28

Web Scene integrado al aplicativo Experience Builder



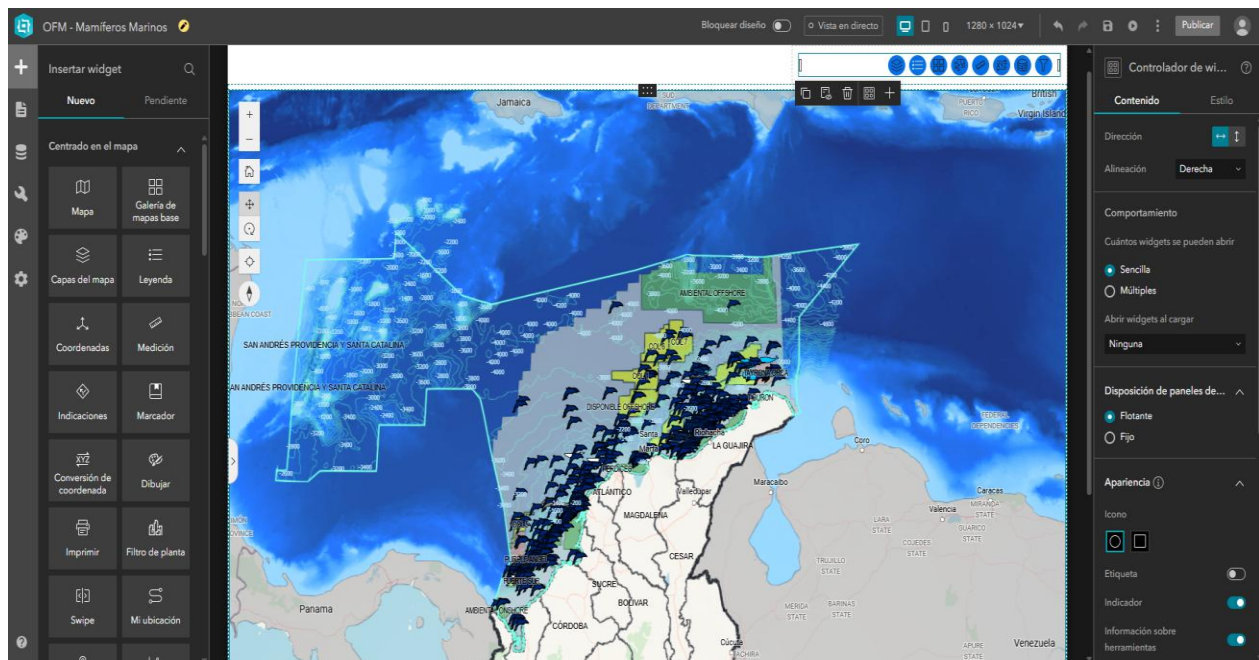
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, el aplicativo fue fortalecido mediante la integración de *widgets* funcionales que ampliaron su operatividad e interactividad. Entre las herramientas implementadas destacaron: la leyenda, que facilitó la interpretación de la simbología de cada variable; la lista de capas, que permitió la gestión selectiva de la visualización; y el selector de mapas base (*Basemaps*), que proporcionó contexto geográfico a la información temática. Asimismo, se incorporaron funciones de filtrado para la ejecución de consultas específicas, barras de búsqueda, herramientas de conversión de coordenadas, módulos de medición y componentes para la carga de datos externos. La integración de estas funcionalidades incrementó las capacidades analíticas de la herramienta, transformándola en un entorno dinámico para la exploración, consulta y análisis de información

en tiempo real (Ver Figura 29). Este desarrollo se orientó al cumplimiento del propósito principal del proyecto: servir de soporte técnico y científico a los procesos de investigación en el mar Caribe colombiano.

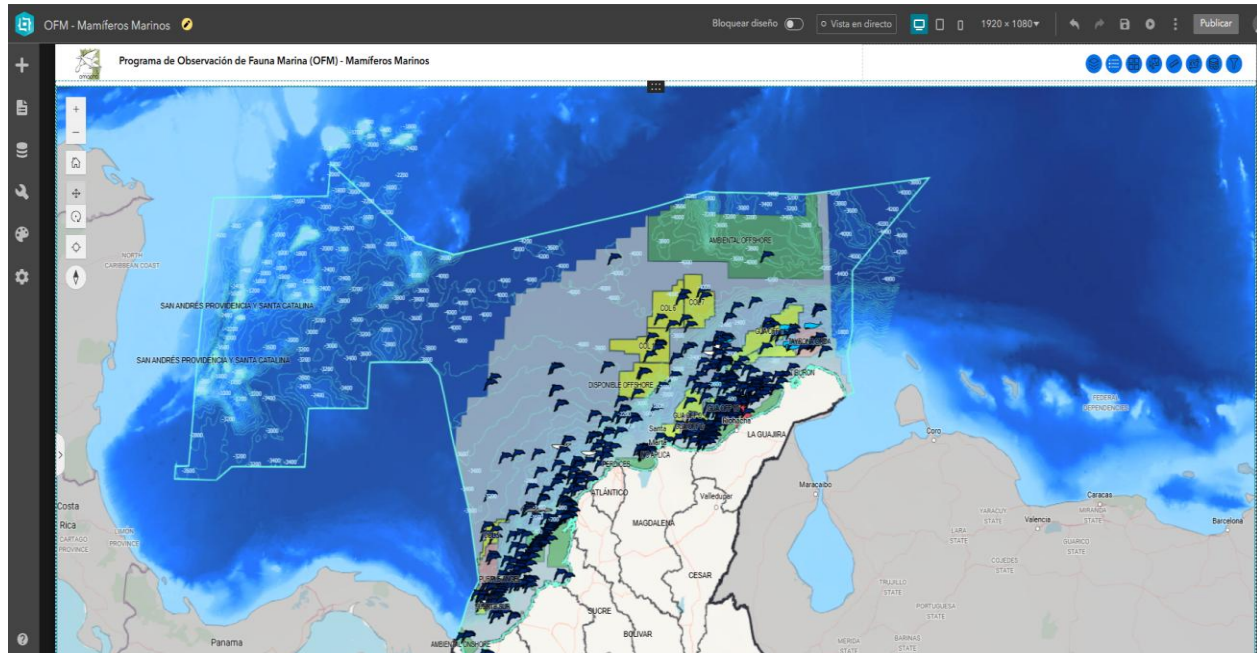
Figura 29

Incorporación de widgets en el aplicativo SIG – WEB



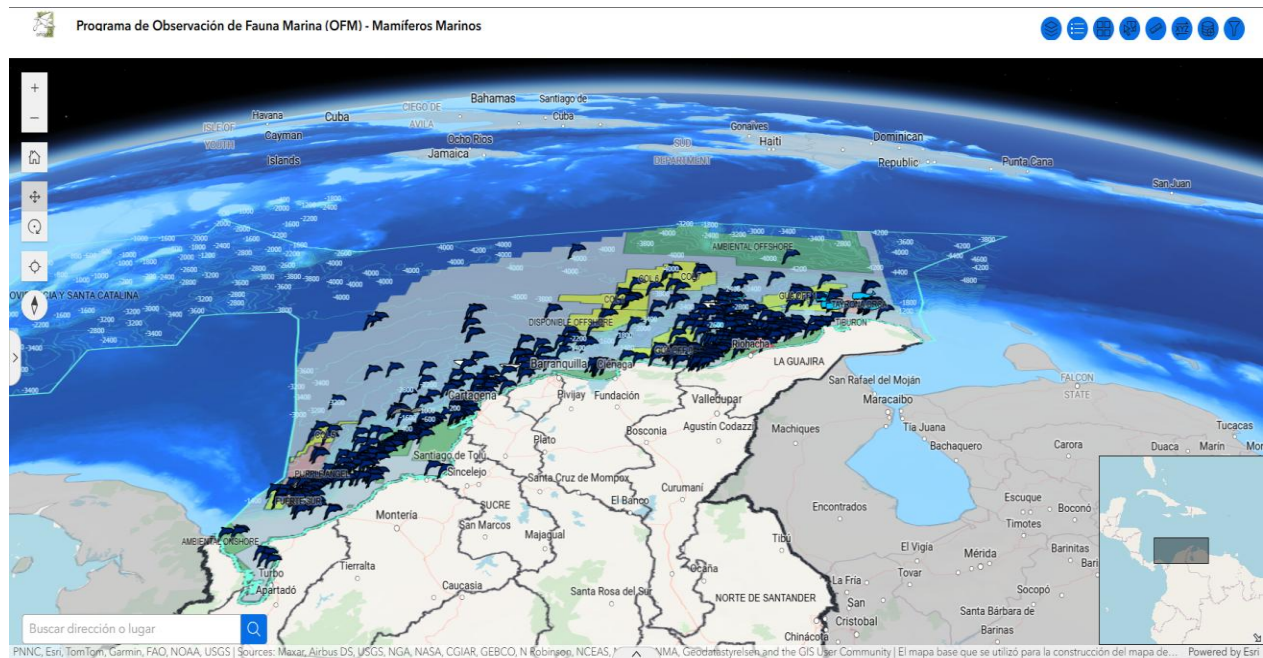
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la personalización, los resultados reflejaron la implementación de una interfaz adaptada a los requerimientos visuales y lineamientos gráficos institucionales. Para este fin, se ajustaron elementos como la paleta de colores, tipografía, contenido gráfico y el uso de la línea grafica de la institución. Este procedimiento no solo garantizó la coherencia estética del GeoVisor, sino que también optimizó la experiencia del usuario mediante un ecosistema visual intuitivo y de fácil navegación. La integración de estos elementos, sumada a la capacidad de respuesta del sistema, facilitó un manejo ágil y eficiente de la información geográfica por parte del usuario final (Ver Figura 30).

Figura 30*Incorporación de línea gráfica y logotipos institucionales**Fuente:* Elaboración propia

Finalmente, se validó el desempeño y la funcionalidad del aplicativo mediante la función Preview de la plataforma de desarrollo. Este procedimiento permitió someter la herramienta a pruebas de rendimiento y operatividad, con el propósito de verificar los tiempos de carga de las variables, la velocidad de respuesta en consultas de información específica y la estabilidad general del sistema (Ver Figura 31). Los resultados demostraron un funcionamiento óptimo y robusto, caracterizado por tiempos de respuesta adecuados y un manejo eficiente de los datos espaciales. Como producto de esta fase, se obtuvo un prototipo funcional de solución WebGIS con capacidades técnicas sólidas para integrarse como una herramienta de análisis de información marina, orientada a fortalecer los procesos científicos adelantados en el mar Caribe colombiano.

Figura 31*Prototipo final de la herramienta SIG – WEB*



Fuente: Elaboración propia

Evaluación de la funcionalidad de la herramienta SIG – WEB

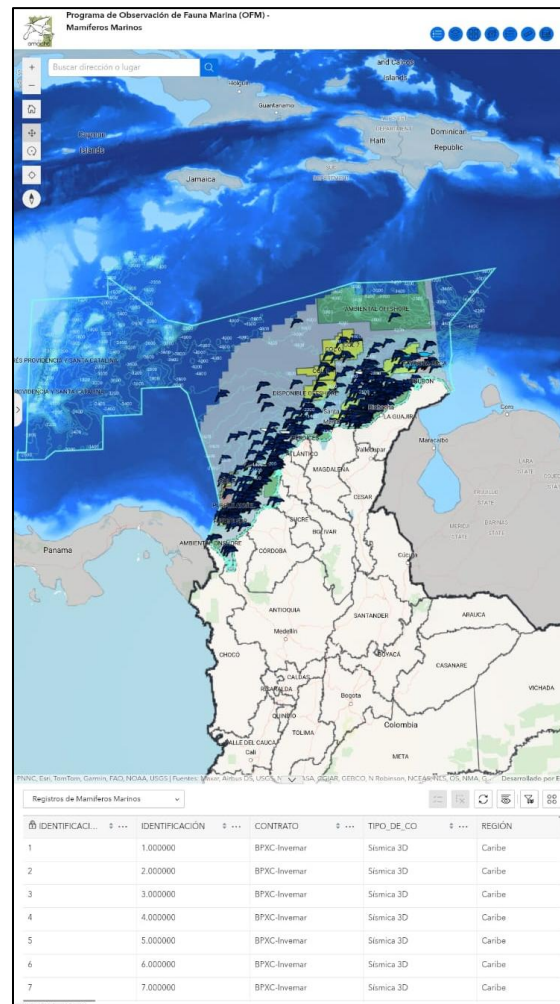
La evaluación de la funcionalidad del GeoVisor inició con la verificación de la capacidad de respuesta en el procesamiento de la información cartográfica multitemática. Para ello, se comprobó la integridad de cada variable en relación con sus atributos y las representaciones simbólicas definidas previamente en ArcGIS Pro, con el propósito de garantizar la uniformidad visual en el entorno WebGIS. En este sentido, se realizaron pruebas de despliegue para capas en formatos vectorial y ráster, asegurando la ausencia de errores en la renderización de los modelos 3D y la preservación de la integridad de los datos. Este procedimiento confirmó la correcta estructuración de la información en el entorno web, factor determinante para una interacción óptima entre los usuarios y la plataforma.

Posteriormente, se llevó a cabo la evaluación del rendimiento en cuanto a tiempos de carga y estabilidad operativa en diversos dispositivos, incluyendo computadores de escritorio,

teléfonos inteligentes (smartphones), tabletas y equipos portátiles. Estas pruebas se ejecutaron mediante escenarios de consulta con distintos niveles de complejidad, tales como la activación simultánea de múltiples capas, la consulta de atributos, la aplicación de filtros, la activación del perfil batimétrico y el despliegue de ventanas emergentes (pop-ups). Los resultados arrojaron tiempos de respuesta óptimos y una velocidad de carga estable, incluso al procesar volúmenes considerables de datos correspondientes a registros de mamíferos marinos, parámetros fisicoquímicos y ecosistemas. Asimismo, se evidenció un comportamiento fluido de la aplicación en múltiples plataformas, asegurando la accesibilidad y la consistencia de la herramienta en diferentes entornos tecnológicos (Ver Figura 32).

Figura 32

Visualización de la herramienta SIG – WEB en Smartphone



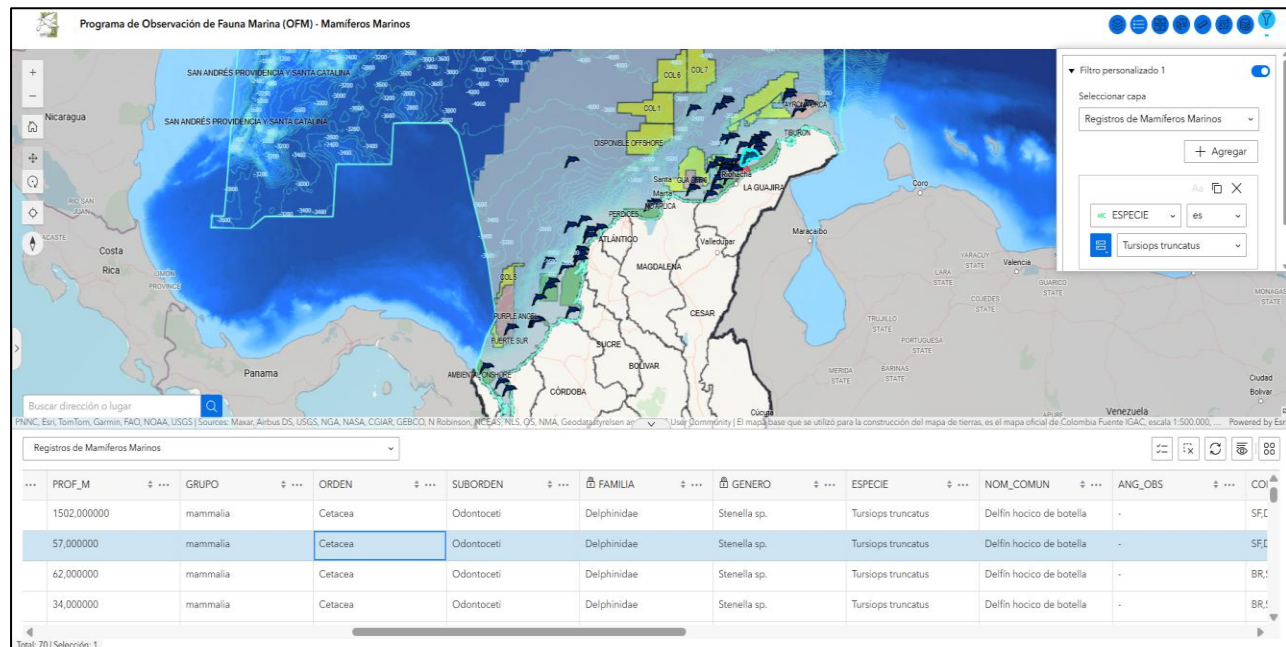
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los widgets configurados, las pruebas de funcionalidad demostraron un desempeño óptimo. Las herramientas de leyenda y lista de capas ofrecieron una visualización clara y jerarquizada de la información; asimismo, no se registraron errores en la representación de la simbología ni conflictos de opacidad en la paleta de colores seleccionada. Respecto a los filtros, estos permitieron discriminar los registros de mamíferos marinos, ecosistemas y áreas de exploración de hidrocarburos mediante expresiones lógicas basadas en los atributos de cada variable; los resultados evidenciaron agilidad y rapidez en la consulta de datos (Ver Figura 33).

De igual manera, las herramientas de barra de búsqueda, conversión de coordenadas y carga de datos externos funcionaron con precisión. Se verificó la localización exacta de los puntos de prueba y se comprobó la interoperabilidad de la plataforma al integrar datos en distintos sistemas de referencia espacial. Este comportamiento técnico aseguró que el GeoVisor cumpla con los estándares de fiabilidad necesarios para el análisis de información geográfica compleja.

Figura 33

Prueba de rendimiento del widget de filtro de información



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los procesos de validación y la evaluación de funcionalidad y rendimiento demostraron la capacidad del sistema para integrar y representar de manera efectiva la información cartográfica. Se garantizó la integridad en la manipulación de los atributos asociados a cada capa, preservando la fidelidad de la simbología y la calidad de la visualización tridimensional. Asimismo, se evidenció el cumplimiento de los criterios técnicos de consistencia

de datos, velocidad de carga y operatividad de los widgets, ofreciendo una experiencia de usuario (User Experience) armónica en diversas plataformas tecnológicas.

En este sentido, el GeoVisor representa un avance significativo en la implementación de tecnologías geoespaciales para la visualización y análisis de información biológica, al integrar exitosamente múltiples variables ambientales y taxonómicas. De este modo, la herramienta se proyecta como un instrumento esencial de apoyo para las investigaciones de fauna marina en el mar Caribe colombiano, facilitando la gestión del conocimiento y la toma de decisiones basada en datos geoespaciales para la organización.

Discusión

Los sistemas de información geográfica son una de las herramientas tecnológicas que en la actualidad se aplica en diversos campos en todo el mundo y siendo parte para la toma de decisiones en una región. Esta investigación confirmó el valor y la importancia de esta herramienta para la gestión de información marina, en este caso, sobre registros de mamíferos marinos en el Caribe colombiano, por medio del cual se radicó en la capacidad de transformar registros biológicos heterogéneos en un marco analítico coherente y reproducible. La consolidación de 641 registros (2008–2025) y su conversión a una estructura geoespacial validada permitieron establecer una línea base robusta para el análisis especial.

Por otro lado, el procesamiento de la información referente a variables ambientales, consultada en fuentes secundarias, permitió además de reducir los ruidos o vacíos de información, clasificar por rangos con la finalidad de reducir la discontinuidad técnica, logrando así, optimizar los tiempos de análisis de la información entre variables. Por otro lado, integración final en una Geodatabase con reglas de topología fortaleció la integridad y consistencia del modelo, aspecto crítico para garantizar que el sistema sea escalable y actualizable frente a futuros ingresos de datos

La aplicación de herramientas para el análisis de patrones espaciales como la estimación de Densidad de Kernel (Density Kernel) permitió identificar que la presencia de mamíferos marinos no se distribuyó de manera homogénea en el Caribe colombiano. Aunque el área de distribución estimada alcanzó los 103.664,93 km² (21,14% del área marina), solo el 15,10% de esta superficie correspondió a las áreas núcleo (kernel del 50%), donde se identificó la mayor intensidad de registros. Estas zonas de alta densidad se localizaron principalmente sobre la plataforma continental y el talud superior, un corredor donde la complejidad geomorfológica y la

presencia de ecosistemas estratégicos, como arrecifes coralinos y praderas de pastos marinos, aportan plausibilidad ecológica al uso recurrente del hábitat.

No obstante, se reconoció que el KDE reflejó densidad de registros y, por ende, influenciado por el esfuerzo de observación. Adicionalmente, la determinación del área de distribución de la información (kernel al 95%) y en área núcleo de mayor concentración (kernel al 50%) permitió identificar zonas que deben priorizadas para su continuo monitoreo.

Con respecto a la relación con las variables ambientales oceanográficas, se abordaron con la sobreposición espacial de la herramienta (Intersect), permitió caracterizar las condiciones predominantes en el Kernel del 50%. Los resultados indicaron que las áreas núcleo se asociaron con aguas de alta transparencia (atenuación difusa baja a moderada) y salinidades elevadas. El gradiente costa-océano observado, donde los valores menores de salinidad se restringieron a sectores influenciados por descargas fluviales y los mayores dominaron hacia mar abierto, respaldó la interpretación de que estas zonas núcleo respondieron a la interacción entre masas de agua oceánicas estables y franjas de transición plataforma-océano, donde ocurren mecanismos físicos de agregación de presas.

Cabe destacar que la mayor concentración de registros (Área núcleo) se encontraba en zonas con bajo contenido de clorofila *a* y baja productividad primaria (94,5 % en la zona inferior). Esta aparente contradicción no implicaba una falta de disponibilidad de alimentos, sino que indicaba que los puntos críticos no dependían de floraciones superficiales generalizadas, sino más bien de procesos de concentración física, como frentes y zonas de transición, que mejoran la disponibilidad de recursos para las ballenas. Desde una perspectiva biogeoquímica, el predominio de nitratos, silicatos y hierro en concentraciones bajas a moderadas era coherente con las condiciones de pobreza de nutrientes del mar abierto y las acumulaciones locales hacia la

plataforma continental. Los fosfatos, más comunes en altas concentraciones en el núcleo, reflejaban la influencia continental sin signos de procesos generales de alimentación. Del mismo modo, la dualidad termohalina observada en el núcleo indicaba la coexistencia de dos contextos oceanográficos: zonas frías asociadas a procesos de afloramiento y frentes de nutrientes (especialmente al norte de La Guajira) y zonas cálidas en el suroeste, que pueden facilitar el tránsito o la residencia estacional.

Por último, la implementación del GeoVisor evidenciaron el potencial de esta herramienta para el análisis, consulta y visualización de información científica sin la necesidad de contar con software especializado instalado ni con conocimientos avanzados en Sistemas de Información Geográfica. La plataforma diseñada no solo facilitó el acceso a la información de manera ágil, sino que también optimizó los tiempos de consulta y procesamiento, permitiendo una interpretación más dinámica de los patrones de distribución de las especies de cetáceos. No obstante, la funcionalidad del GeoVisor dependió en gran medida de la calidad de la información de entrada y del grado de experticia de los usuarios de la plataforma. A pesar de que el GeoVisor integró herramientas fundamentales para la exploración y el filtrado de información, existieron oportunidades para mejorar y automatizar procesos que podrían haber fortalecido la herramienta científica en el futuro.

En síntesis, el proyecto constituyó un aporte relevante en el área de la conservación marina mediante la aplicación de los sistemas de información geográfica para el análisis espacial de los registros de mamíferos marinos en el Caribe colombiano. Sin embargo, también evidenció limitaciones estructurales que requirieron mejoras tecnológicas para direccionar una gestión científica de la información que permitiera la interoperabilidad tecnológica y la articulación entre instituciones. Estos hallazgos abrieron nuevas líneas de investigación orientadas a mejorar la

automatización del análisis geoespacial, incorporar inteligencia artificial para la predicción de patrones ecológicos y establecer modelos colaborativos de gestión de datos que fortalecieran la toma de decisiones en escenarios marino-costeros complejos.

Conclusiones

La implementación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitó la transición de un inventario biológico disperso a un modelo analítico estructurado. La consolidación de 641 registros en una geodatabase estandarizada aseguró la trazabilidad y consistencia de la información, lo que evidencia que la interoperabilidad entre datos bióticos y variables oceanográficas resulta esencial para la toma de decisiones fundamentadas en el mar Caribe colombiano. Las herramientas de análisis espacial permitieron identificar patrones críticos de distribución. En particular, la estimación de Densidad de Kernel (KDE) mostró que, aunque la presencia de mamíferos marinos abarcó una superficie extensa (103.664,93 km²), la mayor concentración de registros se localizó en el 15,10% del área evaluada. Estas áreas núcleo, situadas principalmente sobre la plataforma continental y el talud superior, representan hábitats estratégicos donde la complejidad geomorfológica y la existencia de ecosistemas de corales y pastos marinos favorecen la concurrencia de las especies.

La implementación del GeoVisor mediante ArcGIS Experience Builder evidenció una mayor eficiencia técnica en comparación con los SIG de escritorio tradicionales para la divulgación masiva, al eliminar barreras de acceso a software especializado y facilitar la democratización de la información científica en tiempo real. Esta plataforma no solo permitió la visualización dinámica de los datos, sino que también se consolidó como una herramienta operativa para la gestión ambiental, posibilitando que investigadores y autoridades identifiquen áreas prioritarias de monitoreo. Debido a su carácter metodológico reproducible, se concluye que este modelo es completamente escalable y replicable en otras regiones geográficas de Colombia o para el estudio

de diferentes grupos taxonómicos, como tortugas marinas y peces comerciales, lo que fortalece el conocimiento integral de la biodiversidad marina nacional.

Recomendaciones

Para garantizar la estabilidad de la herramienta GIS-WEB, se recomienda evaluar y planificar una migración gradual hacia plataformas de código abierto. Esta transición favorecería la sostenibilidad tecnológica y la continuidad operativa de GeoVisor, asegurando la conservación y disponibilidad de la información y sus productos derivados. La migración debe considerar el mantenimiento de la interoperabilidad mediante normas internacionales como OGC, la preservación de los criterios de calidad y trazabilidad de los datos, y la adopción de una arquitectura que permita la publicación de servicios geoespaciales, la gestión de usuarios y el control de versiones. De este modo, se minimizan los riesgos asociados a la dependencia de licencias y se facilita la escalabilidad y el mantenimiento a largo plazo.

Dado que el GeoVisor implementado es un sistema privado, se recomienda establecer un protocolo para la actualización periódica de la información almacenada en la base de datos geográfica (GDB). El objetivo es integrar nuevos registros de mamíferos marinos para mantener la base de datos científicamente actualizada, mejorar la representatividad espacial y temporal de los análisis, reforzar el control de calidad y la trazabilidad de los registros capturados, y garantizar que la visualización y los análisis en ArcGIS Online/Experience Builder reflejen con precisión los cambios y tendencias observados. Esto permitirá apoyar la toma de decisiones y la gestión fundamentadas en datos empíricos.

Se recomienda implementar programas de formación y capacitación para los investigadores de Mamíferos Marinos de la Fundación Omacha sobre el uso adecuado del GeoVisor, con el fin de promover la formulación de investigaciones científicas que fortalezcan el uso de esta herramienta.

Bibliografía

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). (2025, 17 de junio). Mapa de tierras.

<https://www.anh.gov.co/es/hidrocarburos/mapa-de-tierras/>

ArcGIS. (2025). Data classification methods. ArcGIS Pro Resources.

<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>

Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas.

Bio-ORACLE. (2025). Bio-ORACLE marine data. <https://www.bio-oracle.org/>

Congreso de la República de Colombia. (2014, 6 de marzo). Ley 1712 de 2014. Por medio de la cual se crea la Ley de Transparencia y del Derecho de Acceso a la Información Pública Nacional. Diario Oficial No. 49.084.

Departamento Nacional de Planeación. (2009). Documento CONPES 3585. Política nacional de información geográfica y de la infraestructura colombiana de datos espaciales (ICDE).

Departamento Nacional de Planeación. (2013). Documento CONPES 3762. Lineamientos de política para el desarrollo de proyectos de interés nacional y estratégicos (PINES).

Departamento Nacional de Planeación. (2018). Documento CONPES 3920. Política nacional de explotación de datos (Big Data).

Departamento Nacional de Planeación. (2020). Documento CONPES 4007. Estrategias para el fortalecimiento de la gobernanza en el sistema de administración del territorio.

- Ecologistas en Acción. (2017). Cetáceos: Los mamíferos más salaos. Informe sobre las interacciones entre cetáceos y las actividades humanas.
- Esri. (2023). Geoprocessing. Esri Developer.
<https://developers.arcgis.com/documentation/glossary/geoprocessing/>
- Esri. (2025a). ArcGIS Online: Slick sheet. <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/es-es/media/fliers/arcgis-online-slick-sheet.pdf>
- Esri. (2025b). Feature layers. ArcGIS Pro Documentation. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/feature-layers.htm>
- Esri. (2025c). What is ArcGIS Enterprise? <https://enterprise.arcgis.com/es/server/10.6/get-started/windows/what-is-arcgis-for-server-.htm>
- Esri. (2025d). What is a geodatabase? <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/geodatabases/what-is-a-geodatabase.htm>
- Franco, R. (2016). Geoportales y visores geográficos en Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- GEBCO. (2025). Gridded bathymetry data. <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data>
- Global Spatial Data Infrastructure (GSDI). (2001). Global spatial data infrastructure cookbook. Mercator.
- Gobierno de Colombia. (2021). Lineamiento del marco de administración del territorio. Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales (ICDE).
<https://www.icde.gov.co/marcos/marco-administracion-del-territorio/lineamiento>

-
- Gutiérrez, M. (2006). El rol de las bases de datos espaciales en una infraestructura de datos. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- IGAC. (2022). Colombia en Mapas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
<https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Instituto Español de Oceanografía. (2025). Medio marino y protección ambiental.
https://www.ieo.es/es_ES/web/santander/medio-marino-y-proteccion-ambiental
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2020, 14 de mayo). Resolución 471 de 2020. Por la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2023, 17 de julio). Resolución 0899 de 2023.
- INVEMAR. (2010). Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. INVEMAR.
- INVEMAR. (2021). Mapa de ecosistemas MEC 500k. <https://acceso-datos-ambientales-invemar.hub.arcgis.com/datasets/mapa-de-ecosistemas-mec-500k-1/about>
- IPBES. (2019). The global assessment report on biodiversity and ecosystem services. IPBES secretariat.
- Latandret-Solana, S. A. (2021). Estudio de la marea y su pronóstico en la Cuenca Colombia – Mar Caribe [Tesis de grado]. Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla.
- López Martínez, R. M., Zetino Calderón, A. M., Sánchez Flores, D. M., & Fautino Vicente, C. R. (2022). Avances en la investigación científica de cetáceos en América Central durante la década 2011-2021. *Revista Minerva*, 5(1).

MarViva. (2023). Geoportal MarViva.

<https://geoportal.marviva.net/pages/29572923f6734f58ac9454dedb2bef6f>

Mendoza Martínez, O. (2022). Modelos de idoneidad de hábitat del tursión (*Tursiops truncatus*) en dos vertientes de las costas mexicanas [Tesis de maestría]. Universidad Veracruzana.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1993, 22 de diciembre). Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables. Diario Oficial No. 41.146.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Resolución 2182 de 2016.

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2022). Resolución 0460 de 2022.

Morales-Rincón, N., & Jaúregui, A. (2012). Cetáceos presentes en el Caribe nororiental colombiano (2004-2012). *Revista Mutis*, 2(2).

OBIS & GBIF. (2024). Plan de acción conjunto OBIS-GBIF 2024 para datos de biodiversidad marina. <https://doi.org/10.35035/doc-e52v-5875>

Ocean Biodiversity Information System (OBIS). (2021). Gestión científica sólida y conservación de los océanos. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375489_spa

Open Geospatial Consortium (OGC). (2006). OpenGIS Web Map Server Implementation Specification.

Presidencia de la República de Colombia. (2006, 2 de noviembre). Decreto 3851 de 2006. Por el cual se organiza el Sistema Nacional de Información de Tierras.

Rentería Mena, L. F. (2022). Análisis espacial multicriterio para la ubicación de parques eólicos offshore en la Región Caribe Colombiana [Tesis de grado]. Universidad EIA.

Rojas Archbold, A. (2022). Implementación de un geovisor pesquero para el Caribe insular colombiano [Tesis de grado]. Universidad de Salzburg.

Rosso-Londoño, M. C. (2022). Delfines en el Golfo de Urabá, Caribe colombiano: implicaciones para su conservación y el manejo costero [Tesis doctoral]. Universidad de Antioquia.

SiB Colombia. (2020). Brochure alianza ANDI-SiB Colombia.
<https://biodiversidad.co/acercade/imagenes/brochure-alianza-andi-sib-colombia.pdf>

Uribe Ospina, D. (2022). Revisión de métodos de monitoreo de calidad de agua con herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG) para Colombia [Tesis de grado]. Universidad de Antioquia.

Zucchini, B., et al. (2025). Teledetección y sistemas de información geográfica. Fundamentos teóricos y ejemplos de aplicaciones para las ciencias naturales. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).