

CIRCULACIÓN DE CORRIENTES MARINAS EN EL MES DE  
SEPTIEMBRE DEL AÑO 2022 Y SU EFECTO EN EL TRANSPORTE Y  
DISTRIBUCIÓN DE MACROPLÁSTICOS.

FELIPE ANTONIO ALMANZA COGOLLO

TRABAJO INVESTIGATIVO PARA OPTAR AL TÍTULO DE BIÓLOGO  
MARINO.

Director

CARLOS ANDRÉS HENRY LÓPEZ

Lic. Biología y Química – Esp. Ciencias Ambientales

Docente Universidad del Sinú, Cartagena

UNIVERSIDAD DEL SINÚ SECCIONAL CARTAGENA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
ESCUELA DE BIOLOGÍA MARINA

CARTAGENA  
2023

## DEDICATORIA

A mi abuela Felipa Plaza, quien más que una abuela, ha sido una madre amorosa y fuerte, que me ha enseñado a luchar por mis sueños y nunca darme por vencido. A mi abuelo Fulgencio Cogollo, quien, aunque ya no está presente, sigue siendo una gran inspiración en mi vida y siempre lo llevaré en mi corazón. A mis figuras maternas Yesinia Cogollo y Ludis Cogollo, quienes han sido un ejemplo de valentía y resiliencia en mi además de un apoyo incondicional. A mis hermanas Diana Luz y Hefzieli, quienes han sido mis mejores amigas, confidentes y compañeras de aventuras a lo largo de mi vida, a mi tía Samia Lorena por siempre ser tan sensata. A Karen Quesedo, por su amistad incondicional y su apoyo en los momentos más difíciles. A mi amiga Alejandra Mata, por ser mi compañera de vida y estar siempre presente en cada paso que doy. A mis amigos Luis David, Jose, Mauro, Miguel y Estefanía, por su amistad sincera y su apoyo constante. A Valentina Garcés por su apoyo, ánimo y motivación para seguir adelante y alcanzar mis metas. A mis amigos de San Pelayo - Córdoba, por estar siempre presentes en mi vida y ser una gran fuente de alegría y energía positiva. A Carmen Cantero, por ser siempre una amiga incondicional y constante, aunque no nos veamos en mucho tiempo. Este proyecto de grado está dedicado a cada una de estas personas especiales que han sido parte fundamental de mi vida y quienes han contribuido en mi formación personal y académica. Gracias por estar siempre presentes y por hacerme una mejor persona cada día.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Carlos Andrés Henry, mi tutor de tesis, por su inestimable apoyo, guía y orientación durante todo el proceso de investigación y redacción de este proyecto. Su experiencia, conocimientos y dedicación fueron fundamentales para la realización de este trabajo. También quiero agradecer al profesor Camilo Platz por su ayuda desinteresada y su apoyo.

Asimismo, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Felipa Antonia Plaza Galván, mi abuela, por su amor, paciencia, apoyo incondicional y motivación constante en todos los aspectos de mi vida, incluyendo este proyecto de grado. También quiero recordar y honrar la memoria de mi abuelo Fulgencio Cogollo, quien en paz descanse, le agradezco por su ejemplo de trabajo duro, honestidad y dedicación a su familia, a mi mamá Ludís Cogollo por su compañía, cariño y apoyo.

Agradezco también a mi mamá Yesinia María Cogollo Plaza y a mis hermanas Hefzieli y Diana por su apoyo incondicional, paciencia y amor, que me permitieron mantenerme enfocado y superar momentos adversos.

A la profesora Patricia Romero, agradezco su valioso apoyo, consejos y asesoría en los momentos más críticos de mi proyecto. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para superar los obstáculos y alcanzar los objetivos.

A Karen Quesedo y a mi amiga incondicional María Alejandra Mata, les agradezco por estar siempre a mi lado, brindarme su apoyo y motivación constantes, y ayudarme en todo lo que necesitaba para cumplir con mis metas.

Por último, quiero agradecer a mis amigos su incondicionalidad, por la alegría que me brindaron y los momentos inolvidables compartidos a lo largo de mi vida universitaria.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. JUSTIFICACIÓN .....	2
3. REVISIÓN LITERARIA .....	4
3.1 Marco teórico .....	4
3.2 Estado del arte/antecedentes .....	6
3.2.1 Características de la Bahía de Cartagena .....	6
3.2.2 Plásticos.....	12
3.2.3 Modelación hidrodinámica .....	14
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
4.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	18
4.2 Objetivos .....	18
4.2.1 Objetivo general .....	18
4.2.2 Objetivos específicos.....	18
5. HIPÓTESIS .....	19
6. METODOLOGÍA .....	20
6.1 Tipo de investigación y enfoque .....	20
6.2 Descripción del área de estudio .....	20
6.3 Recolección de información.....	21
6.4 Fase de campo .....	21
6.4.1 Calibración del ADCP.....	21
6.4.2 Fondeo del equipo y toma de datos.....	22
6.5 Análisis y procesamiento de la información.....	23
6.6 Descripción y calibración del modelo hidrodinámico Mike 21 Flow Model FM.....	24
6.6.1 Descripción del modelo hidrodinámico .....	24
6.6.2 Calibración del modelo hidrodinámico .....	24
6.7. Identificación de los principales puntos de acumulación de macro plásticos en la Bahía de Cartagena.....	25
7. RESULTADOS .....	26
7.1 Corrientes Marinas.....	26
7.2 Viento.....	35
7.3 Presión .....	36

<b>7.4 Marea</b> .....	37
<b>7.5 Batimetría en 3D</b> .....	38
<b>7.6 Modelación hidrodinámica</b> .....	39
<b>7.7 Principales puntos de acumulación de macroplásticos</b> .....	44
<b>8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	45
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	47
<b>10. RECOMENDACIONES</b> .....	48
<b>11. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	56

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tabla con los valores que corresponden a las medias y máximos mensuales de velocidad del viento expresados en nudos en la Bahía de Cartagena, estos datos fueron tomados entre 1976 y 1994. ....	9
<b>Tabla 2.</b> Tabla con los promedios de temperatura mensual mínima, promedio, y máxima promedio.....	9
<b>Tabla 3.</b> valores mínimos y máximos de corrientes por capa. ....	26
<b>Tabla 4.</b> valores mínimos y máximos de corrientes por capa.....	26
<b>Tabla 5.</b> Resultados de marea obtenidos en los días de muestreo. ....	37

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Resultados de marea obtenidos en los días de muestreo. Fuente: (Andrade et al., 2004).....	7
<b>Ilustración 2.</b> Geomorfología de la Bahía de Cartagena para el año 1973. Fuente: (Vermette, et al., 1977).....	8
<b>Ilustración 3.</b> Volúmenes de agua medidos en Bocachica, Bocagrande y Canal del Dique para cada época. Fuente: (Grisales et al., 2004). .....	11
<b>Ilustración 4.</b> Condiciones superficiales de corrientes, vientos y salinidad en la Bahía de Cartagena en las épocas de lluvias (izquierda) y vientos (derecha) con base en el modelo hidrodinámico MOHID calibrado con mediciones fisicoquímicas mensuales 2014-2016. Fuente: (Tosic, 2017).....	15
<b>Ilustración 5.</b> Ubicación del departamento de Bolívar y mapa batimétrico de la Bahía de Cartagena. Fuente: Autor .....	20
<b>Ilustración 6.</b> Mapa de la Bahía de Cartagena, donde se especifica el punto de toma de datos. Fuente: Autor.....	22
<b>Ilustración 7.</b> Perfil de velocidad de la corriente marina en metros por segundo. Fuente: Autor .....	27
<b>Ilustración 8.</b> Velocidad (m/s) con respecto al tiempo expresado en el número de datos tomados en cada una de las capas (1 a 14). Fuente: Autor.....	28
<b>Ilustración 9.</b> Velocidades de las corrientes marinas (m/s) con respecto al tiempo expresado en el número de datos tomados. Fuente: Autor .....	29
<b>Ilustración 10.</b> Perfil diario de las corrientes marinas. Fuente: Autor.....	29
<b>Ilustración 11</b> Rosa de corrientes marinas a las 12:00pm del día 14 de septiembre del 2022. ....	30
<b>Ilustración 12</b> Rosa de corrientes marinas a las 22:00 a 23:00pm del día 14 de septiembre del 2022. ....	31
<b>Ilustración 13</b> Rosa de corrientes marinas de 9:00 am a 10:00am del día 15 de septiembre del 2022. ....	32
<b>Ilustración 14.</b> Rosa de corrientes de las 20:00pm a 21:00pm en la zona de Varadero-Cartagena. Fuente: Autor.....	33
<b>Ilustración 15.</b> Dirección con respecto al tiempo durante los días de muestreo. Fuente: Autor .....	34
<b>Ilustración 16.</b> Rosa de vientos con datos registrados en la Bahía de Cartagena durante los días de muestreo. Fuente: Autor .....	35
<b>Ilustración 17.</b> Presión respecto al tiempo. Fuente: Autor .....	36
<b>Ilustración 18.</b> Diagrama de líneas que muestra el comportamiento de la marea durante los 3 días de muestreo. Fuente: Autor .....	37
<b>Ilustración 19.</b> Batimetría en 3 dimensiones de la Bahía de Cartagena Fuente: Autor .....	38
<b>Ilustración 20.</b> Batimetría en 3 dimensiones de la Bahía de Cartagena. Fuente: Autor .....	39
<b>Ilustración 21.</b> Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 14 de septiembre del año 2022 a las 12:00 horas. Fuente: Autor.....	40
<b>Ilustración 22.</b> Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 14 de septiembre del 2022 a las 23:00 horas. Fuente: Autor .....	41

**Ilustración 23.** Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 15 de septiembre del año 2022 a las 10:00 horas. Fuente: Autor..... 42

**Ilustración 24.** Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 15 de septiembre del año 2022 a las 21:00 horas. Fuente: Autor..... 43

**Ilustración 25.** Mapa batimétrico de la Bahía de Cartagena. Fuente: Autor..... 44

## **RESUMEN**

Este estudio se enfoca en analizar el movimiento de las corrientes en la Bahía de Cartagena durante la temporada húmeda, específicamente del 14 al 16 de septiembre de 2022. El objetivo principal fue comprender la circulación de las corrientes marinas y su posible impacto en el transporte y distribución de plásticos. Se establecieron objetivos específicos para describir los procesos hidrodinámicos, incluyendo el comportamiento de los macroplásticos, sus fuentes de contaminación y las áreas de acumulación. Para lograr esto, se utilizó el modelo hidrodinámico Mike 21 Flow Model de DHI (Instituto Danés de Hidráulica Aplicada, conocido como DHI), el cual se calibró con datos obtenidos en el campo a través de un ADCP. Se recopilaron 348 datos confiables de corrientes en intervalos de 10 minutos y 72 datos de marea cada hora. Se observó que, en la Bahía de Cartagena, las corrientes mostraron un flujo a las 12:00 horas a través de las fronteras de Bocagrande y Bocachica, mientras que a las 23:00 horas se observó un reflujó. Las zonas más someras presentaron velocidades de corriente más bajas, y se notó una bifurcación en las corrientes provenientes del canal del dique.

Los resultados revelaron que, durante los tres días de medición, las corrientes predominaron en dirección oeste, con las mayores velocidades registradas en el primer día. Además, se pudo evidenciar claramente la influencia de la descarga del canal del dique en la hidrodinámica de la Bahía de Cartagena a través de las simulaciones realizadas.

Este estudio permitió identificar los puntos de acumulación de residuos plásticos y sus principales fuentes de contaminación en la Bahía. Dichos puntos incluyen el este de la Isla de Manzanillo y la Ciénega de las Quintas, así como las zonas sur y este de la Isla de Tierra Bomba, y las regiones sur, este y sureste de la Bahía de Cartagena. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para comprender y abordar la problemática de los plásticos en la Bahía de Cartagena.

## **PALABRAS CLAVE**

Macroplásticos, Batimetría, Hidrodinámica, Polución, Geomorfología.

## **ABSTRACT**

This study focuses on analyzing the movement of currents in Cartagena Bay during the wet season, specifically from September 14th to 16th, 2022. The main objective was to understand the circulation of marine currents and their possible impact on the transport and distribution of plastics. Specific objectives were established to describe the hydrodynamic processes, including the behavior of macroplastics, their sources of contamination, and areas of accumulation. To achieve this, the hydrodynamic model Mike 21 Flow Model from DHI (Danish Hydraulic Institute), was used, which was calibrated with data obtained in the field through an ADCP. A total of 348 reliable current data points were collected at 10-minute intervals, and 72 tide data points were collected every hour. It was observed that in Cartagena Bay, the currents showed an ebb at 12:00 hours through the boundaries of Bocagrande and Bocachica, while a flow was observed at 23:00 hours. The shallower areas exhibited lower current velocities, and a bifurcation in the currents from the dike channel was noted.

The results revealed that during the three days of measurement, the currents predominantly flowed westward, with the highest velocities recorded on the first day. Furthermore, the influence of the dike channel discharge on the hydrodynamics of Cartagena Bay could be clearly observed through the simulations conducted.

This study allowed for the identification of accumulation points of plastic waste and their main sources of contamination in the bay. These points include the eastern part of Manzanillo Island and the Ciénega de las Quintas, as well as the southern and eastern areas of Tierra Bomba Island, and the southern, eastern, and southeastern regions of Cartagena Bay. These findings provide valuable information for understanding and addressing the issue of plastics in Cartagena Bay.

## **KEYWORDS**

Macroplastics, Bathymetry, Hydrodynamics, Pollution, Geomorphology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las corrientes marinas son un componente vital de los ecosistemas oceánicos y juegan un papel crucial en el transporte de diferentes elementos, incluyendo los macroplásticos. Estos residuos contaminantes representan una creciente amenaza para los ecosistemas marinos en todo el mundo.

Es importante destacar los alcances y limitaciones del estudio. En cuanto a los alcances, se espera obtener información sobre los procesos hidrodinámicos y la distribución de los macroplásticos en la Bahía de Cartagena durante el periodo mencionado. Asimismo, se pretende identificar los puntos de acumulación de estos residuos y las principales fuentes de polución

La contaminación por plásticos en los ecosistemas marinos es un problema de gran relevancia a nivel mundial. Estudios previos han evidenciado los efectos negativos de los macroplásticos en la fauna marina y los ecosistemas costeros (Smith et al., 2015; Thompson et al., 2004).

Las corrientes marinas desempeñan un papel fundamental en la dirección y velocidad de transporte de los macroplásticos a través de los océanos. Estas corrientes actúan como autopistas marinas, transportando los residuos plásticos a lo largo de extensas distancias. Según estudios realizados por Lebreton et al. (2012), el conocimiento de las corrientes marinas permite trazar mapas de las rutas de transporte de los macroplásticos y predecir las áreas de mayor concentración de residuos.

Las corrientes marinas también tienen un impacto significativo en la distribución y dispersión de los macroplásticos. Al comprender las características y patrones de las corrientes, es posible predecir cómo se dispersan los residuos plásticos en el océano. Esto es fundamental para evaluar el alcance de la contaminación plástica en diferentes regiones y diseñar estrategias de mitigación adecuadas.

La comprensión de las corrientes marinas y su efecto en el transporte de los macroplásticos desempeña un papel fundamental en la lucha contra la contaminación plástica en los océanos. Al conocer las rutas de transporte, la distribución y dispersión, así como las fuentes y el origen de los macroplásticos, podemos desarrollar estrategias efectivas para reducir la contaminación plástica y preservar los ecosistemas marinos. Es crucial invertir en la investigación y el monitoreo de las corrientes marinas para lograr una gestión sostenible de los residuos plásticos y proteger nuestros océanos para las generaciones futuras.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Es importante modelar el sistema circulatorio de corrientes para cuando puedan ser requeridos y a futuro elaborar planes de contención a problemáticas de contaminantes y otras aplicaciones (Abata, 2013). También influyen enormemente en la vida marina y en el ciclo de nutrientes del agua y son de gran importancia para el ser humano en lo que respecta a la navegación a través del sentido y dirección de las corrientes (Echeverría, 2017).

En las últimas décadas, las cifras de plásticos en ecosistemas marinos han aumentado significativamente, acumulándose de manera incierta por diversos factores como el oleaje y las corrientes, causando impactos negativos en ambientes marinos, aumentando el daño ecológico en especies endémicas o nativas de la zona, que se ven afectadas de manera puntual por la acumulación indeterminada de sólidos, generando así repercusiones en las cadenas tróficas a nivel mundial (Amoine, 2018).

Debido al uso excesivo de los plásticos, estos se han dispersado por todos los mares y océanos, desde los polos hasta el ecuador (Wright & Kelly, 2017), independientemente de la cercanía del ser humano con el ecosistema. La dinámica oceánica ha favorecido la acumulación de estos materiales en algunos lugares particulares como los giros oceánicos, de tal manera que existe una elevada concentración asociada al giro de circulación del Atlántico Norte (Bosker et al., 2018.), del Pacífico Sur (Martinez et al., 2009) y del Pacífico Norte. Este último es conocido como el gran parche de basura del Pacífico o la gran isla de plástico del Pacífico. Además, las altas cantidades de basura marina en los ecosistemas marinos y costeros son más que una realidad, es algo que se puede ver día a día y confirma la problemática sistémica, multicausal, y multiescalar, que permite analizar las fuentes de basura en estos ecosistemas, fuentes las cuales son principalmente antrópicas, por otro lado, no es algo que se ve solo a nivel local o nacional, esto también se ve a nivel internacional, lo cual hace de esta realidad una causa y una responsabilidad global que puede afectar negativamente la salud de los ecosistemas marinos y costeros, la salud humana, la estética del paisaje y las condiciones sociales y económicas con las que se relacionan (Zamora-Bornachera et al., 2021).

Se estima que para el año 2025 la población urbana a nivel global generará más de 6 millones de toneladas de desechos sólidos diarios, lo que estará relacionado con el aumento en la generación de desechos plásticos (Lacerot et al., 2020). La acumulación de los plásticos es mayor en la zona costera que

en mar abierto (Mizraji et al., 2017). Existiendo algunos ambientes como los estuarios, que actúan como retenedores de estos materiales durante la época de sequía; en contraste, durante el período de lluvias, el agua proveniente de los ríos ayuda a exportarlos mar adentro (Ferreira et al., 2018). Adicionalmente, la pandemia causada por el COVID-19 desencadenó un incremento en los plásticos usados, sobre todo los de dispositivos médicos y aquellos relacionados con el empaquetamiento de residuos (Flores, 2020).

(Restrepo & Tosic, 2014), mencionan la necesidad de realizar más estudios sobre la acumulación de contaminantes como residuos sólidos plásticos, entre ellos las botellas, con el fin de conservar los mares y océanos. Por lo que se busca brindar información sobre la distribución actual de plásticos en la Bahía de Cartagena, permitiendo diseñar estrategias de compensación y de mitigación ambiental, como restauración de ecosistemas marinos, contrarrestando los efectos negativos de estos residuos en los ecosistemas.

Es por estas razones que es de mucha importancia el estudio de las corrientes marinas en la bahía de Cartagena y su efecto en la distribución espacial de los plásticos en la Bahía de Cartagena, que permita mostrar donde se acumulan los plásticos según el movimiento de las corrientes y las principales fuentes de contaminación de estos desechos.

### 3. REVISIÓN LITERARIA

#### 3.1 Marco teórico

La salud de los océanos es esencial para la humanidad, pues son reguladores del clima y del calentamiento global, producen la mitad del oxígeno de la atmósfera de la tierra y absorben el 25% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y, por lo mismo, constituyen el sustento para el equilibrio del cambio climático junto a la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, se está viendo afectada por el fuerte aumento de la población mundial del último siglo, puesto que ha derivado un incremento en la cantidad de desechos producidos y que, por consiguiente, llegan a cuerpos de agua marítimos (Amoine, 2018).

En concordancia con lo anterior, la producción de plástico no ha dejado de aumentar año tras año, situándose cerca de los 300 millones de toneladas anuales. Lamentablemente, solo la mitad de ese plástico es utilizable o reciclado después de su uso, terminando más de nueve millones de toneladas en el mar cada año, cifra que equivale a un camión de basura de plástico cada minuto (Amoine, 2018).

Se producen dos tipos fundamentales de interacciones entre organismos y los residuos plásticos, de los cuales están: el enredo y la ingestión. Los efectos letales del entrelazamiento incluyen ahogamiento, mientras que el subletal involucran lesiones en la piel, alimentación comprometida, depredadores limitados, capacidad de prevención, y la reducción de la capacidad reproductiva y el crecimiento que eventualmente conducen a una menor aptitud. Los efectos letales y subletales de la ingestión de plásticos no se pueden identificar fácilmente, pero la evidencia disponible sugiere que la ingestión puede causar ulceraciones, perforaciones y obstrucción del estómago, seguido de la digestión interrumpida, hasta la ablación de un órgano o de un tejido (Paraskevi et al., 2019).

Los datos documentados con respecto a la contaminación por plásticos en los cuerpos de agua de Cartagena son escasos, incluyendo los referentes a la Bahía de Cartagena, que es el principal componente del sistema marino, debido a que allí se encuentra uno de los 25 puertos con mayor tráfico portuario a nivel mundial. Es un delta de comportamiento estuarino, tiene un área de 80 kilómetros cuadrados y está compuesta por dos partes: la Primera, la Bahía principal que considera los sectores desde el Canal del Dique, Boca grande y la segunda; la Bahía interior, formada por los sectores de Bahía de las Ánimas y Bahía interna. Al oeste, le cierra la entrada al mar la isla de Tierra

Bomba, estructura de origen tectónico que delimita las dos entradas de aguas oceánicas. Bocachica; situada en el costado occidental, es el canal principal de navegación y la boca de intercambio entre la Bahía y el mar. Bocagrande, por otro lado, se encuentra en el extremo noroccidental de la Bahía y obstruida por una muralla submarina construida, es el canal de navegación secundario y responsable igualmente del intercambio de aguas entre la Bahía y la zona oceánica mediante una capa superficial somera, dejando así, una zona extensiva de agua estancada en la base de la muralla que migra hacia la Bahía (Arias, 2009; Andrade et al., 2004).

Al suroeste, desemboca el canal del Dique, extensión del río Magdalena, el cual aporta importantes cantidades de agua dulce y sedimentos haciendo que la Bahía pueda considerarse como un cuerpo de agua de carácter estuarino. Durante la última década, los aportes de agua y sedimentos del Canal del Dique hacia la Bahía de Cartagena se han incrementado en 48%. En los últimos 26 años, el Canal ha descargado en la Bahía cerca de 52 millones de toneladas de sedimentos (Restrepo & Tosic, 2014).

En el mar hay gran variedad de ecosistemas, como praderas de pastos marinos, bosques de manglar, arrecifes de coral, entre otros, definidos como sistemas biológicos en equilibrio constituido por una comunidad de seres vivos, o factor biótico, y el medio natural, o factor abiótico (Raffino, 2019), sin embargo, este equilibrio puede verse afectado por aspectos relacionados con actividades humanas causando impacto y efecto sobre el medio ambiente (Mejia, 2008).

Como ya se ha mencionado anteriormente, los desechos plásticos son un gran problema para las comunidades bióticas, pero ¿qué los hace tan dañinos para el medio? La respuesta la plantea el investigador Javier Sánchez (2018), quien dice que “en términos generales, los plásticos son polímeros orgánicos sintéticos que se forman por la polimerización de monómeros extraídos del petróleo. La principal característica que hace este material atractivo para el ser humano es su durabilidad, a la vez es también su mayor problema, ya que es extremadamente resistente a su degradación”. Al pasar el tiempo, los plásticos son fragmentados a escalas micro, considerados así a los plásticos con un diámetro menor a 5 mm, por efecto de las olas, la radiación solar y otros factores (Moos et al., 2012; Thompson et al., 2004).

Ahora bien, pasando al tema de la oceanografía, y para aclarar un poco más lo expuesto anteriormente, los términos más relevantes para el presente proyecto son los que presenta Ramírez (2006): “El océano es dinámico y está en constante movimiento. El movimiento más intenso y visible ocurre en la

superficie. Estos movimientos son las olas, mareas y las corrientes superficiales. Estos movimientos promueven la mezcla de las aguas oceánicas, y tiene efectos sobre la vida en los mares. Las corrientes y las olas están influenciadas por los vientos. Los vientos a su vez están influenciados por el calor generado por el sol. Las corrientes marinas transportan grandes cantidades de agua y energía en forma de calor, por lo que influyen en la distribución de la salinidad y de la temperatura. Como resultado afecta el clima y la productividad de las aguas”.

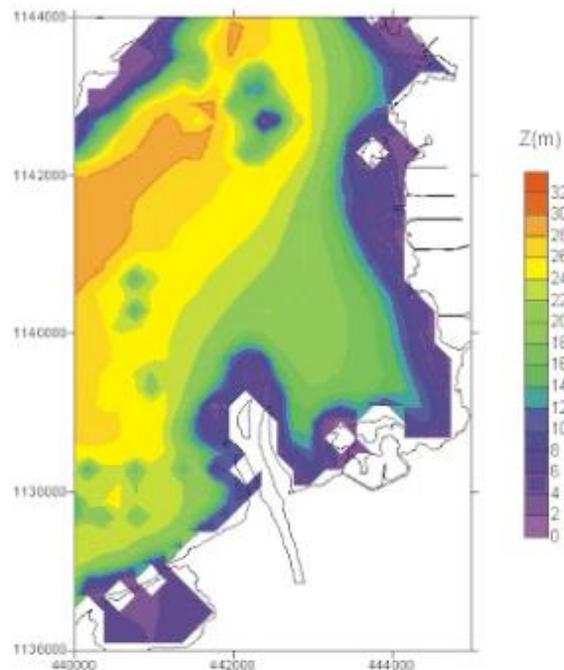
Tosic, 2017 muestra que para comprender mejor los problemas de contaminación en la Bahía de Cartagena se han estudiado previamente la circulación del agua y el transporte de contaminantes, que cuando se combinan sinérgicamente con modelos hidrodinámicos y de transporte, estos estudios basados en la observación proporcionan información importante sobre la dinámica de un sistema. Y citando a Lonin et al., 2004, resalta que estudios de modelado lograron caracterizar muchos de los procesos hidrodinámicos de la Bahía, encontrando que estacionalmente se genera una fuerte estratificación termohalina por la entrada de agua dulce del Canal Dique y el calentamiento de la superficie, lo que da como resultado un intercambio vertical débil y una difusión turbulenta reducida debajo de la pycnoclina (0-4 m de profundidad) atrapando sedimentos finos en la capa superficial del agua. Además, la acumulación de agua dulce descargada del Canal Dique obliga a que el agua fluya hacia el mar a lo largo de la superficie, mientras que el agua de mar impulsada por las mareas renueva las aguas del fondo de la Bahía, principalmente a través de Bocachica, el canal de navegación, y una fina capa de desbordamiento sobre el malecón de Bocagrande, estratificando la advección horizontal de agua a través de los dos estrechos hacia el mar de la Bahía.

## **3.2 Estado del arte/antecedentes**

### **3.2.1 Características de la Bahía de Cartagena**

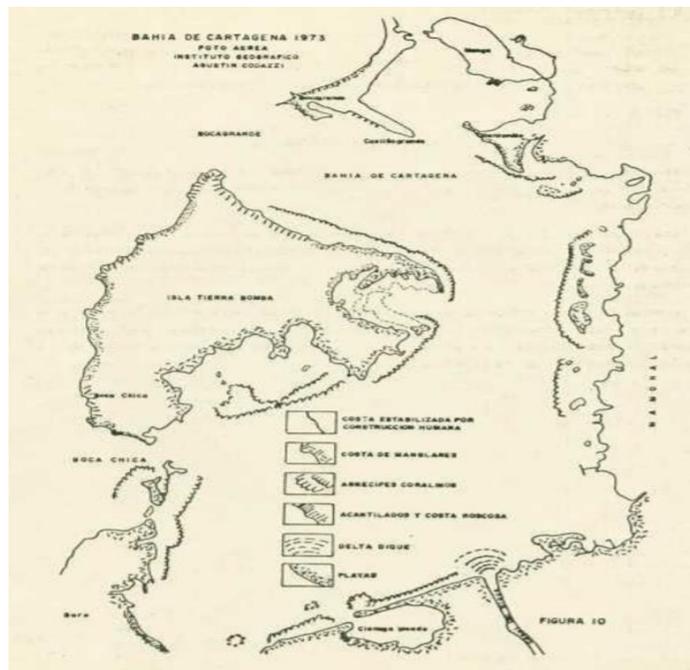
La batimetría en la Bahía de Cartagena, para el año 1935, era predominantemente de una profundidad comprendida entre los 16 y 33 metros de profundidad, pero esto fue cambiando a través de los años, hasta que en 1977 se encontraba un panorama completamente diferente. En la actualidad, la batimetría sigue con la dinámica de cambio de los años anteriores, y se presenta diferente a la de 1977. (Andrade et al., 2004).

La profundidad media de la Bahía de Cartagena es de 16 m, con mínimos entre 0.6 y 2.1 m en el sector urbano de “El Laguito”, y máximos de 30 m (Rueda, 2010). En la ilustración 1, se encuentra la batimetría de la Bahía de Cartagena frente al canal del dique (Andrade et al., 2004).



**Ilustración 1.** Resultados de batimetría obtenidos en los días de muestreo. Fuente: (Andrade et al., 2004)

La morfología actual consta de costas primarias y secundarias, siendo las últimas las que en su mayoría conforman la morfología de la Bahía, es decir, a causa de factores principalmente marinos. Entre las costas primarias podemos encontrar el canal del dique, plataformas rocosas como la de la parte norte y sur de tierra bomba y acantilados, y dentro de las costas primarias se encuentran arrecifes de manglar, edificaciones coralinas y playas, como se puede ver en la ilustración 2 (Vernette et al., 1977).



**Ilustración 2.** Geomorfología de la Bahía de Cartagena para el año 1973. Fuente: (Vernette, et al., 1977).

En la Bahía de Cartagena se encuentran dos obras de ingeniería muy destacables, como lo son la escollera de Bocagrande, y el canal del dique, la escollera almacena el material grueso de las playas de Bocagrande y se comporta como una barrera que afecta la dinámica del agua. Por otra parte, el canal del dique aporta sedimentos finos a la Bahía y se depositan en los fondos (Rueda, 2010).

El viento en la Bahía de Cartagena se encuentra principalmente influenciado por los vientos alisios, de los cuales predominan los vientos alisios del norte y noreste, ya que se encuentra en una zona con un sistema de baja presión llamada ZCIT (Zona de convergencia intertropical), Los vientos se encuentran en una velocidad promedio de 8 nudos (4.11 m/s), aunque se registran fuertes vientos de 20 a 23 (10.2 y 11.8 m/s)nudos, los cuales son de poca duración y se dan, por lo general, acompañados de lluvias torrenciales (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe [CIOH], 2010). En la tabla 1, se observan las medias y los máximos mensuales de velocidad del viento expresados en nudos, desde el año 1976 hasta 1994.

**Tabla 1.** Tabla con los valores que corresponden a las medias y máximos mensuales de velocidad del viento expresados en nudos en la Bahía de Cartagena, estos datos fueron tomados entre 1976 y 1994. Fuente: (CIOH, 2010)

<b>Medias mensuales</b>											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
7.2	7.8	7.9	7.2	5	4.2	4.7	4.3	4	3.8	4.5	5.8
<b>Máximos mensuales</b>											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
25	29.9	24.9	25.2	23.4	22.9	24.9	26.7	22.5	24.9	20.2	26

En Colombia, se manejan dos temporadas, una lluviosa, y una seca. En la temporada húmeda, la cual se caracteriza por sus altas precipitaciones, se encuentran vientos con dirección Este-noreste, y velocidades máximas de 10.0 a 15.0 m/s, y puede descender a 8.0 m/s hasta antes del mediodía. Adicionalmente, en la noche, la energía calórica contenida en el suelo se reduce, y el gradiente térmico entre la Bahía y el continente, son controlados por el incremento de los vientos predominantes del continente, hacia el mar, dinámica la cual es conocida como brisa de mar (Rueda, 2010).

Adicionalmente, en la Bahía de Cartagena existe una época de transición, la cual se caracteriza por vientos con una velocidad media de 4,12 m/s, y registros máximos de 10,0 a 12,0 m/s, acompañados con fuertes precipitaciones a causa de sistemas atmosféricos de gran magnitud (Bayona et al., 2013).

Las temperaturas máximas en Cartagena han registrado un promedio multianual de 31,5 °C, con los valores más altos en los meses de junio, julio, y agosto, con temperaturas que promedian los 31,9 °C y 32,0 °C, con mínimos valores en meses de enero a marzo, con temperaturas de 31,0 °C y 31,1 °C. Las temperaturas promedio presentan sus mayores valores en los meses de mayo a junio, con un promedio de 28,3 °C y 28,4 °C, y los valores mínimos de la temperatura promedio se presentan en los meses de enero a marzo, con un promedio que oscila entre 26,8 °C y 27,1 °C como se muestra en la tabla 2 (Durango, 2009).

**Tabla 2.** Tabla con los promedios de temperatura mensual, mínima, promedio, y máxima promedio. Fuente: (Durango, 2009).

Climatología de Cartagena												
Temperatura (C°)												
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Mínima promedio	22,9	23,1	24,6	24,6	24,9	25	24,7	24,9	24,7	24,4	24,4	23,5
promedio	26,8	26,8	27,1	27,7	28,3	28,4	28,3	28,3	28,2	27,8	27,8	27,3
Máxima promedio	31,1	31	31,1	31,5	31,7	31,9	32	31,9	31,7	31,2	31,4	31,3

La Bahía de Cartagena responde al régimen climático de la región Caribe, que se caracteriza por tener tres estaciones, las cuales son, la época seca, de transición, y húmeda.

En Cartagena la precipitación anual varía entre los 817,8 mm y 1310 mm, con máximas precipitaciones en época húmeda, ya que, debido a la ocurrencia de los ciclones tropicales, estos pueden aumentar el régimen de lluvias en todo el Caribe (Sierra et al., 2014).

La Bahía está influenciada por la descarga del canal del dique, que es capaz de transportar 10 millones de metros cúbicos de sedimentos al año, de esta cantidad, solo el 24% llega a la Bahía de Cartagena y el resto, se descarga en diferentes puntos de salida a lo largo del canal. Además, el canal del dique modifica la hidrodinámica de la Bahía, proporcionando corrientes de agua dulce, y el caudal está determinado por los regímenes climáticos regionales, siendo el caudal más bajo en época seca y el más alto en época de lluvia (Heredia et al., 2013).

Es importante resaltar la influencia que tiene el caudal del canal del dique en el nivel del mar, ya que las fluctuaciones en el nivel del mar coinciden con los del caudal del canal del dique. Las alteraciones se hacen más prominentes en las zonas más cercanas a la costa, que disminuye de este a oeste y aumenta de sur a norte. Las anomalías que presenta el nivel del mar es de 2 cm en época de mayor caudal (época lluviosa), pero puede aumentar dependiendo de la velocidad e intensidad del viento en la zona. (Molares & Mestres, 2012).

Se debe mencionar que existe un flujo de volumen dominante hacia la Bahía en Bocachica, que sumado al aporte de Canal del Dique y para la época seca fue de  $59.1567 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, y un flujo de volumen de salida por Bocagrande de  $76.2013 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, evidenciando una disminución del 28.81% en el volumen de agua aportado a la Bahía; mientras que para la época de lluvias el flujo de volumen aportado a la Bahía por Bocachica y el Canal del Dique fue de  $89.8590 \times 10^6$  m<sup>3</sup> y un flujo de volumen de salida por Bocagrande de  $78.5392 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, lo que permitió determinar un incremento del 12.59 % en el volumen de agua aportado a la Bahía, como se puede observar en la ilustración 3 (Grisales et al., 2004).



**Ilustración 3.** Volúmenes de agua medidos en Bocachica, Bocagrande y Canal del Dique para cada época. Fuente: (Grisales et al., 2004).

En zonas estuarinas, la salinidad presenta una variación según la estación climática, esta disminuye en época lluviosa y aumenta en época seca, por lo que se encontraron variaciones en la salinidad, siendo los datos más bajos los obtenidos en época lluviosa (entre 10-15), época de transición (entre 15-32), y los más altos en la época seca (25-33) (Cañón et al., 2007).

La temperatura en la Bahía de Cartagena a 0.5 metros, con una distribución horizontal, presenta valores entre los 30.0 y 32.0 °C en la época húmeda. Adicionalmente, en lo que respecta a la distribución vertical, en época de lluvias, la termoclina se encuentra entre los 0 y 10 metros de profundidad, con un gradiente de temperatura máximo de 4.0 °C entre 25 metros y la superficie. En la época seca, se presentan valores entre los 31.0 °C y 30.0 °C, descendiendo hasta los 27.5 °C hasta llegar a los 20 m (Rueda, 2010).

El canal del dique en la época de lluvias presenta una gran influencia en el sistema de corrientes superficiales, generando un desplazamiento de agua salobre y liviana hacia el norte. En la época seca, se generan corrientes que son orientadas de sur a norte. por último, en la estación lluviosa, las aguas del canal del dique invaden la Bahía y se comienza a extender la pluma turbia del canal, generando un desarrollo de estas corrientes al norte, girando en sentido contrario a las manecillas del reloj, salen por Bocachica y se orientan a Bocagrande, penetrando la Bahía interna (CIOH, 2010).

En la Bahía de Cartagena, el promedio de la amplitud de las mareas es de 16,76 cm, con un rango en promedio de 33,5 cm, en un periodo de 12 horas.

Se pueden presentar mareas semidiurnas con un mayor rango y con una frecuencia máximo de 6 veces durante el año y periodos hasta de 3 días (Rueda, 2010).

### 3.2.2 Plásticos

Los registros de los daños causados por plásticos a la fauna marina, muchas partes del mundo, como ejemplos clarificados, las islas de basura, la mortalidad de aves, mamíferos y demás vertebrados que habitan en las costas colmadas de botellas, pitillos, tapas y bolsas plásticas; muestra latente de una catástrofe ambiental y ecológica que va en aumento (Thompson et al., 2004)

Los residuos plásticos representan una de las principales fuentes de contaminación en los océanos del mundo (Jambeck et al., 2015). Estos materiales son altamente persistentes en el ambiente y pueden tardar cientos de años en descomponerse, lo que significa que una vez que se liberan en el medio ambiente, pueden persistir por largo tiempo (Lebreton et al., 2018). Además, los plásticos pueden fragmentarse en pedazos cada vez más pequeños, conocidos como microplásticos, lo que los hace más difíciles de detectar y eliminar (Thompson et al., 2009).

La Bahía de Cartagena, ubicada en la costa norte de Colombia, es un área en la que se ha registrado la presencia de residuos plásticos (Díaz-Ramírez et al., 2018). La dinámica de los residuos plásticos en la Bahía de Cartagena está influenciada por una serie de factores, como la topografía del fondo marino, los patrones de circulación del agua, los vientos y las corrientes (González-Gorbeña et al., 2019). Durante la temporada climática húmeda, se espera que estos factores cambien, lo que podría afectar el comportamiento de los residuos plásticos en la Bahía.

Investigadores como Thompson et al. (2004), Paraskevi, et al. (2019; Windsor et al., 2019) concuerdan en que las afectaciones por microplásticos son más preocupantes, ya que las corrientes marinas pueden distribuirlas hasta los puntos más vírgenes del océano afectando un sin número de cadenas tróficas. En una publicación de ecologistas en acción, (Rojo-Nieto & Mototo, 2017). Autoras de libro titulado basuras marinas, plásticos y microplásticos, presentaron un profundo estudio donde recopilan información global de la circulación de los tipos de plásticos y como afectan a la biota, siendo esto último lo más llamativo y de interés.

Allí se menciona que son muchas las especies que han sido afectadas por la contaminación por plásticos, provocando efectos que van desde lesiones físicas que impiden la actividad natatoria de los animales, hasta malformaciones o disfunciones a causa de enmallamientos. Esto es un problema global en aumento, que genera confusión en los peces al momento de alimentarse, y a su vez, pueden ingresar por las branquias al sistema circulatorio y de ahí por toda la cadena trófica hasta los platos de cualquier hogar. (Rojo-Nieto & Mototo, 2017)

Otro ejemplo de esto son los éteres de Polibromodifenilos (PBDEs), que son químicos bioacumulativos que se agregaron a una variedad de mercancía de consumo, entre estos algunos plásticos de productos de oficina. (Hidalgo, 2010) Afirma que PBDES tiene la capacidad de interferir en el desarrollo normal del cerebro de los animales, sospecha también que estos pueden afectar a las hormonas relacionadas con el crecimiento y desarrollo sexual y por si fuera poco, según Hidalgo hay estudios que comprueban que afecta el sistema inmunológico de los animales.

Investigaciones realizadas por Kühn et al. (2015) afirman que la cifra de especies afectadas por enmallamiento o atrapamiento en macroplásticos va en aumento, doblando las cifras registradas en 1977, afectando de 267 a 557 especies en total. Los autores también afirman que los estudios realizados a los reptiles, peces e invertebrados han sido pocos a comparación de los grandes mamíferos marinos, arrojando pocas cifras, que en realidad son nulas a nivel estadístico, a falta de un sin número de especies por estudiar adecuadamente.

El artículo de Schmidt, Krauth y Wagner (2017) investiga la exportación de residuos plásticos desde los ríos hacia el mar. Los investigadores realizaron un estudio en varios ríos de diferentes regiones para determinar la cantidad y el tipo de desechos plásticos que son transportados y acumulados en el océano. Encontraron una correlación significativa entre la poca profundidad y la baja velocidad de las corrientes de los ríos y la acumulación de plásticos en los tramos cercanos a su desembocadura en el mar. La menor profundidad y la baja velocidad de las corrientes favorecen la retención y acumulación de los desechos plásticos transportados por los ríos en estas áreas. Este estudio destaca la importancia de comprender cómo las características de los ríos y las corrientes marinas pueden influir en la acumulación de plásticos en los océanos y proporciona información relevante para el diseño de estrategias de gestión y reducción de la contaminación plástica en los cuerpos de agua costeros.

Las corrientes lentas permiten una mayor acumulación de los plásticos (especialmente los de mayor tamaño), como ocurre con el sargazo en el mar de los sargazos desde la época de colon (Melendez & Melendez, 2013).

La identificación de los puntos de acumulación de los residuos plásticos es importante para diseñar estrategias efectivas de manejo y reducción de la contaminación (Besseling et al., 2017). En la Bahía de Cartagena, se han identificado algunos puntos críticos de acumulación de plásticos, como las playas y las desembocaduras de ríos (Díaz-Ramírez et al., 2018). Además, se ha encontrado que la mayor parte de los residuos plásticos en la Bahía son de origen antropogénico, es decir, provienen de actividades humanas (González-Gorbeña et al., 2019).

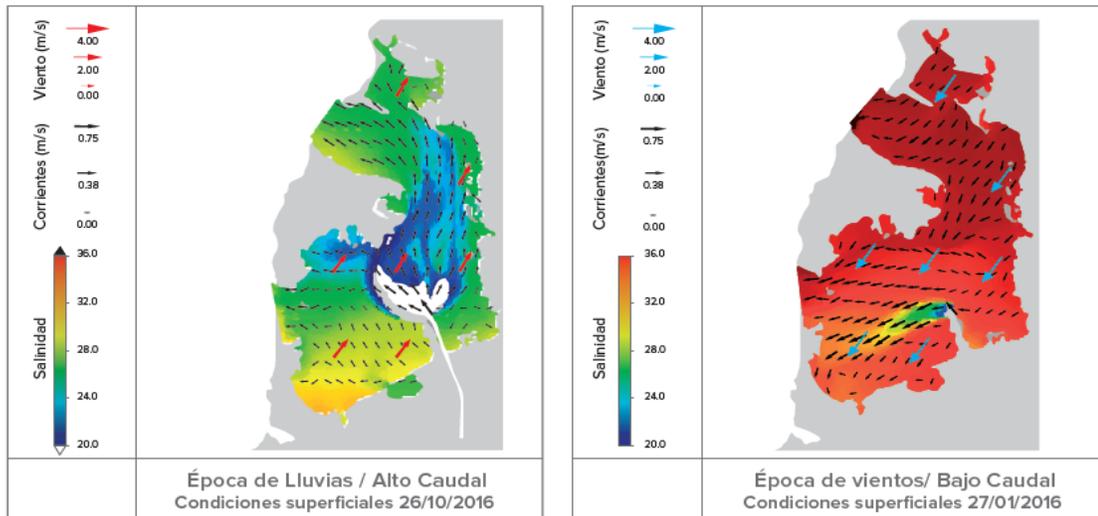
### 3.2.3 Modelación hidrodinámica

Los modelos hidrodinámicos son herramientas útiles para predecir el comportamiento de los residuos plásticos en el ambiente marino (Kako et al., 2017). Al simular las corrientes, los vientos y otras variables hidrodinámicas, es posible estimar cómo se desplazarán los residuos plásticos en la Bahía de Cartagena durante la temporada climática húmeda.

Tosic en 2017 toma de la definición de Lonin, 2009 de un modelo numérico y lo describe como un conjunto de ecuaciones que se utilizan para resolver las variables que caracterizan el sistema en estudio. Como estas variables no pueden medirse de manera factible de forma continua en el tiempo y el espacio, los modelos numéricos basados en ecuaciones diferenciales, con las correspondientes condiciones de contorno, permiten calcular la distribución tiempo-espacio de estas variables. Se ha desarrollado una amplia gama de tales modelos para estudiar y describir la hidrodinámica de las zonas costeras, que se basan en los principios físicos del movimiento del agua y resalta, según Lonin et al (2004), la utilidad de estos modelos matemáticos para estudiar los patrones de circulación de una Bahía y las escalas de tiempo de renovación de agua.

También podemos resaltar que un modelo de transporte es útil para estudiar el movimiento de algunos contaminantes disueltos que se comportan como trazadores pasivos (por ejemplo, sustancias inertes, disueltas), sin embargo, la mayoría de los contaminantes tienen propiedades físicas, químicas o biológicas que generan procesos distintos que requieren, además del movimiento hidrodinámico inicial, de su propio conjunto de ecuaciones. Es así como algunos modelos hidrodinámicos se combinan con modelos fisicoquímicos y de ecosistemas para describir procesos de calidad del agua más complejos como la dispersión de sedimentos, los derrames de petróleo,

la contaminación por metales y la eutrofización, como se muestra en la ilustración 4 (Tosic, 2017).



**Ilustración 4.** Condiciones superficiales de corrientes, vientos y salinidad en la Bahía de Cartagena en las épocas de lluvias (izquierda) y vientos (derecha) con base en el modelo hidrodinámico MOHID calibrado con mediciones fisicoquímicas mensuales 2014-2016. Fuente: (Tosic, 2017).

Tosic en 2017 también muestra que el sistema de modelado de agua MOHID es un ejemplo de un modelo integrado, con una serie de módulos acoplados que describen las propiedades del agua, hidrodinámica, geometría, procesos de advección-difusión, atmósfera y bentos, entre otros. Que el modelo MOHID está construido sobre una amplia base de experiencia científica, utilizando código de fuente abierta que permite la inclusión continua de nuevos desarrollos, y ha sido aplicado por investigadores y profesionales en decenas de estudios. Entre sus aplicaciones, MOHID se ha utilizado para estudiar la dispersión de hidrocarburos y para simular escenarios de impactos de carga de nutrientes en estuarios costeros donde la circulación del agua y el transporte de contaminantes dictan la capacidad del cuerpo de agua para recibir contaminación.

Por otro lado, Mike 21 es un modelo hidrodinámico numérico desarrollado por la empresa danesa DHI para simular el movimiento del agua en ríos, estuarios, Bahías y zonas costeras. El modelo se basa en la solución de las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica, que describen el flujo del agua y la propagación de las ondas en el mar. Además, también tiene en cuenta otros

procesos físicos, como la sedimentación, la erosión y la dispersión de contaminantes. Mike 21 utiliza un enfoque de elementos finitos para discretizar el dominio de simulación en una malla de elementos, lo que permite una mayor resolución espacial y temporal en comparación con otros modelos hidrodinámicos. También tiene una interfaz gráfica de usuario amigable que facilita la conllustración y la visualización de los resultados.

En resumen, Mike 21 es una herramienta útil para el análisis y la predicción del comportamiento del agua en diferentes entornos costeros y marinos, lo que puede ser de gran ayuda para la gestión y la toma de decisiones en proyectos relacionados con la ingeniería costera, la gestión de inundaciones y la evaluación de riesgos ambientales (DHI, 2021).

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la década de los 50 se han producido alrededor de 8,3 mil millones de toneladas de plástico a nivel global, pero sólo alrededor del 9% del plástico producido se ha reciclado (Ritchie & Roser, 2018). El 91% faltante se divide en: 12% que se ha quemado y un 79% restante que ha terminado en vertederos o ecosistemas naturales. Actualmente, las basuras marinas están esparcidas por los océanos, aguas abiertas y zonas costeras, donde los plásticos ocupan el 80% de la totalidad de estas basuras (Gall & Thompson, 2015). A su vez, cuando la basura entra al medio marino, se mueve y se va acumulando por todo el planeta. En la actualidad existen muchos informes sobre la presencia de basura en muchos ecosistemas acuáticos y cada vez son más grandes. Inicialmente, se comenzó a avistar esta problemática solo en las zonas costeras, pero con el pasar del tiempo se han ido descubriendo otros lugares de congregación de basura, a medida va aumentando la problemática (Rojo-nieto & Montoto Martínez, 2017).

El 80% de la contaminación por plásticos en el mar proviene de fuentes terrestres; el 20% restante es de origen marino. Afectando en todos los niveles de la vida marina. La ingesta de plástico libera sustancias tóxicas y reduce la eficiencia de los procesos fisiológicos, con el consiguiente riesgo de muerte directa o indirecta. El aumento de desechos plásticos en los océanos está estrechamente relacionado con el consumo y el desconocimiento de las poblaciones a nivel mundial (Rodolfo, 2015). Hasta el 2015, se habían registrado más de 700 especies afectadas por el plástico. (Royer et al., 2018) en su estudio encontraron que, como el plástico se expone a la luz solar, libera metano y etileno, dos gases que causan el efecto invernadero. Entonces, el plástico no solo contribuye al cambio climático por su producción exacerbada, sino que también lo hace durante la degradación.

Un claro ejemplo de los efectos ejercidos por el plástico es la Bahía de Cartagena, debido a su alta demanda turística, las descargas de aguas por parte del canal del dique y las escorrentías permiten que los residuos plásticos no tengan otro destino más que la Bahía donde quedan en suspensión hasta su degradación o sean redirigidos por el oleaje, el viento o las corrientes a importantes sistemas ecosistémicos presentes en la Bahía. Especialmente en la Bahía podemos encontrar grandes extensiones de bosques de manglar, los cuales son especialmente vulnerables a la contaminación por residuos plásticos, siendo este un hábitat de gran importancia para la epifauna y de diversos organismos sésiles asociados a las raíces de mangles los cuales son gravemente impactados debido a la acumulación de residuos plásticos que se

presentan en mayor proporción en estos lugares (Morán, 2012). Adicionalmente, los plásticos pueden interferir en el intercambio gaseoso entre el sedimento y el agua, creando condiciones anóxicas (INVEMAR, 2016), causando mortandad de peces y de otros organismos presentes en los cuerpos de agua. A pesar de que se tiene conocimiento del potencial daño de los plásticos en los ecosistemas en la Bahía, los estudios actuales sobre el movimiento, la distribución, y las principales fuentes de polución por plásticos en la Bahía, son muy escasos e incluso nulos, lo que puede repercutir en una mayor acumulación, y, por ende, en impactos ambientales que pueden afectar la integridad de los ecosistemas en la zona.

#### **4.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo es la circulación de las corrientes marinas en la bahía de Cartagena y su efecto en la distribución de los macroplásticos?

#### **4.2 Objetivos**

##### **4.2.1 Objetivo general**

- Describir la circulación de las corrientes marinas y su efecto en el transporte y distribución de macroplásticos desde el 14 al 16 de septiembre del año 2022.

##### **4.2.2 Objetivos específicos**

- Describir los procesos hidrodinámicos que se desarrollan en la Bahía de Cartagena desde el 14 al 16 de septiembre del año 2022.
- Utilizar un modelo hidrodinámico para simular el transporte y dispersión de los macroplásticos en la Bahía de Cartagena.
- Identificar los potenciales puntos de acumulación de los macroplásticos Mediante el modelo hidrodinámico y, por medio de una recopilación bibliográfica, las principales fuentes de contaminación.

## 5. HIPÓTESIS

En la Bahía de Cartagena ocurre una dinámica estuarina que varía de acuerdo con la época del año (seca o lluvias), la cual hace que se presente un incremento o disminución sustancial de agua dentro de la misma, dependiendo de los niveles del Canal del Dique, los cuales a su vez afectan el balance e intercambio de masas de agua de la Bahía con el mar abierto y al aporte de agua dulce proveniente del Canal del Dique, y ocasiona perturbaciones en parámetros como la densidad, temperatura y salinidad que influyen en la dinámica estuarina de la zona. A partir de lo anterior, se formula la siguiente hipótesis:

La circulación en la Bahía de Cartagena está mayormente influenciada por la descarga del canal del dique, lo que modifica enormemente las condiciones de la bahía. Por otro lado, se espera que las corrientes tiendan a salir de la bahía durante la marea alta y entren a la bahía en marea baja.

Se espera que los macroplásticos se acumulen en zonas con una morfología cerrada y donde se esperaría bajas incidencia de corrientes, como lo son el sur y este de la isla de tierra bomba, el sureste de la isla de manzanillo y el sur de la Bahía de Cartagena.

## 6. METODOLOGÍA

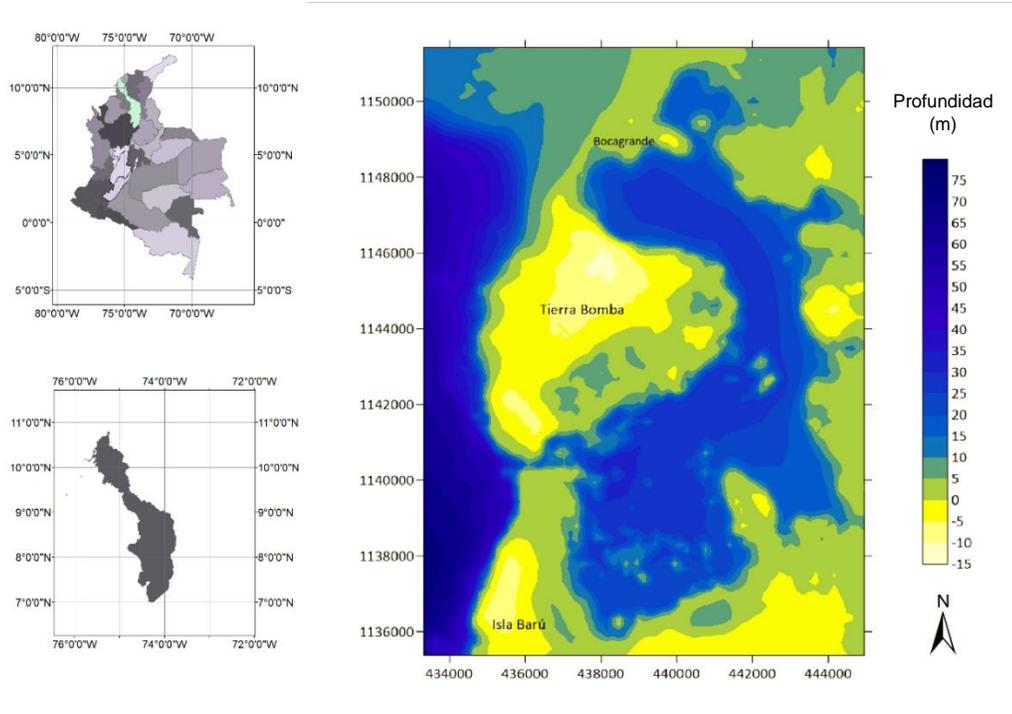
### 6.1 Tipo de investigación y enfoque

Se realizó una investigación de tipo observacional, dividida en 3 fases: recopilación de información previa a la fase de campo, fase de campo (fondeo del equipo y toma de datos) y análisis y procesamiento de la información.

### 6.2 Descripción del área de estudio

La Bahía de Cartagena se encuentra en el departamento de Bolívar, ubicado en las coordenadas  $10^{\circ} 16'$  a  $10^{\circ} 26'$  N y  $75^{\circ} 30'$  y  $75^{\circ} 35'$  O. La Bahía de Cartagena es una zona bajo influencia del mar Caribe y las descargas del canal del dique, que, a su vez, es una desviación del río Magdalena (Rueda, 2010).

En la ilustración 5, se puede observar la posición de la Bahía de Cartagena en el departamento de Bolívar-Colombia y un mapa batimétrico de la zona.



**Ilustración 5.** Ubicación del departamento de Bolívar y mapa batimétrico de la Bahía de Cartagena. Fuente: Autor

### **6.3 Recolección de información**

Se compone de la recopilación de información sobre la dinámica de las corrientes marinas, vientos y mareas, disponibles en la bibliografía. Se recopiló información publicada por el CIOH el Esquema de Cartografía Náutica Nacional (ECNN) aprobado por la Dirección General Marítima (Dimar).

Para la velocidad de los vientos, se usó información proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por medio de la estación meteorológica ubicada en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Adicionalmente, se obtuvo un archivo en formato XYZ suministrado por la DIMAR. Por último, se descargaron datos de marea de la base de datos MAREE de SHOM.

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para identificar las principales fuentes de contaminación por macroplásticos en la Bahía de Cartagena. Se aplicó un criterio de exclusión para asegurar que la información consultada estuviera específicamente relacionada con contaminantes similares y áreas que tuvieran una relevancia directa con el sistema de la bahía. Se priorizaron artículos científicos, informes gubernamentales, publicaciones académicas y otros recursos pertinentes.

Se examinaron estudios científicos, informes gubernamentales, publicaciones académicas y otros recursos relevantes. Además, se tuvieron en cuenta las investigaciones que se habían llevado a cabo en otras regiones con problemáticas similares, para obtener un marco de referencia más amplio.

### **6.4 Fase de campo**

#### **6.4.1 Calibración del ADCP**

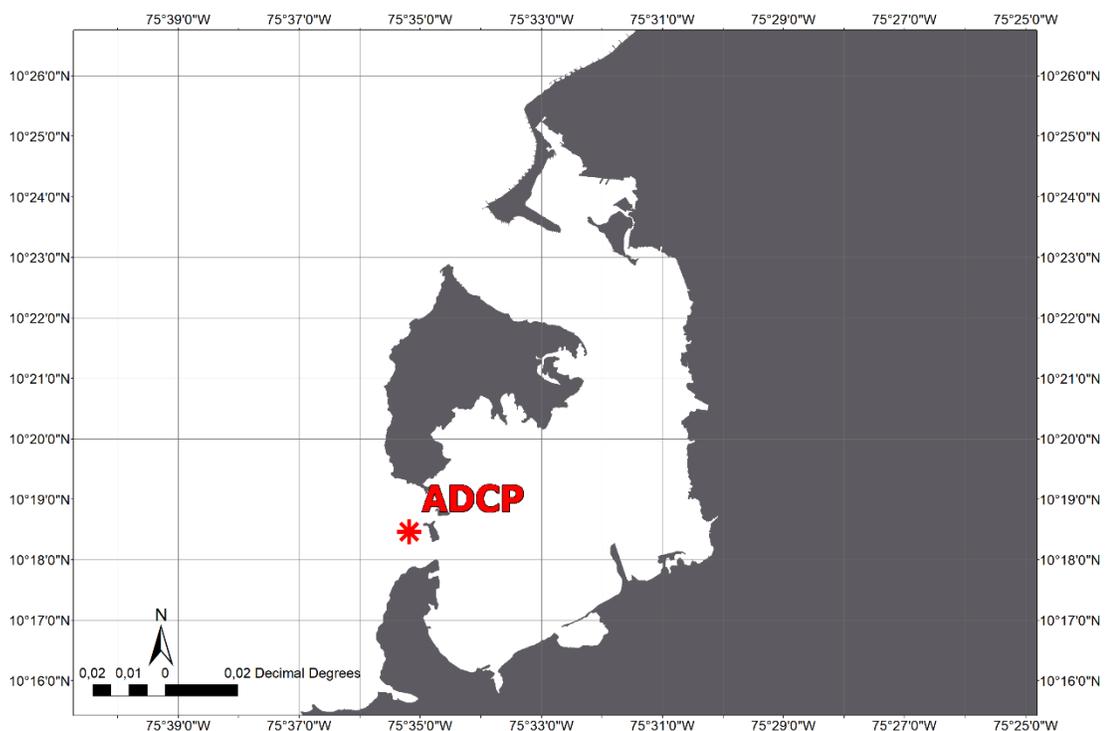
Antes de cada muestreo, se llevó a cabo una calibración del compás y una verificación de los sensores del ADCP (perfilador de corrientes Doppler acústico). Estos procedimientos se realizaron en tierra, ya que el manual del equipo desaconsejaba hacerlo en la embarcación. Para ello, se colocó el ADCP sobre un cartón en una mesa de madera, asegurándose de que no hubiera objetos metálicos cerca. A continuación, se utilizó un cable de interfaz para conectar el equipo al ordenador.

Para llevar a cabo estas tareas, se utilizó el software AQUAPRO V2.00.02 de NORTEK, que actuó como terminal de comunicación con el equipo. En la terminal, se verificaron los sensores del ADCP y se comprobó su sensibilidad.

Además, se realizó la calibración del compás mediante la terminal. Posteriormente, se procedió a programar los intervalos de muestreo, estableciendo un pulso cada 10 minutos. La resolución espacial de las mediciones se configuró para obtener una lectura cada 50 cm, dejando un espacio en blanco de 50 cm.

#### 6.4.2 Fondeo del equipo y toma de datos

Se estableció 1 punto de muestreo, el cual se encontraba en la Bahía externa de la ciudad de Cartagena, específicamente en la zona de varadero, en las coordenadas  $10^{\circ} 18' 27.6''$  N y  $75^{\circ} 35' 11.2''$  O, como se puede observar en la ilustración 6.



**Ilustración 6.** Mapa de la Bahía de Cartagena, donde se especifica el punto de toma de datos. Fuente: Autor.

Los muestreos se realizaron el 14 de septiembre del año 2022 a las 7:40 AM y finalizaron el 16 de septiembre a las 11 PM a una profundidad de 8.5 metros, el muestreo coincidió con la fase lunar de luna llena y gibosa menguante, lo que corresponde a marea de sicigia.

Se midieron las corrientes con un ADCP Nortek aquadopp 600 kHz y la posición con un GPS Garmin etrex 22x.

## **6.5 Análisis y procesamiento de la información**

En esta fase se realizó el análisis y procesamiento de los datos recogidos en campo, MAREE y los suministrados por el IDEAM de velocidad del viento.

Se comenzó esta fase por la extracción de los datos del ADCP al computador, la conexión entre los dos equipos se hizo igual que en la calibración, luego por medio de la terminal AQUAPRO, se descargaron y convirtieron los datos.

Los datos fueron extraídos de la memoria del equipo en formato .prf (formato nativo de los archivos al realizar la extracción de los mismos en el software aquapro) y fueron convertidos a ASCII. Por medio de la visualización del formato ASCII en Excel, se depuró la base de datos, eliminando las mediciones en aire del ADCP para que solo quedaran las mediciones en agua y así los datos arrojados en los softwares sean confiables, esta depuración se hizo teniendo en cuenta el sensor de presión del ADCP, aquellos datos que se encontraron con presión en 0, fueron eliminados.

Posteriormente a la depuración, extracción y conversión de los datos, se usó el software de nortek prof2NDP, para realizar la conversión del archivo .prf a formato .adp para su correcta visualización en el software ExploreP.

Se realizó un análisis de frecuencia de dirección y magnitud, estadística básica para las velocidades del viento y corrientes, por medio de rosas de viento y corrientes en el software Wrplot, donde se indicaron las clases y la orientación del gráfico.

Finalmente, con una batimetría en formato XYZ suministrado por la DIMAR y el software surfer 11, se realizó un modelo 3D de la batimetría del área de estudio de la Bahía de Cartagena.

## 6.6 Descripción y calibración del modelo hidrodinámico Mike 21 Flow Model FM

### 6.6.1 Descripción del modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico Mike 21, el cual se encuentra inmerso en el paquete de modelos Mike Zero desarrollado por la compañía DHI (Danish Hydraulic institute), usa una malla flexible y está basado en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds. El modelo está compuesto por ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad y densidad y está cerrado por un esquema de cierre turbulento (DHI, 2014) las ecuaciones usadas son las siguientes:

La ecuación de continuidad local está escrita como:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Las dos ecuaciones de cantidad de movimiento horizontal para las componentes xy son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial p}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( V_1 \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial p}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( V_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

### 6.6.2 Calibración del modelo hidrodinámico

Inicialmente, se creó una malla flexible a partir de un polígono comprendido entre las coordenadas 10° 16' 27.17"N 75° 36' 33.32"O (esquina inferior izquierda) y 10° 25' 11.74"N 75° 29' 38.60"O (esquina superior derecha). Los límites de la modelación se hicieron de la siguiente forma:

1. Se crearon rutas en Google earth.
2. Se convirtieron las rutas en ArcMap y se le asignó el datum UTM WGS 1984 18N.
3. Se convirtieron las rutas a CAD
4. En AutoCAD se dividieron las rutas en puntos y luego se convirtieron a puntos de terreno para poder exportarlos en formato XYZ.

Luego, se asignaron los puntos de batimetría suministrados para la Dimar para crear la malla flexible.

Posteriormente, se crearon series de tiempo con los datos de marea y viento, para el caudal del canal del dique, se usó un promedio anual que corresponde a 210 m<sup>3</sup>/s según información pública (ANI, 2023), ya que no se tuvo acceso a datos de caudal correspondientes a la época en la que se realizó el estudio.

En la calibración del modelo no se consideraron las siguientes variables:

- Fuerza de Coriolis: cercanía al ecuador.
- Presión Atmosférica: Se tomó como una constante.
- Precipitación y evaporación: Sin datos disponibles.
- Inundaciones y secado: Sin datos disponibles.
- Radiación: Sin datos disponibles.
- Infiltración: Sin datos disponibles.

Se forzaron condiciones de viento y se crearon 3 fronteras por donde se forzaron condiciones como mareas y caudal, las fronteras se ubicaron en Bocachica y Bocagrande, donde se forzaron condiciones de marea y el canal del dique donde se forzó el caudal como una constante.

Chow, Maidment y Mays (1988) proporcionan valores de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes tipos de ríos y canales, información con la cual se decidió establecer el número de manning en 0,025 para la Bahía de Cartagena.

La viscosidad horizontal (Eddy viscosity) se estableció en 0.001, ya que es la más adecuada para la Bahía de Cartagena (Rueda, 2010).

La densidad se obtuvo de forma barotrópica en el modelo y las condiciones iniciales de nivel del mar se establecieron en 0,15, lo que corresponde a la primera medición tomada de marea y se fijaron los pasos de tiempo en 30 segundos.

### **6.7. Identificación de los principales puntos de acumulación de macro plásticos en la Bahía de Cartagena**

Después de la modelación hidrodinámica, se identificaron puntos específicos en la Bahía de Cartagena donde existe un potencial de acumulación de macroplásticos. Se consideraron varios factores;

- La morfología de la zona para identificar áreas con características propicias para la retención de residuos plásticos.
- Presencia de espacios cerrados y con poca circulación dentro de la bahía.
- Baja profundidad en los puntos seleccionados.
- Áreas con bajas velocidades de corrientes
- Morfología costera y presencia de estructuras artificiales.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Corrientes Marinas

Se obtuvieron 348 datos fiables de un total de 381, divididos en 14 capas, con velocidades de corrientes mínimas expresados en metros por segundo, comprendidos entre 0,01 m/s y 0,818 m/s para cada una de las capas, la 1 que corresponde a 1 m hasta la 14 que está asociada a 7.5 m de altura respecto al ADCP (tabla 3 y 4, ilustración 8), con un promedio de 0,135 m/s.

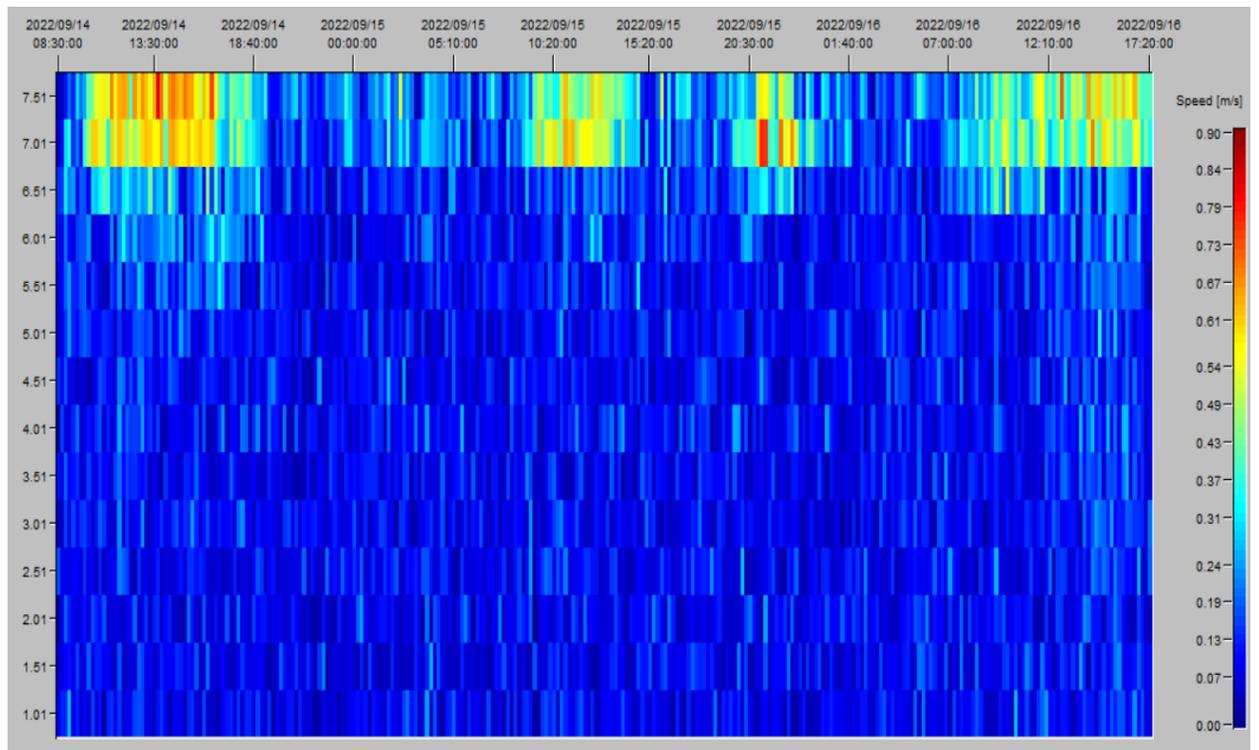
**Tabla 3.** valores mínimos y máximos de corrientes por capa. Fuente: Autor.

	Velocidad#1 (1.00m)	Velocidad#2 (1.50m)	Velocidad#3 (2.00m)	Velocidad#4 (2.50m)	Velocidad#5 (3.00m)	Velocidad#6 (3.50m)
N	348	348	348	348	348	348
Min	0,01	0,006	0,006	0,003	0,006	0,002
Max	0,28	0,322	0,313	0,355	0,334	0,267

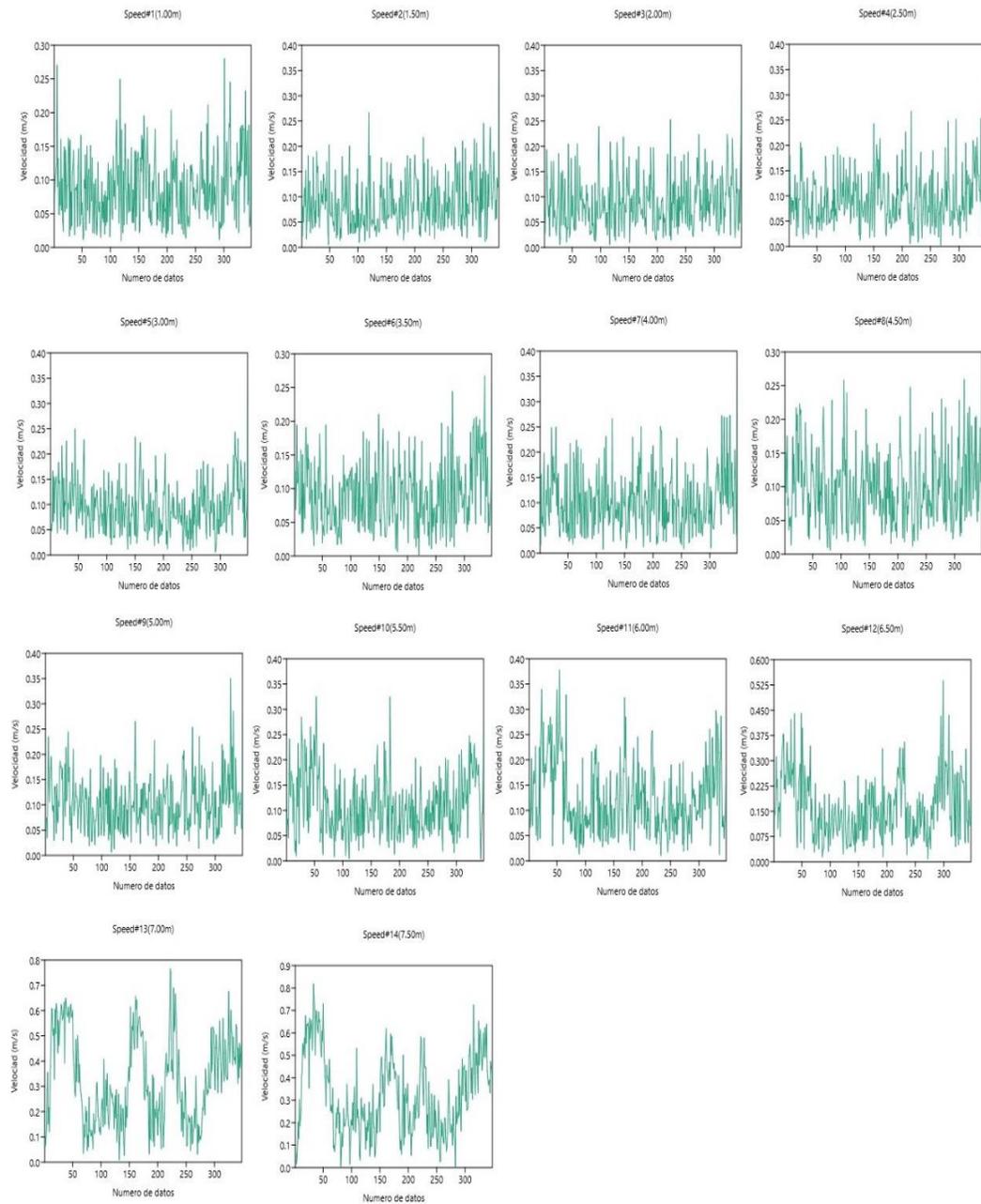
**Tabla 4.** valores mínimos y máximos de corrientes por capa. Fuente: Autor

	Velocidad#7(4.00 m)	Velocidad#8(4.50 m)	Velocidad#9(5.00 m)	Velocidad#10(5.50 m)	Velocidad#11(6.00 m)	Velocidad#12(6.50 m)	Velocidad#13(7.00 m)	Velocidad#14(7.50 m)
N	348	348	348	348	348	348	348	348
Min	0,008	0,006	0,007	0,004	0,011	0,009	0,01	0,004
Max	0,328	0,259	0,35	0,325	0,377	0,537	0,764	0,818

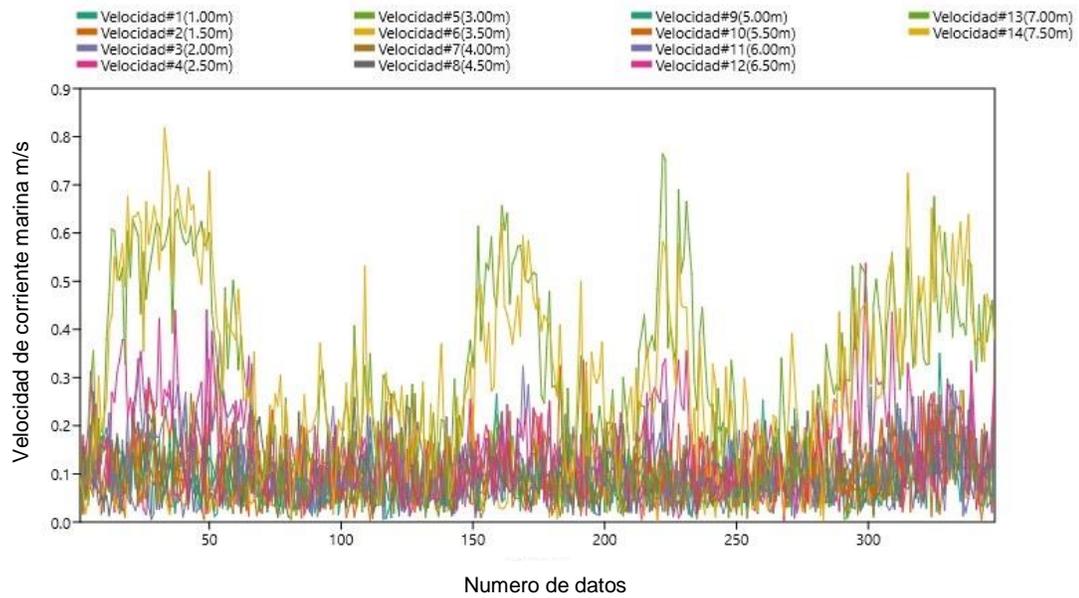
En el software ExploreP de Nortek, se visualizaron perfiles verticales de corrientes. Se encontró que en las 2 últimas capas se presentan las mayores velocidades de corrientes y a la vez, el 14 de septiembre se obtuvieron las mayores velocidades de corrientes (Ilustraciones 7,9,10).



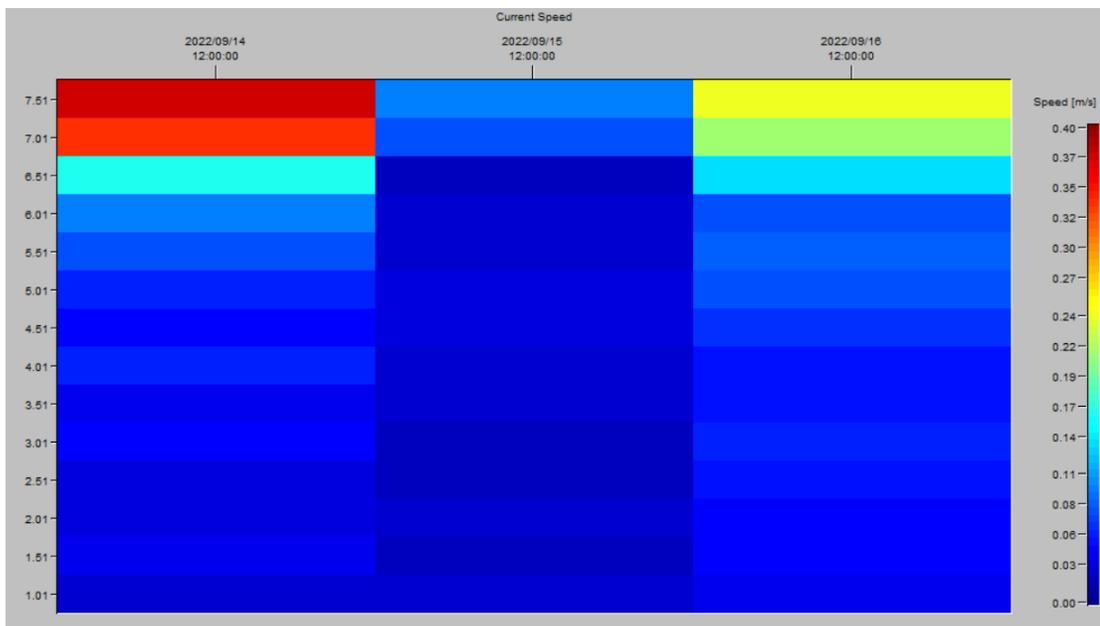
**Ilustración 7.** Perfil de velocidad de la corriente marina en metros por segundo. Fuente: Autor



**Ilustración 8.** Velocidad (m/s) con respecto al tiempo expresado en el número de datos tomados en cada una de las capas (1 a 14). Fuente: Autor

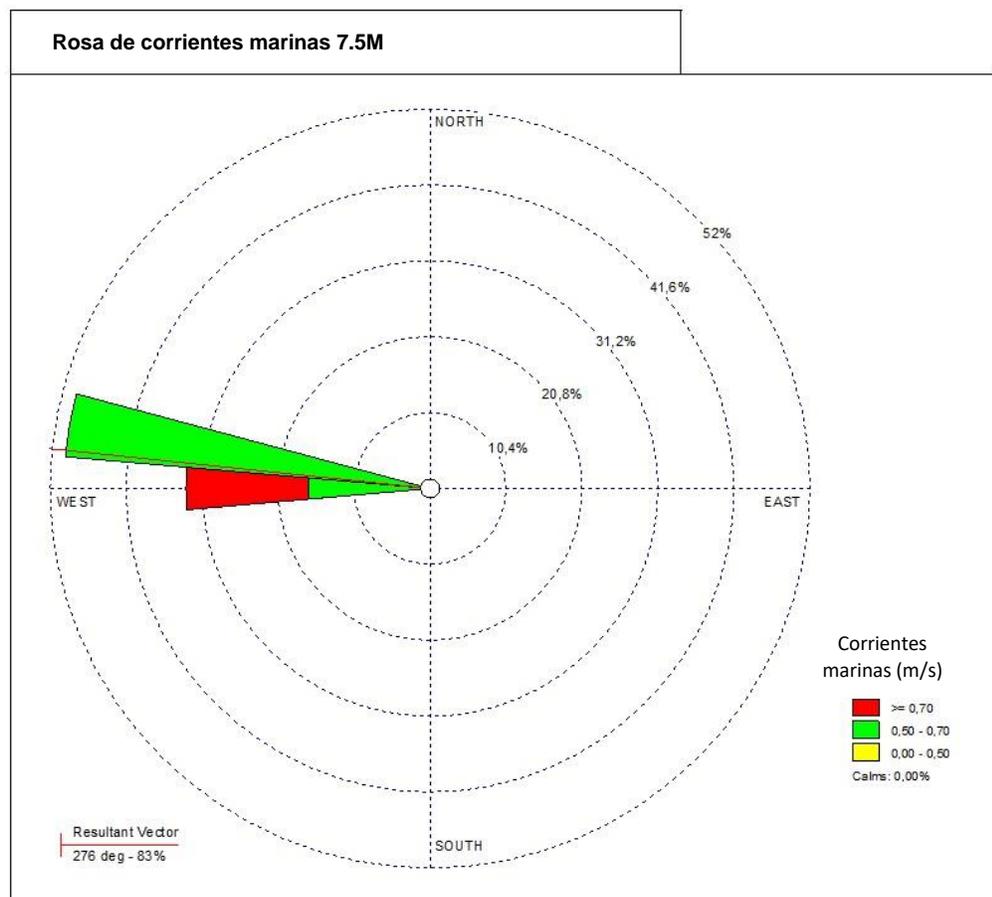


**Ilustración 9.** Velocidades de las corrientes marinas (m/s) con respecto al tiempo expresado en el número de datos tomados. Fuente: Autor

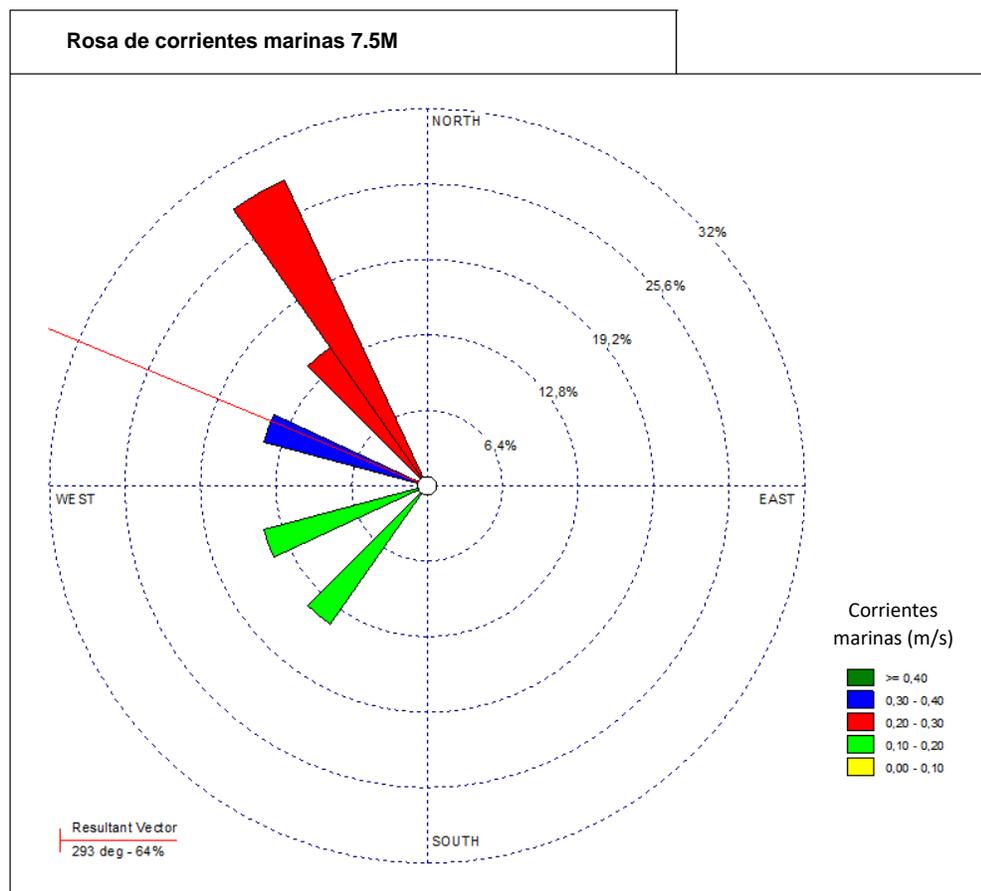


**Ilustración 10.** Perfil diario de las corrientes marinas. Fuente: Autor

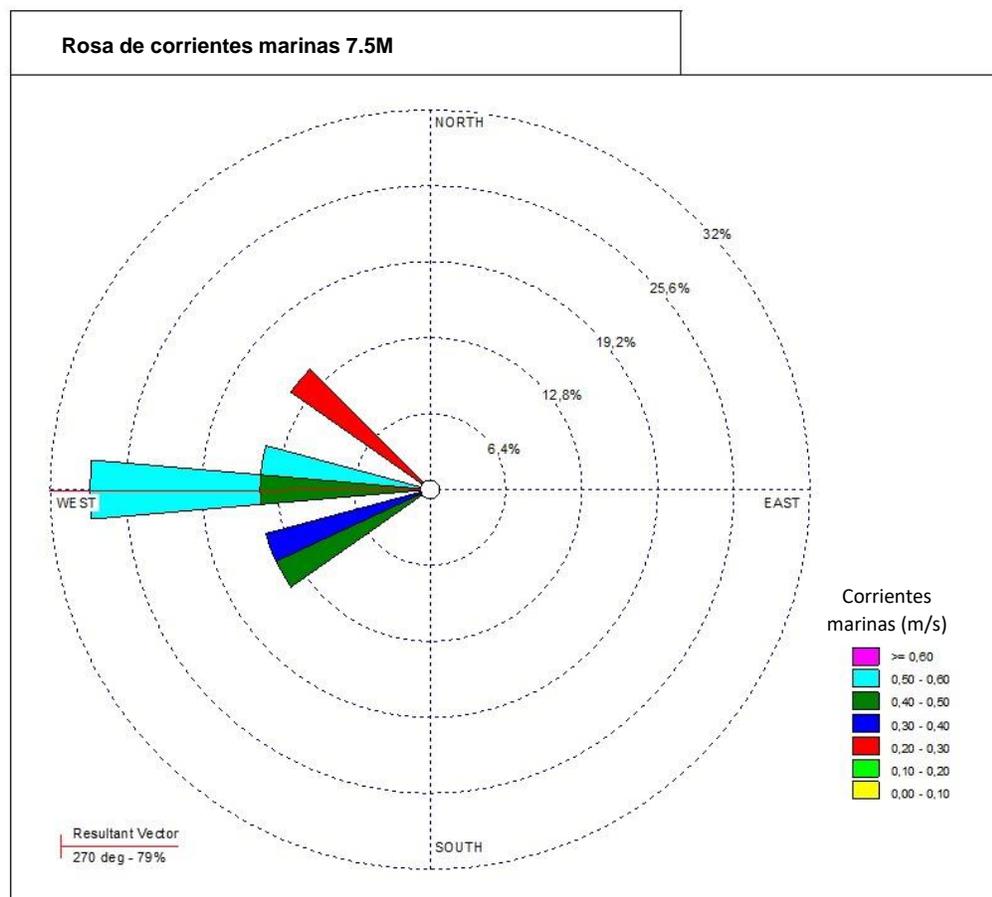
Los diagramas de rosa muestran la velocidad y la dirección de las corrientes en la capa de 7.5m, las cuales presentan un comportamiento hacia el oeste desde las 11:00am a 12:00pm del 14 de septiembre (Ilustración 11), noroeste y suroeste desde las 22:00pm a 23:00pm del 14 de septiembre (Ilustración 12), oeste, noroeste y suroeste desde las 9:00 a 10:00am (Ilustración 13) y suroeste desde las 20:00 a 21:00 pm (Ilustración 14) de igual forma, se puede observar en los diagramas de línea la dirección de las corrientes con respecto al tiempo (Ilustración 15).



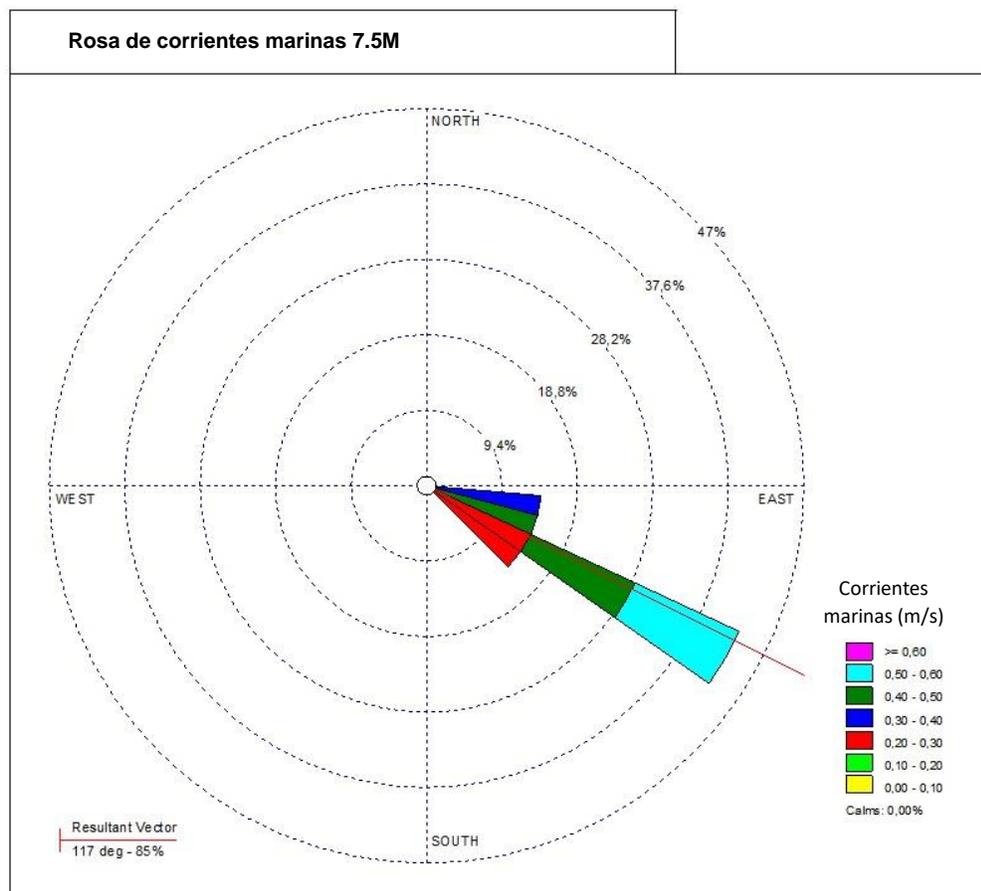
**Ilustración 11** Rosa de corrientes marinas a las 12:00pm del día 14 de septiembre del 2022.



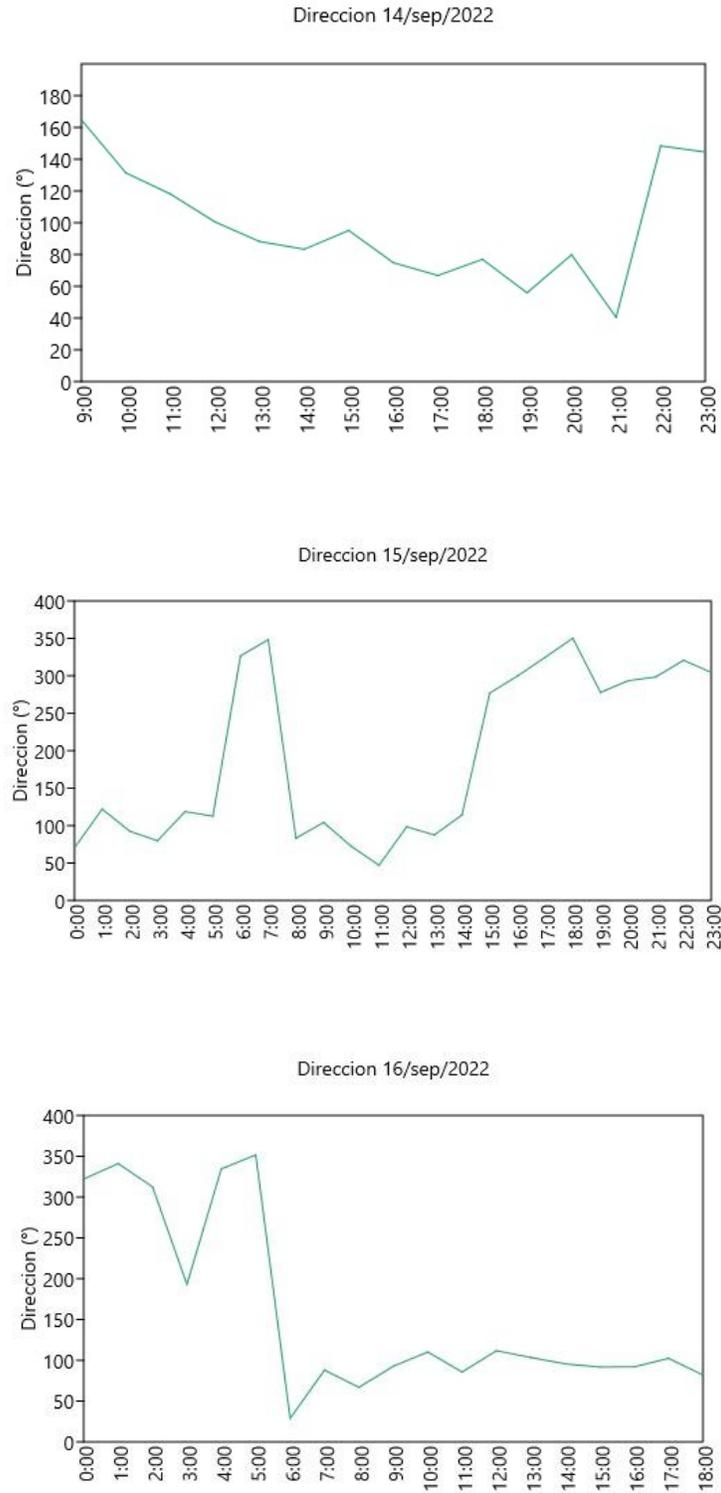
**Ilustración 12** Rosa de corrientes marinas a las 22:00 a 23:00pm del día 14 de septiembre del 2022.



**Ilustración 13** Rosa de corrientes marinas de 9:00 am a 10:00am del día 15 de septiembre del 2022.



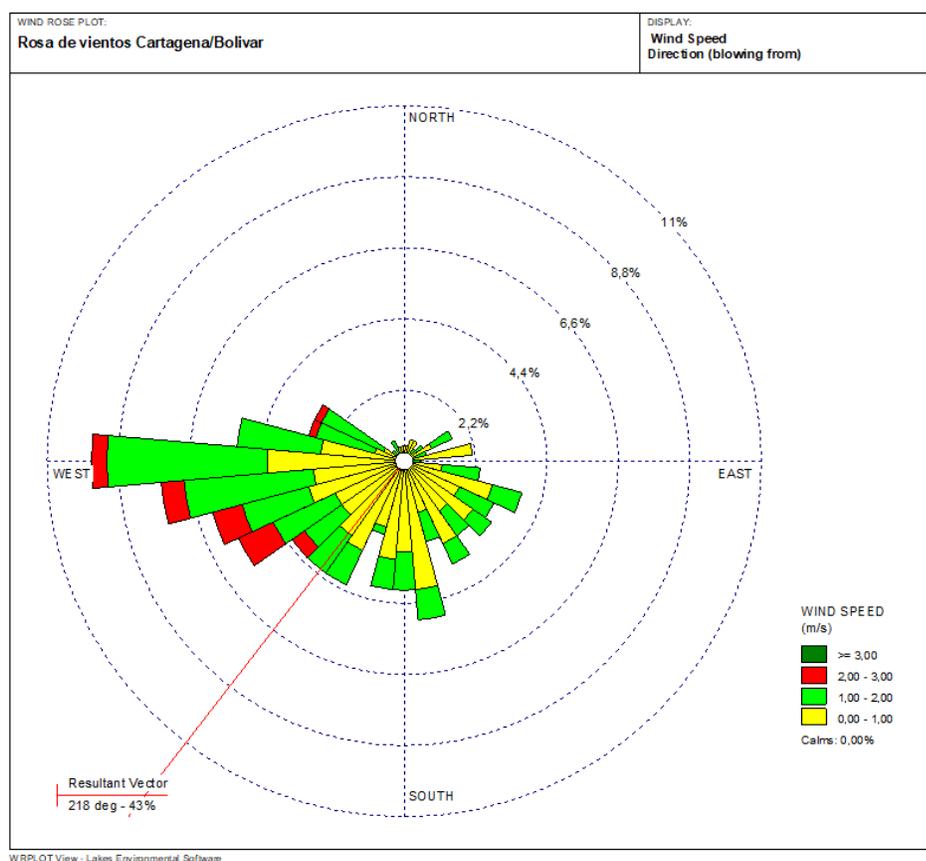
**Ilustración 14.** Rosa de corrientes de las 20:00pm a 21:00pm en la zona de Varadero-Cartagena.  
Fuente: Autor



**Ilustración 15.** Direccion con respecto al tiempo durante los dias de muestreo. Fuente: Autor

## 7.2 Viento

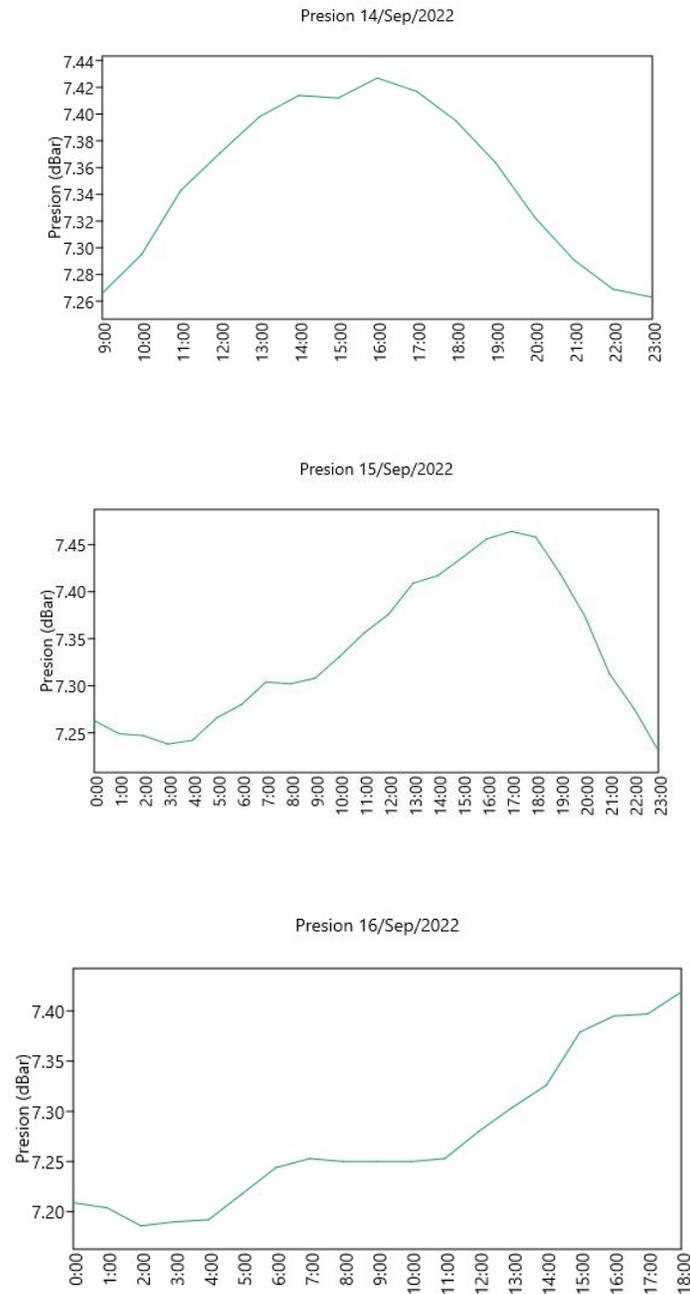
Los vientos en la Bahía de Cartagena para los días de muestreo fueron predominantemente del suroeste, con velocidades mínimas de 0,2 m/s y máximos de 2,5 m/s, con un vector resultante en 218° (Ilustración 16) y un promedio de 0,929 m/s.



**Ilustración 16.** Rosa de vientos con datos registrados en la Bahía de Cartagena durante los días de muestreo. Fuente: Autor

### 7.3 Presión

Se obtuvieron datos de presión cada 10 minutos, que corresponden a la columna de agua con mínimos de 7,18 dBar (decibar), máximos de 7,473 dBar y un promedio de 7,318 dBar (Ilustración 17).



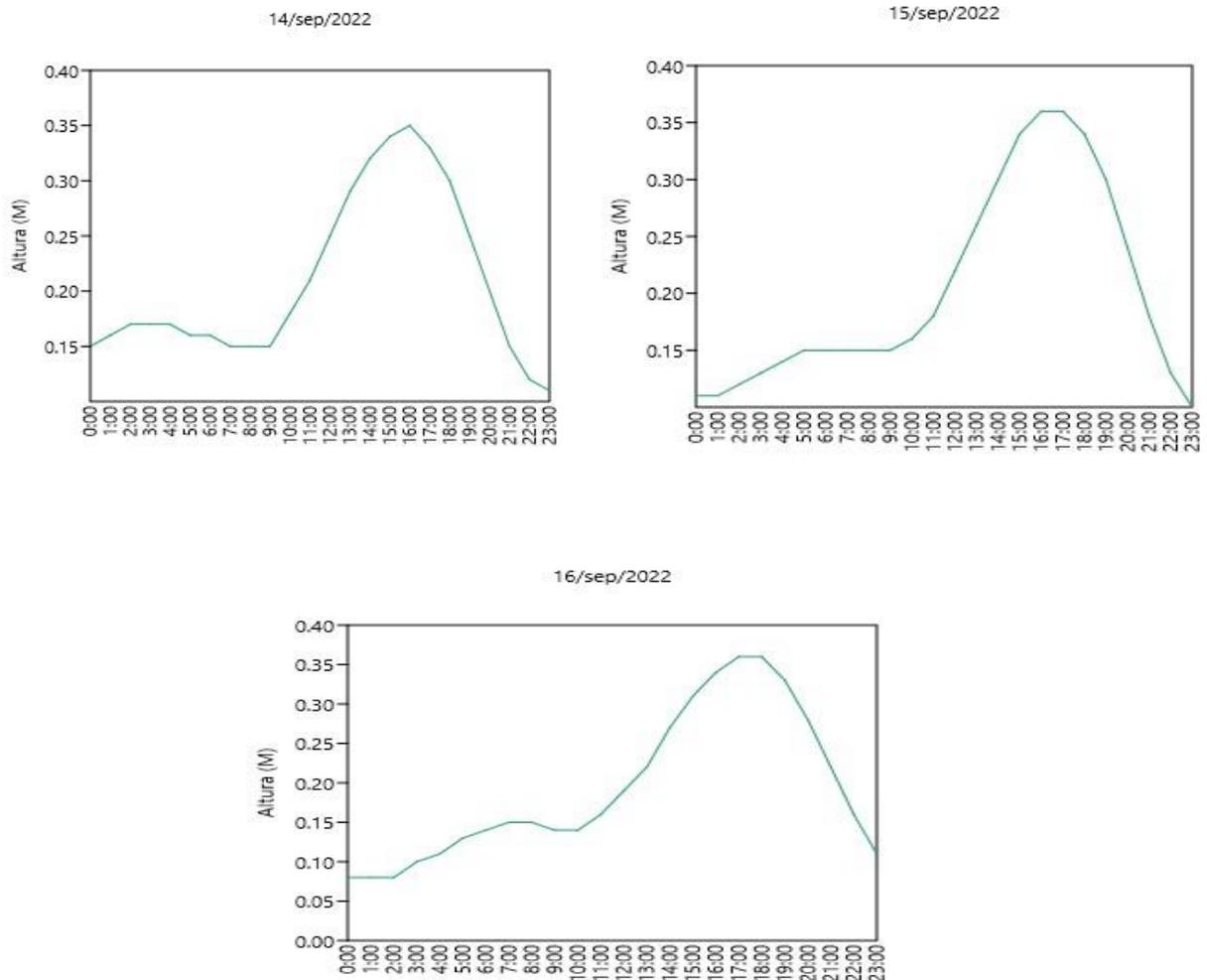
**Ilustración 17.** Presión respecto al tiempo. Fuente: Autor

## 7.4 Marea

Se recopilaron 72 datos de marea cada hora, con mínimos de 0,08 m y máximos de 0,36 m, con un promedio de 0,20 m (Tabla 5 e Ilustración 18).

**Tabla 5.** Resultados de marea obtenidos en los días de muestreo.

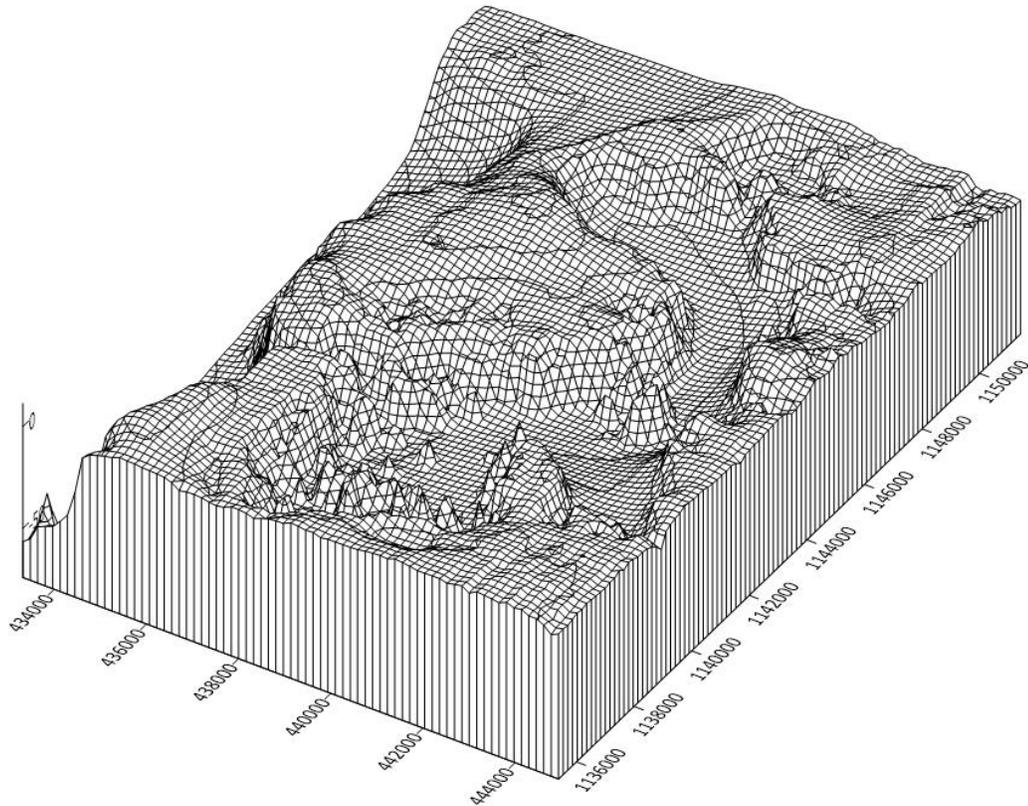
N	ALL
Min	72
Max	0,08



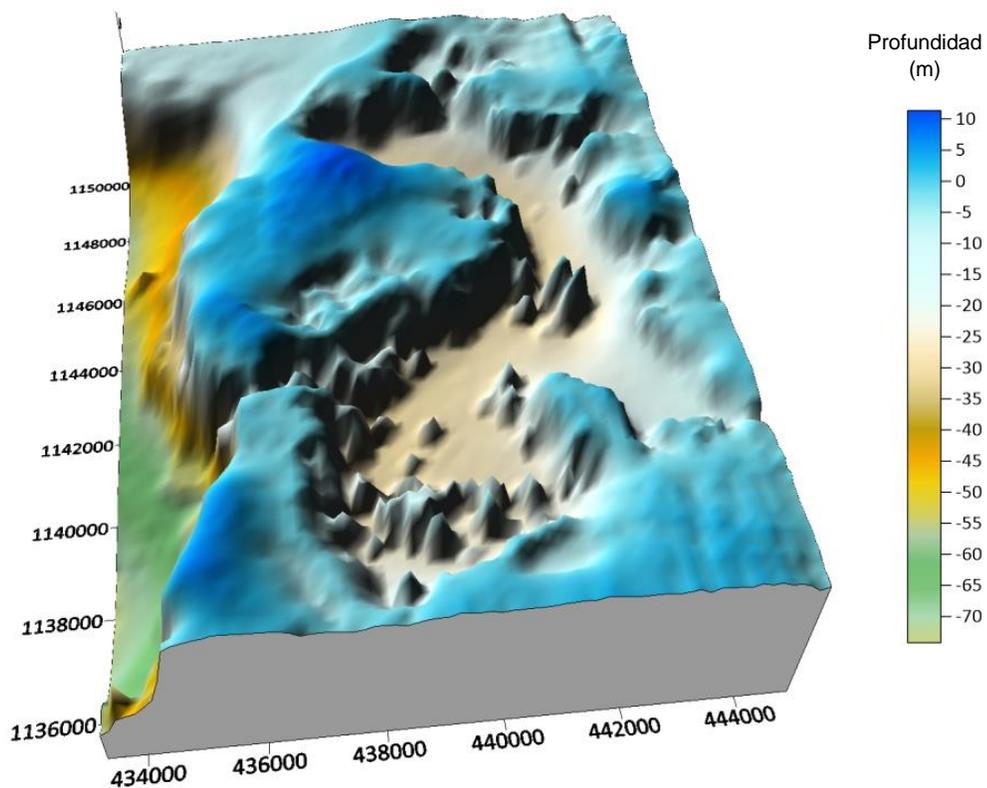
**Ilustración 18.** Diagrama de líneas que muestra el comportamiento de la marea durante los 3 días de muestreo. Fuente: Autor

## 7.5 Batimetría en 3D

Se generaron 2 imágenes de batimetrías en 3 dimensiones de la Bahía de Cartagena (Ilustración 19 y 20).



**Ilustración 19.** Batimetría en 3 dimensiones de la Bahía de Cartagena Fuente: Autor



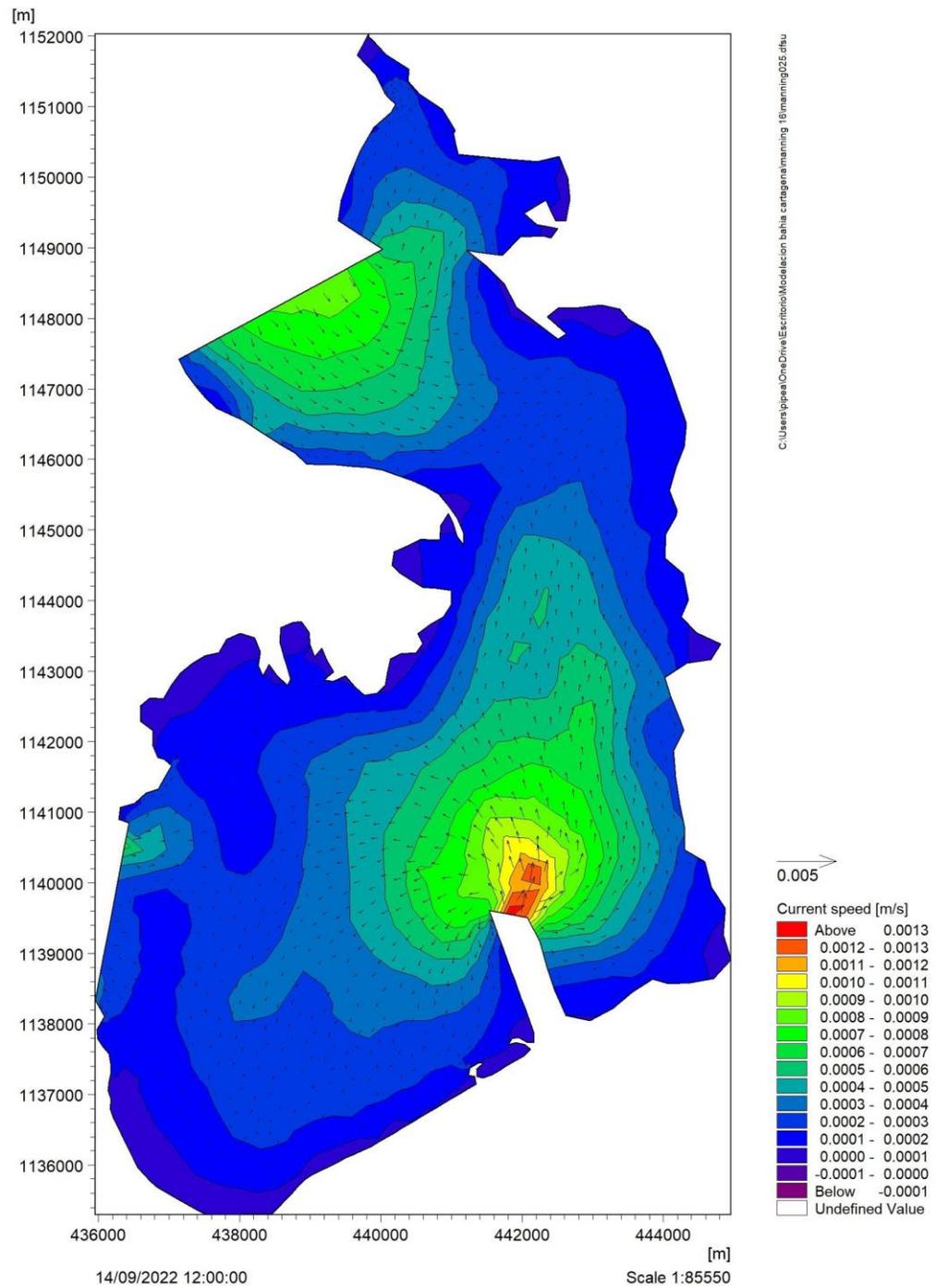
**Ilustración 20.** Batimetría en 3 dimensiones de la Bahía de Cartagena. Fuente: Autor

## 7.6 Modelación hidrodinámica

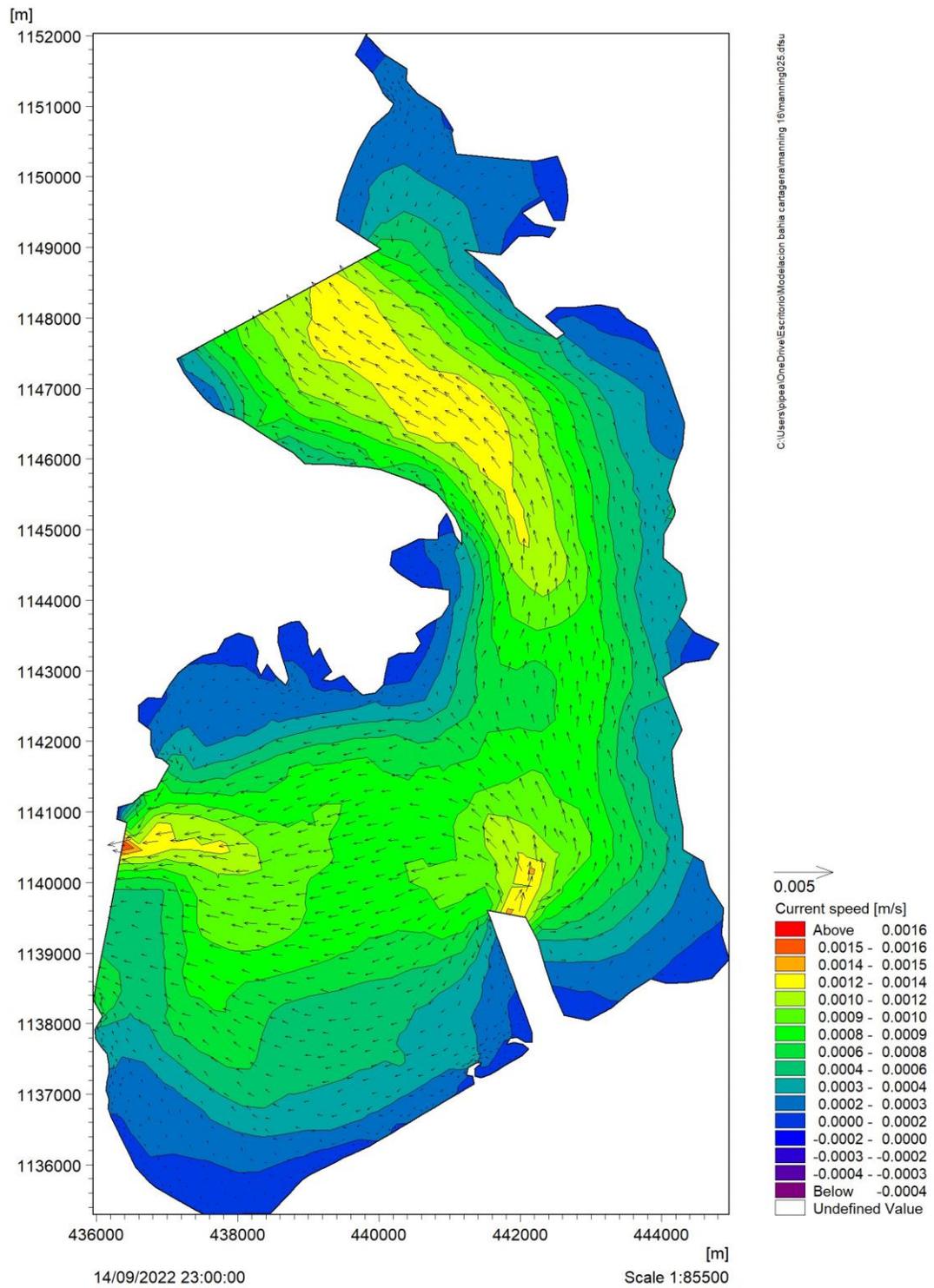
Se evidenció por medio del modelo hidrodinámico Mike 21 que las corrientes en la Bahía de Cartagena, durante los dos días de modelación, mantienen un flujo de las corrientes a las 12:00 horas por las dos fronteras que conectan con el exterior de la Bahía, las cuales son Bocagrande y Bocachica (Ilustración 21) y un reflujó de las corrientes (Ilustración 22, 23, 24).

En periodos de reflujó, las corrientes tienden a salir de la Bahía interna, en flujo tienden a entrar y existe un choque entre las corrientes entrantes y las provenientes del canal del dique.

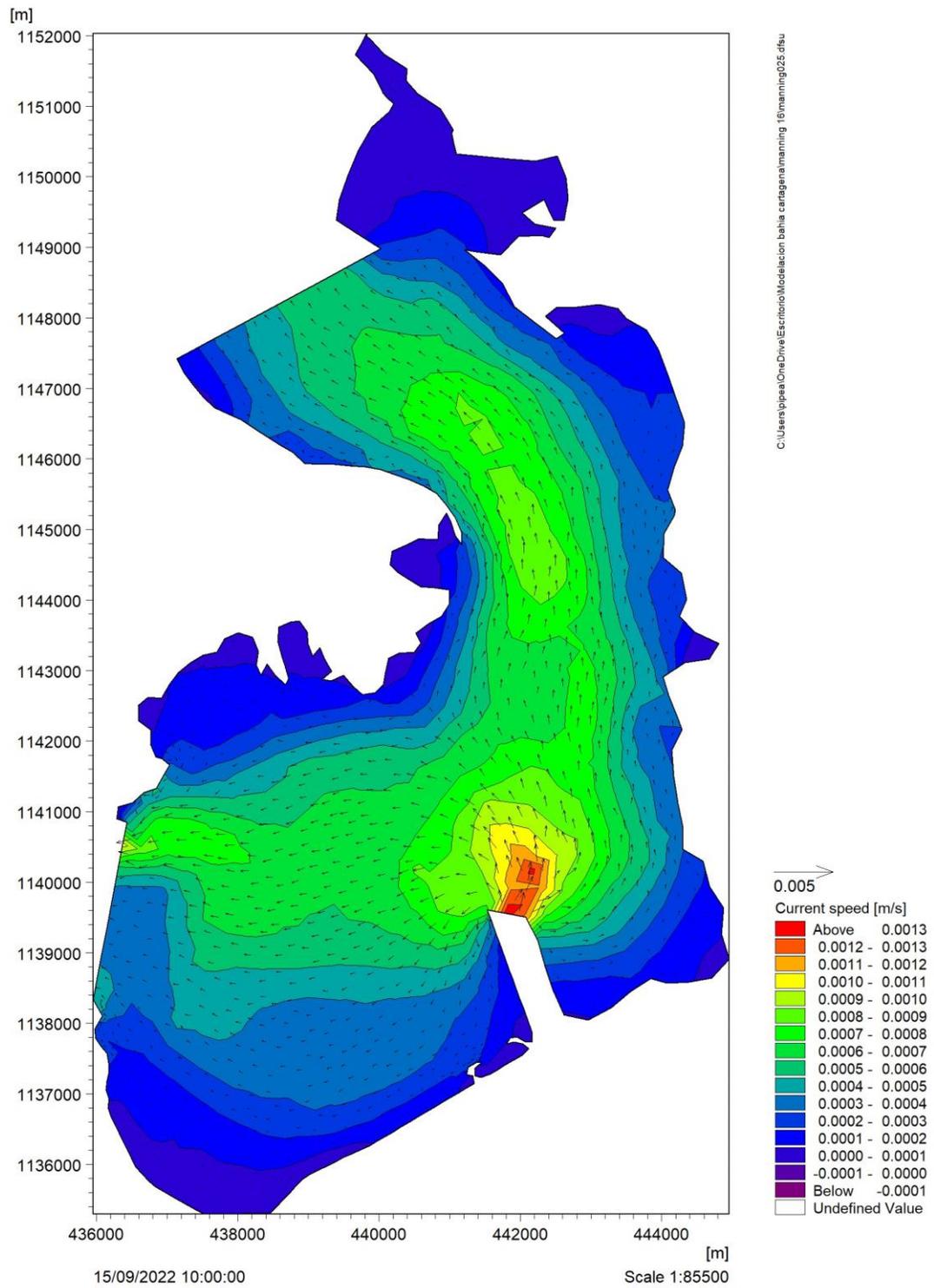
Adicionalmente, se puede observar en las modelaciones, la influencia de la descarga del canal del dique sobre la hidrodinámica de la Bahía de Cartagena y las zonas con menores valores de velocidad de corrientes son aquellas con poca profundidad.



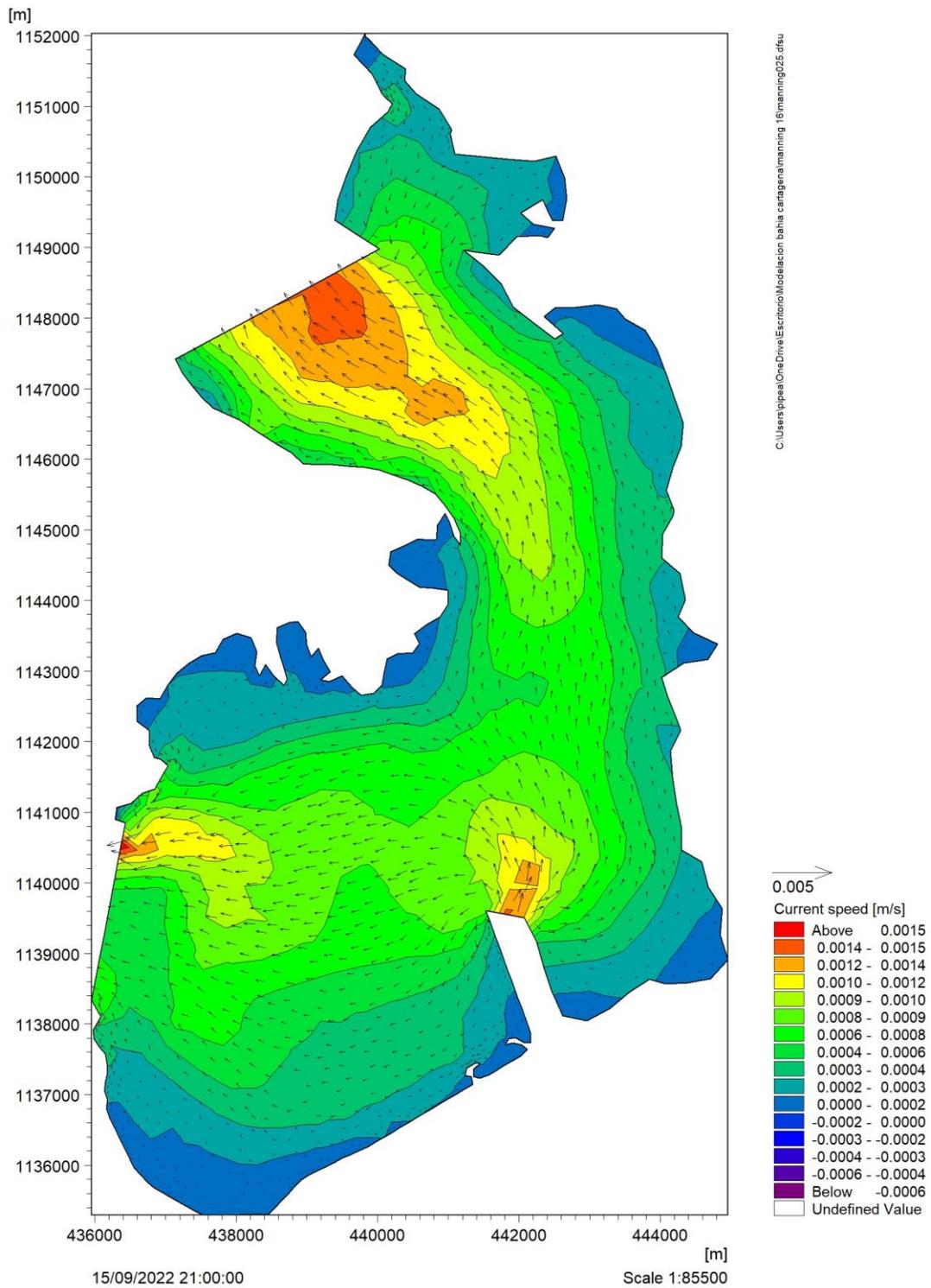
**Ilustración 21.** Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 14 de septiembre del año 2022 a las 12:00 horas. Fuente: Autor



**Ilustración 22.** Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 14 de septiembre del 2022 a las 23:00 horas. Fuente: Autor



**Ilustración 23.** Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 15 de septiembre del año 2022 a las 10:00 horas. Fuente: Autor



**Ilustración 24.** Modelación hidrodinámica de la Bahía de Cartagena para el 15 de septiembre del año 2022 a las 21:00 horas. Fuente: Autor

## 7.7 Principales puntos de acumulación de macroplásticos

En la Ilustración 22 se pueden observar en color naranja las áreas con menor profundidad, lo que junto a la información obtenida en la modelación hidrodinámica, se identificaron los siguientes puntos como sectores con mayor potencial de acumulación de macroplásticos: El este de la isla de manzanillo y la Ciénega de las quintas, las zonas sur y este de la isla de tierra bomba, el sur, este y sureste de la Bahía de Cartagena.

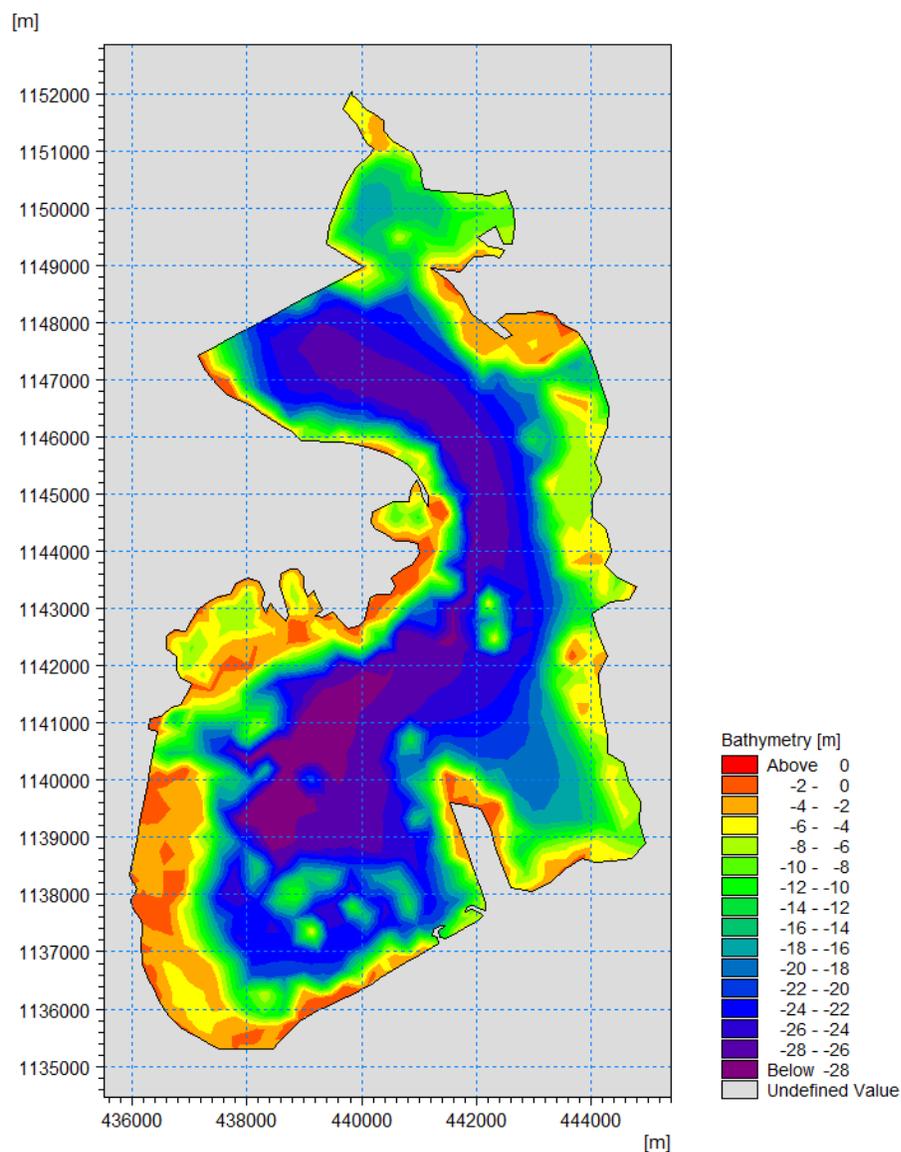


Ilustración 25. Mapa batimétrico de la Bahía de Cartagena. Fuente: Autor

## 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante los días de muestreo, se recopilaron datos de viento que se encuentran dentro del rango de las mediciones realizadas por el CIOH entre 1976 y 1984. Sin embargo, según Rueda (2010), las velocidades de viento registradas en septiembre de 2022 son considerablemente mayores en comparación. Esta discrepancia puede atribuirse al hecho de que solo se tomaron datos de viento durante tres días, lo que impide obtener un conocimiento completo del comportamiento mensual de esta variable.

En el estudio de Rueda (2010), se recolectaron datos de ADCP cerca de la isla de Manzanillo. Se observó que las velocidades más altas de las corrientes se encuentran cerca de la superficie, mientras que los valores mínimos se registran en las capas más profundas. Este comportamiento es similar al observado en septiembre de 2022 en este estudio. Además, se encontró que el viento no desempeñó un papel importante en la dirección de las corrientes. En cambio, el comportamiento de la marea fue el principal factor que definió el comportamiento de las corrientes, dependiendo de si era un período de flujo o reflujó. Se observó una correlación entre el comportamiento de la presión registrada por el ADCP y el patrón de marea, con las mayores presiones ocurriendo durante las horas de marea alta.

Para calibrar el modelo Mike 21 Flow Model, se utilizaron valores de resistencia de fondo y viscosidad horizontal de los Eddy iguales a los empleados por Rueda (2010). La modelación realizada reveló la presencia de períodos de flujo y reflujó, con velocidades mínimas de corrientes en las zonas menos profundas. También se observó una bifurcación de las corrientes, con las corrientes del norte dirigiéndose hacia Bocagrande y las corrientes del oeste dirigiéndose hacia Bocachica, lo cual concuerda con el comportamiento de las corrientes registradas por Rueda (2010) y (Tosic, 2017), Heredia et al. (2013) también resalta la importancia del canal del dique en la hidrodinámica de la bahía. Las velocidades de las corrientes se encontraron dentro del rango de la modelación realizada en ese estudio. Sin embargo, es importante destacar que las velocidades máximas registradas en la modelación de Rueda en 2010 no corresponden a las registradas en el período del 14 al 15 de septiembre de 2022 en este estudio. Esto podría deberse al hecho de que el modelo realizado en Mike 21 no tuvo en cuenta las corrientes fuera de la bahía y su interacción con las corrientes internas, lo cual puede afectar la velocidad y dirección de las corrientes.

Por otro lado, se observó que la dirección de las corrientes medidas por el ADCP en la capa superficial no coincide con la dirección de las corrientes en la modelación. Esto podría atribuirse al hecho de que el ADCP se instaló en un área fuera de los límites del modelo. Sin embargo, se encontró una relación

entre la marea y los períodos de flujo y reflujo observados en la modelación. Durante los períodos de marea alta, se pudo observar un flujo y un reflujo durante la marea baja.

La modelación hidrodinámica realizada para el 14 y 15 de septiembre de 2022 reveló que, durante los períodos de reflujo, las corrientes tienden a dirigirse hacia la Ciénega de las Quintas en la bahía interna. Debido a las bajas velocidades de las corrientes y la morfología de la zona, estas áreas con bajas velocidades de corrientes corresponden a las áreas más someras observadas en los modelos tridimensionales y en los mapas batimétricos presentados en el estudio. Se identificó que el este de la isla de Manzanillo, el sur, este y sureste de la bahía externa, así como las zonas sur y este de la isla de Tierra Bomba, son los principales puntos de acumulación de plásticos en la Bahía de Cartagena. Además, tanto las playas como las áreas costeras de la bahía se ven afectadas por la acumulación de plásticos. Estos desechos plásticos provienen de fuentes terrestres y marinas, y se acumulan en estas áreas debido a las corrientes oceánicas y las actividades humanas irresponsables (Barboza et al., 2019).

Investigaciones adicionales también han identificado los vertidos industriales en la bahía de Cartagena de Indias como una fuente importante de contaminación por plásticos, lo cual afecta negativamente la calidad del agua y los organismos marinos (González-Fernández et al., 2020). Según Urbano (1992), las principales fuentes de contaminación son los vertimientos de aguas negras y alcantarillado, las descargas industriales y los aportes provenientes del canal del dique. Además, el crecimiento demográfico y la falta de tratamiento de aguas residuales urbanas en la ciudad de Cartagena también han contribuido al aumento de la presencia de plásticos en la bahía (Muñoz et al., 2018).

## 9. CONCLUSIONES

La circulación de las corrientes marinas en la Bahía de Cartagena está influenciada por los patrones de flujo y reflujo. Durante el período de modelación, se observó que las corrientes fluyen hacia el exterior de la bahía a las 12:00 horas a través de las fronteras de Bocagrande y Bocachica. Sin embargo, en otros momentos, se produjo un reflujo de las corrientes, lo que indica una dinámica compleja en la bahía.

Durante los periodos de flujo, las corrientes tienden a entrar a la bahía, mientras que, durante los periodos de reflujo, las corrientes tienden a salir. Esta interacción entre las corrientes entrantes y las provenientes del canal del dique genera un choque, lo que implica la existencia de zonas de convergencia y divergencia de corrientes en la bahía.

La descarga del canal del dique juega un papel significativo en la hidrodinámica de la Bahía de Cartagena. Se pudo observar que las áreas con menor velocidad de corrientes se encuentran en las zonas de poca profundidad. Esto implica que la topografía local y la influencia de la descarga del canal del dique influyen en la circulación de las corrientes y en la distribución de la velocidad del agua en la bahía.

La combinación de la información obtenida del modelo hidrodinámico y la identificación de las áreas con menor profundidad permitió identificar sectores con mayor potencial de acumulación de macroplásticos en la bahía. Estos sectores incluyen el este de la isla de Manzanillo y la Ciénega de las Quintas, así como las zonas sur y este de la isla de Tierra Bomba y el sur, este y sureste de la Bahía de Cartagena. Estos puntos críticos se caracterizan por la interacción entre las corrientes, la topografía local y la posible acumulación de macroplásticos.

Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de la dinámica de transporte de macroplásticos en la bahía y pueden ser utilizados para tomar medidas preventivas y de mitigación de la contaminación por plásticos en el área de estudio.

## 10.RECOMENDACIONES

Para posteriores estudios de este tipo, es importante que se hagan modelaciones las corrientes por fuera de la Bahía, ya que es necesario conocer las corrientes de esa zona y su interacción con las corrientes internas de la Bahía

Es necesario que se hagan muestreos in situ de velocidad y dirección de las corrientes en la salida de aguas del canal del dique, en Bocagrande y en Bocachica para conocer como es el comportamiento de las corrientes en cada uno de los sectores.

Es fundamental el tener datos actualizados de caudal del canal del dique para resultados más enfocados a la época.

Las estructuras costeras modifican la hidrodinámica y el transporte de sedimentos, por lo que es importante incluirlas en futuras modelaciones.

Se recomienda usar boyas langrangianas para validar la circulación arrojada por los modelos.

Se recomienda incluir la época seca en próximos estudios.

Se recomienda que la modelación hidrodinámica incluya los parámetros de los plásticos a estudiar para mayor precisión en los resultados.

Por último, es importante hacer muestreos in situ en las zonas identificadas como de mayor acumulación para así corroborar la información que arrojan los modelos hidrodinámicos.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Abata Toscano, K. C. (2013). *Estudio historico de corrientes marinas en bahia naufragio-islas Galápagos empleando los metodos euleriano y lagrangiano de medición de corrientes* (Bachelor's thesis, ESPOL. FIMCM: Oceanografía).
- Amoine, G. (2018). EL PLÁSTICO EN EL MAR. *Revista de Marina, Chile*, 964: 27-34.
- Agencia Nacional de Infraestructura. (2023). Recuperado de [https://anionline-my.sharepoint.com/personal/cdatosani02\\_ani\\_gov\\_co/\\_layouts/15/onedrive.aspx?ga=1&id=%2Fpersonal%2Fcdatosani02\\_ani\\_gov\\_co%2FDocuments%2FPublico%2FModo%20Fluvial%2FIniciativas%20Publicas%2FAPP\\_Dique](https://anionline-my.sharepoint.com/personal/cdatosani02_ani_gov_co/_layouts/15/onedrive.aspx?ga=1&id=%2Fpersonal%2Fcdatosani02_ani_gov_co%2FDocuments%2FPublico%2FModo%20Fluvial%2FIniciativas%20Publicas%2FAPP_Dique)
- Arias, D. (2009). Modelo facial a partir del análisis de los sedimentos de zona costera en el fondo de la Bahía de Cartagena, departamento de Bolívar. Universidad Industrial de Santander.
- Andrade, C., Thomas, Y. F., Lonin, S., Parra, C., Kunesch, S., Ménanteau, L., Velasco, S. (2004). Aspectos morfodinámicos de la Bahía de Cartagena de Indias. *Boletín científico CIOH*, 22, 90-104.
- Barboza, L. G. A., Gimenez, B. C. G., Guilhermino, L., & Ferreira, J. L. (2019). Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy depletion in the clam *Ruditapes philippinarum*. *Environmental Pollution*, 244, 724-732.
- Bayona, J. G. R. (2010). Estudio de la hidrodinamica y sus mecanismos forzadores en la Bahía de Cartagena. Universidad militar nueva granada.
- Bayona, J. G. R., Díaz, L. J. O., & Pierini, J. O. (2013). Caracterización hidrodinámica en un estuario tropical de Suramérica con régimen micro-mareal mixto (Bahía de Cartagena, Colombia). *Boletín Científico CIOH*, 31, 159-174.
- Besseling, E., Quik, J. T., Sun, M., & Koelmans, A. A. (2017). Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: a modeling study. *Environmental Pollution*, 220, 540-548.
- Bosker, T., Guaita, L., & Behrens, P. (2018.). Microplastic pollution on caribbean beaches in the Lesser Antilles. *Mar. Pollut. Bull.*, 133, 442-447.
- Cañón Páez, M. L., Tous, G., López, K., López Osorio, R., & Orozco Quintero, F. J. (2007). Variación espaciotemporal de los componentes fisicoquímico, zooplanctónico y microbiológico en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH*, 25, 120-134.

- CIOH, 2010. Régimen de vientos y corrientes Bahía de Cartagena. Centro de investigaciones Oceanográficas e hidrográficas del Caribe. Cartagena – Colombia.
- CIOH, & CARDIQUE. (2010). Caracterización y diagnóstico integral de la zona costera comprendida entre Galerazamba y Bahía Barbacoas Resumen Ejecutivo. *Dirección general marítima centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR.*
- DHI. (2021). MIKE 21 Flow Model FM. Recuperado el 12 de abril de 2023, de <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21>
- DHI. (2014). Foro de DHI. Recuperado el 6 de Junio de 2015, de <http://forum.mikebydhi.com/index.php>
- Díaz-Ramírez, M., Gelcich, S., & Castilla, J. C. (2018). Marine litter in the coast of Latin America and the Caribbean: a baseline to strengthen the design of regional policies and action. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 189-201.
- Durango, L. C. (2009). Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena de Indias. DT Boletín Científico CIOH, 4-10.
- Echeverría Cabodevilla, Á. (2017). Obtención de energía a partir de las corrientes marinas.
- Eds, F. B. (2019). Lucha contra la contaminación plástica en la Bahía de Cartagena. . Recuperado de <http://fundacionBahía.org/es/lucha-contra-la-contaminacion-plastica-en-la-Bahía-de-Cartagena/>.
- Ferreira, G., Barletta, M., Lima, A., Morley, S., Justino, A., & Costa, M. (2018 ). High intake rates of microplastics in a Western Atlantic predatory fish, and insights of a direct fishery effect. *Environ Pollut*, 236:706-717.
- Flores, p. (2020). La problemática del consumo de plásticos durante la pandemia del covid 19. *South Sustainability*, 1(2).
- Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine pollution bulletin*, 92(1-2), 170-179.
- Grisales, C., Salgado, J., Molares, R. & Babra, J. (2014). Proceso de intercambio de masas de agua de la Bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos. *Bol. Cient. CIOH* 2104;32: 47-70.
- González-Fernández, D., Gómez-Gutiérrez, A., & Librero, J. A. (2020). Impact of microplastics on the coastal ecosystem of Cartagena de Indias, Caribbean coast of Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 152, 110877.

- González-Gorbeña, E., Duque, M., & Orozco-Hernández, A. (2019). Distribution and characterization of floating macroplastics in the Bay of Cartagena, Colombian Caribbean. *Marine Pollution Bulletin*, 145, 353-360.
- Heredia, G. S., Saavedra, D. M. Q., Suarez, K. L., & Herazo, G. T. (2013). Evaluación de la calidad de agua en la Bahía de Cartagena durante la temporada seca de 2013. *Boletín Científico CIOH*, 31, 143-158.
- Hidalgo, L. (2010). La basura electrónica y la contaminación ambiental. . *Universidad tecnología equinoccial.*, 1: 46-61.
- INVEMAR. (2016). Informe sobre la caracterización biofísica y socioeconómica rápida de las condiciones ambientales de la ciénaga las quintas, Cartagena, Bolívar.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- Kako, S. I., Yamamoto, T., Morita, Y., Takada, H., Watanuki, Y., & Ishii, H. (2017). Modeling the transport of microplastics in the ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 124(2), 501-507.
- Kühn, S., Bravo, E., & van Franeker, J. (2015). Deleterious effects of litter on marine life. In M. Bergmann, L. Gutow & M. Klages (Eds.), *Marine anthropogenic litter*, 75–116.
- Lacerot, G., Lozoya, J., & Texeira de mello, F. (2020). Plásticos en ecosistemas acuáticos: presencia, transporte y efectos. *Ecosistemas* 29-3, 29-3.
- Lebreton, L. C., van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2018). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 9(1), 1-10.
- Lebreton, L. C. M., Greer, S. D., & Borrero, J. C. (2012). Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. *Marine pollution bulletin*, 64(3), 653-661. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.10.027
- Lonin, S. (2009). Modelacion Numérica en Oceanología
- Martinez, E., Maamaatuaiahutapu, K., & Taillandier, V. (2009). Floating marine debris surface drift: Convergence and accumulation toward. *Mar. Pollut. Bull.*, 58(9):1347-1355.
- Medina, L., & Murillo, V. (2016). Evaluación del grado de ingestión de micro-plásticos en el recurso anchoveta (*Engraulis ringens*) frente a las costas de la IV Región de Coquimbo, durante el invierno de 2016. *Institución de fomento pesquero*.

- Meléndez Valencia, M. A., & Meléndez Torres, P. I. (2013). Influencia de la circulación eólica y marítima en la formación de las islas de basura en el mundo. *Ciencia y sociedad*.
- Mejía, G. T. (2008). La base científica del cambio climático. *Geominas*, 36(46), 77-86.
- Mizraji, R., Ahrendt, C., Perez-Venegas, D., Vargas, P. J., Aldana, M., Ojeda, P., Galbán-Malagón, C. (2017). ¿ Is the feeding type related with the content of microplastics in intertidal fish gut? *Mar Pollut Bull*, 116(1-2):498-500.
- Molares, R., & Mestres, M. (2012). La influencia de la descarga del Canal del Dique en los niveles del mar de la Bahía de Cartagena-Colombia.
- Von Moos, N., Burkhardt-Holm, P., & Köhler, A. (2012). Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environmental science & technology*, 46(20), 11327-11335.
- Morán, L. (2012). Impacto de la presencia de desechos sólidos en las zonas de manglar. *Revista Vinculando*.
- Muñoz, R., Romero, L., Pinedo, J., & Aristizábal, G. (2018). Water quality and microplastic pollution in urban beaches of Cartagena, Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 616-624.
- Ortega, M. J., Santos, C., Carrero, J., & Tovar-Sánchez, A. (2021). Microplastics in sediments, bivalves, and marine mammals from the Caribbean coast of Colombia. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111926.
- Paraskevi, A., Foskolos, I., & Frantzis, A. (2019). Ingestion of macroplastics by odontocetes of the Greek Seas, Easter Mediterranean: often deadly. . *Marine Pollution Bulletin*. , 67-75.
- Peña, C., Soltau, J., Ortiz, J. T., & Silvera, J. (s.f.). Seguimiento de las condiciones meteorológicas y oceanográficas. . *Dirección general marítima. Cartagena de Indias D. T. Y C. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH*. .
- Restrepo, J., & Tasic, M. (2014). Bahía de Cartagena Resumen para tomadores de decisión. *BASIC Interacciones entre cuenca, mar y comunidades*.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2018). *Plastic Pollution*. Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- Rodolfo, E. (2015). Mar de plástico: Una revisión del plástico en el mar. *Revista de Investigación y Desarrollo Pesquero*, 87-105.

- Rojo-Nieto, E., & Mototo, T. (2017). Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global. Madrid, España. *Ecologistas en acción*, 53.
- Roser, H. R. (2018). *Plastic Pollution*. Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- Royer, S.-J., Ferrón, S., Wilson, S. T., & Karl, D. M. (2018). Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLOS ONE*, 13(8).
- Rueda, J. (2010). Estudio de la hidrodinámica y sus mecanismos forzadores en la Bahía de Cartagena. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Sánchez Morales, O. J. (2018). *Estudio de factibilidad para la creación de una microempresa productora y comercializadora de manualidades con vasos de plástico, desechados en la Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas de la Universidad Técnica del Norte* (Bachelor's thesis).
- Schmidt, C., Krauth, T., & Wagner, S. (2017). Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12246-12253. doi: 10.1021/acs.est.7b02368
- Sierra-Labastidas, T., Salgado, H. L., & Turizo, C. E. T. (2014). Evaluación de la susceptibilidad a la desertificación en el municipio de Cartagena, Colombia. *RIAA*, 5(1), 185-195.
- Smith, J., Johnson, L., & Thompson, R. (2015). Investigating the impact of microplastics on the health of marine organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1-2), 1-8. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.12.041
- Thompson, R., Olsen, Y., Mitchell, R., Davis, A., Rowland, S., John, A., & McGonigle, D. y. (2004). ¿ Lost at sea: where is all the plastic ? *science*, 304(5672), 838.
- Torres Marchena, C. (2015). *Aplicación del modelo numérico Mohid para el estudio hidrodinámico y de transporte de la Ciénaga Mallorquín* (Doctoral dissertation).
- Tosic M. (2017). La Bahía de Cartagena: Un destino final de la contaminación en Colombia. In: Restrepo JD (ed) *Arrastrando la Montaña hacia el Mar*. Editorial Agenda del Mar Comunicaciones, Medellín, Colombia, 56-65.
- Urbano Rosas, J. (1992). Estado actual de la Bahía de Cartagena v/s contaminación.
- Vernette, G., Buitrago, J., Campos, N., & Llano, M. (1977). Variaciones Morfológicas de las Costas de la Bahía de Cartagena a partir del siglo XVI. *Boletín Científico CIOH*, (1), 21-40.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Sci. Technol.*, 51(12):6634-6647.

Zamora-Bornachera, A.P.; D. Vivas-Avenidaño; O. Garcés; P.C. Sierra-Correa. (2021). Basuras marinas: opciones de política y recomendaciones para abordar la problemática en Colombia. PNUMA-INVEMAR., 117, 10-13.