



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**CAMBIOS HIDRODINÁMICOS BAJO ESCENARIOS  
DE OLEAJE Y PRESENCIA DE OBRAS COSTERAS,  
SECTOR RÍO HOBO – PUERTO REY. CARIBE  
COLOMBIANO**

Autor:

Juan David Ruiz Parody

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Turbo, Colombia

Año 2020



Cambios hidrodinámicos bajo escenarios de oleaje y presencia de obras costeras,  
sector río Hobo – puerto Rey. Caribe Colombiano

Juan David Ruiz Parody

Trabajo de grado  
como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Oceanográfico

Asesor: Vladimir G. Toro  
Ph.D. Oceanografía Física; Profesor Universidad de Antioquia, Sede Ciencias del  
Mar

Co- Asesor: Nelson E. Murillo Gómez  
Magister Oceanografía Física. Ministerio del Medio Ambiente.

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Turbo, Colombia  
2020

# Contenido

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN .....  | 1  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| 2. OBJETIVOS.....  | 4  |
| 2.1. Objetivo General .....                                    | 4  |
| 2.2. Objetivos específicos: .....                              | 4  |
| 3. MARCO TEORICO .....   | 5  |
| 3.1. Fuentes de sedimento.....                                 | 5  |
| 3.2. Diámetros característicos de una muestra .....            | 6  |
| 3.3. Oleaje.....   | 6  |
| 3.4. Obras de protección costeras.....                         | 7  |
| 3.4.1 Tipos de obras costeras.....                             | 7  |
| 3.4.1.1. Obras blandas .....                                   | 7  |
| 3.4.1.2. Obras duras.....                                      | 8  |
| 3.5. Modelo Delf3D.....  | 9  |
| 3.5.1. Hidrodinámica .....                                     | 9  |
| 3.5.2. Oleaje .....  | 10 |
| 3.5.3. Sedimentos no cohesivos.....                            | 11 |
| 4. METODOLOGÍA.....  | 12 |
| 4.1. Descripción del área de estudio .....                     | 12 |
| 4.2. Características y fuentes de sedimentos.....              | 13 |
| 4.3. Parámetros integrales del oleaje .....                    | 14 |
| 4.4. Análisis de los casos .....                               | 15 |
| 4.5. Modelo numérico Delft 3D .....                            | 16 |
| 4.5.1. Mallas de cálculo .....                                 | 16 |
| 4.5.2. Datos de batimetría. ....                               | 17 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....                               | 19 |
| 5.1. Caracterización de los sedimentos .....                   | 19 |
| 5.2. Fuentes de sedimentos .....                               | 20 |
| 5.3. Escenarios de modelación .....                            | 23 |
| 5.3.1 Escenario sin obra, y oleaje proveniente del norte. .... | 24 |

|  |    |
|--|----|
| 5.4.2. Escenario con obra y oleaje proveniente del norte ..... | 29 |
| 5.4.3. Escenario sin obra con oleaje proveniente del NW .....  | 33 |
| 6. CONCLUSIONES .....  | 38 |
| 7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....                      | 39 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA .....  | 40 |
| 9. ANEXOS .....  | 45 |

## **AGRADECIMIENTOS**

**Primero darle las gracias a mi familia; mis hermanos, mi sobrina, mi abuela y en especial a mi mamá, quien siempre se ha esforzado por garantizar el estudio de sus hijos. Sin el apoyo de ellos no hubiese sido posible este logro.**

**A la universidad de Antioquia, que permitió mi formación en esta gran escuela, la cual siempre llevaré en mi corazón**

**Agradecerle enormemente al profesor Vladimir Toro, quien fue mi asesor de tesis y siempre fue un apoyo incondicional para culminar este reto**

**Al ingeniero Oceanográfico José Calderón, por dedicar mucho de su tiempo en asesorías, siempre con mucha voluntad y paciencia**

**A la oceanógrafa Geraldine Moreno, por su gran apoyo y asesorías; y con muchísima disposición, ¡Muchas gracias!**

**A todos los profesos que de manera directa o indirecta influyeron en mi formación, y con quienes pude compartir momentos amistad, juegos y lograr llevar el aprendizaje más allá de las instalaciones de la universidad, en especial a los profesores Lennin Flores, Alfredo Jaramillo, Catalina Valencia, Dina Vanessa Gomez y Rossalyn Hoyos. Gracias, por tanto.**

**A directivos y personal del aseo, con quienes también pude compartir muchos momentos**

**Y POR ULTIMO, PERO NO MENOS IMPORTANTE, A TODOS MIS COMPAÑEROS QUE HICIERON PARTE EN ESTE PROCESO DE TANTOS AÑOS. CON QUIENES PUDE COMPARTIR MARAVILLOSOS MOMENTOS, Y OTRO NO TAN BUENOS, PERO QUE SIEMPRE NOS MARCARON PARA LOGRAR SER MEJORES PERSONAS Y VERNOS SIEMPRE COMO GRANDES COLEGAS Y AMIGOS, Y NO, COMO COMPETENCIA.**

## LISTA DE FIGURAS.

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Tipos de transporte en los sedimentos fluviales. fluviales (R. del Moral, 1978).....  | 5  |
| <b>Figura 2.</b> Área de estudio. Localización de los corregimientos de Puerto Rey (Los Córdobas) y Minuto de Dios y Río Hobo (Arboletes). Fuente propia.....  | 12 |
| <b>Figura 3.</b> Mallas de modelación de oleaje a escala regional. Tomado de Componente de Modelación Numérica del oleaje, Proyecto Erosión Costera. ....  | 14 |
| <b>Figura 4.</b> Localización de la Boya virtual para un punto denominado Volcán de Lodos. Punto localizado en aguas intermedias para la zona de aproximación al punto final para el diseño de obras. Tomado de Componente de Modelación Numérica del oleaje, Proyecto Erosión.....            | 15 |
| <b>Figura 5.</b> Mallas de cálculo. a) Mallas anidadas de oleaje; b) Malla de flujo. ....  | 17 |
| <b>Figura 6.</b> Información batimétrica de proyectos locales y cartas náuticas. ....  | 18 |
| <b>Figura 7.</b> Batimetría interpolada utilizando la herramienta Triangular Interpolation. ....   | 18 |
| <b>Figura 8.</b> Área de estudio y sus principales fuentes de sedimentos. ....   | 20 |
| <b>Figura 9.</b> Desembocadura río Hobo. a) época seca; b) época de lluvias... ..  | 21 |
| <b>Figura 10.</b> Características del oleaje. a) Rosa de oleaje para la boya virtual asociada a Volcán de Lodos, b) Probabilidad conjunta $H_s - T_p$ , para la boya virtual Volcán de Lodos (VLD). ....   | 22 |
| <b>Figura 11.</b> Campos instantáneos (2018, marzo, 22, 00) para la zona de estudio caso 1: a) Altura significativa del oleaje (m). b) Dirección media del oleaje. ....  | 24 |
| <b>Figura 12.</b> Campos instantáneos (2018, marzo, 22, 00) para la zona de estudio caso 1: a) magnitud de la corriente (m/s). b) Dirección de la corriente. ....  | 25 |
| <b>Figura 13.</b> Campos de dirección promediada de la corriente para la zona de estudio caso 1: a) Zona de puerto Rey; b) zona al sur de puerto Rey; c) sector volcán de Lodo y serie obras; d) zona de río Hobo. ....  | 26 |
| <b>Figura 14.</b> Transporte total de sedimentos para: a) 15 de marzo a las 13 horas. b) 22 de marzo a las 00 horas; c) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de puerto Rey. d) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de Río Hobo..... | 27 |
| <b>Figura 15.</b> Campos de acreción/erosión para el caso 1, luego de: a) 10 horas de modelación, b) última hora de modelación (2018, 22, 02, 00).....   | 28 |
| <b>Figura 16.</b> Campos instantáneos (2018, marzo, 22) para la zona de estudio caso 2: a) Altura significativa del oleaje (m). b) Dirección del oleaje. ....  | 29 |
| <b>Figura 17.</b> Campos instantáneos (2018, marzo, días entre 15 - 22) para la zona de estudio caso 2: a) magnitud de la corriente (m/s). b) Dirección de la corriente. ....  | 30 |
| <b>Figura 18.</b> Campos de dirección promediada de la corriente para la zona de estudio caso 2: a) Zona de puerto Rey; b) zona al sur de puerto Rey; c) sector volcán de Lodo y serie obras; d) zona de río Hobo. ....  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 19.</b> Transporte total de sedimentos (magnitud y dirección). a) Magnitud del transporte total de sedimentos para el último día de modelación (2018, marzo, 22,00); b) dirección del transporte total de sedimentos para el último día de modelación (2018, marzo, 22,00), zona río Hobo. .... | 32 |
| <b>Figura 20.</b> Campos de acreción/erosión para el caso 2, luego de: a) 10 horas de modelación, b) última hora de modelación (2018, 22, 02, 00). ....   | 33 |
| <b>Figura 21.</b> Campos instantáneos (Año, mes, día, hora) para la zona de estudio caso 3: a) Altura significativa del oleaje (m). b) Dirección del oleaje. ....   | 34 |
| <b>Figura 22.</b> Magnitud promedio del corriente integradas en profundidad para la zona de estudio caso 3: a) magnitud promedio de la corriente (m/s). b) Dirección promedio de la corriente. ....   | 34 |
| <b>Figura 23.</b> Dirección promedio de la corriente para la zona de estudio caso 3: a) Zona de puerto Rey; b) zona al sur de puerto Rey; c) sector volcán de Lodo y serie obras; d) zona de río Hobo. ....   | 35 |
| <b>Figura 24.</b> Transporte total de sedimentos para: a) 15 de marzo a las 13 horas. b) 22 de marzo a las 00 horas; c) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de puerto Rey. d) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de Río Hobo. ....           | 36 |
| <b>Figura 25.</b> Campos de acreción/erosión para el caso 4, luego de: a) 10 horas de modelación, b) la última hora de modelación (2018, marzo, 22, 00). ....   | 37 |

## LISTA DE TABLAS.

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Clasificación de tamaño de los sedimentos. Tomado y modificado de <a href="https://post.geoxnet.com/escala-granulometrica-de-udden-wentworth/">https://post.geoxnet.com/escala-granulometrica-de-udden-wentworth/</a> . ..... | 5  |
| <b>Tabla 2.</b> Valores D50 para la zona de volcán de lodo y Río Hobo.....  | 13 |
| <b>Tabla 3.</b> Especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones con el modelo WWIII. Tomado del subcomponente de Modelación Numérica, Proyecto Erosión Costera. ....                                | 15 |
| <b>Tabla 4.</b> Características de los sedimentos de las muestras tomadas en volcán de Lodo. ....   | 19 |
| <b>Tabla 5.</b> Características de los sedimentos de las muestras tomadas en río Hobo. ....   | 19 |
| <b>Tabla 6.</b> Parámetros de entrada comunes a los escenarios modelados.....   | 23 |
| <b>Tabla 7.</b> Casos a modelar en el sector puerto Rey – río Hobo, .....   | 23 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| <b>Anexo A.</b> Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 10.....  | 45 |
| <b>Anexo B.</b> Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 20.....  | 46 |
| <b>Anexo C.</b> Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 30.....  | 47 |
| <b>Anexo D.</b> Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 40.....  | 48 |
| <b>Anexo E.</b> Principales características de las corrientes superficiales en cada sitio de estudio: direcciones predominantes (con porcentaje de ocurrencia), velocidad media y velocidad máxima. Tomado y modificado de Subcomponente de circulación Oceánica. .... | 49 |

## RESUMEN

Uno de los principales problemas que modifican las líneas costeras es la erosión producido por fenómenos naturales y antrópicos. Entre los naturales se encuentran las olas y corrientes. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante siete días de modelación de hidrodinámica y transporte de sedimentos, mediante el uso el modelo Delft 3D. Para llevar a cabo la modelación se usó 3 mallas; 2 de ellas anidadas para la simulación de oleaje (Malla grande y mala fina) y la misma malla fina, para los procesos de hidrodinámicos y de transporte de sedimentos.

Para lograr la modelación, se requirió los resultados hallados por las diferentes componentes del Proyecto de Erosión Costera (Componente de Geología, y Subcomponente de modelación del oleaje), estos resultados son algunos de los parámetros de entrada que requiere el modelo numérico, tales como: dirección predominante del oleaje, altura de ola significativa ( $H_s$ ) y su período pico asociado ( $T_p$ ) y parámetro  $D_{50}$ . Gracias a la información adquirida por el subcomponente de Geología, también se logró realizar un mapa con las principales fuentes de sedimentos de la zona de estudio, en total se hallaron tres ríos principales y 9 ríos de menor caudal, conocidos como quebradas.

En cuanto al oleaje, se realizó la simulación con una altura significativa de 1.2 metros y un período pico asociado de 8.5 segundos. Estas dos características del oleaje, se combinaron con dos direcciones; una predominante proveniente del NW y otra menos predominante en dirección N. Estos escenarios fueron combinados con la presencia y ausencia de una obra de protección costera, la cual simula una antigua espiga que existía en el sitio, y que ahora está erosionada por completo.

Se encontró que con un oleaje proveniente del NW se hallan las alturas más altas del oleaje, y su vez, las corrientes promediadas en profundidad y el transporte de sedimentos. Por otro lado, el escenario con la presencia de la obra de construcción costera, se tuvieron los valores más bajos para todas las direcciones establecidas en cuanto corrientes como en transporte total de sedimentos.

Cabe resaltar que este trabajo hace parte del Proyecto de Erosión Costera, el cual hizo posible la recopilación de los datos y la ejecución del mismo.

**Palabras claves:** Deriva litoral, transporte de sedimentos, obras de protección costera.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que modifican las líneas costeras es la erosión producido por fenómenos naturales y antrópicos. La erosión afecta tanto el desarrollo socioeconómico como el ambiental de las poblaciones y ecosistemas asentadas/os cerca de la línea costera (Crowell *et al.*, 1999; Merlotto y Bértola, 2007; Del Río y Gracia, 2009). Estudios realizados a nivel global sugieren que, entre 1984 y 2015, la pérdida neta de área por erosión costera fue aproximadamente 14,000 km<sup>2</sup>, siendo está superficie asociada tanto a asentamientos humanos como a ecosistemas costeros (Mentaschi *et al.*, 2018).

En Colombia, las unidades geomorfológicas costeras (playas y acantilados) del Caribe, del Pacífico y de las zonas insulares, han estado sujetas a constante erosión (Posada y Henao, 2008; Posada *et al.*, 2009; Posada *et al.*, 2011). De manera particular en el Caribe colombiano, se ha realizado la cuantificación de los niveles de erosión costera, usando el Coastal Hazard Wheel (CHW) (Stronkhorst *et al.*, 2018). El CHW es un sistema costero de clasificación y apoyo a la toma de decisiones el cual integra parámetros tales como: caracterización geológica, energía del oleaje, rango de mareas, asentamientos de flora/fauna, balance de sedimentos y clima de tormentas. Este estudio encontró que el 47% de toda la línea de costera presenta niveles de altos a muy altos de riesgo debido a la erosión, atribuido en particular a la disminución de las fuentes de sedimentos. Además, sugiere, que, aunque se han construido obras de protección costera con el fin de minimizar el impacto de la erosión, estas no han cumplido con dicho propósito y, por el contrario, han intensificado la problemática. La falta de estudios integrales de la dinámica sedimentaria y la presencia de algunas obras no adecuadas son posibles causa de ello.

Estos problemas erosivos son más evidentes en costas como las de Barranquilla, donde los espolones (tajamares) construidos en bocas de Ceniza en el año 1936 alteraron de manera importante el transporte de los sedimentos, disponiéndolos en aguas profundas y no al alcance de la circulación litoral, generando un importante déficit de sedimentos (Hermelín, 2005). A lo largo de 100 km de costa entre Barranquilla y Cartagena se han evidenciado fuertes problemas de erosión en los últimos años. En esta zona, la desaparición de la península de Galerazamba, se generó debido a una fuerte actividad de diapirismo de Lodos en 1938 (Correa *et al.*, 2005)

Otra zona del Caribe colombiano que se encuentran en pleno desarrollo, es la zona norte del departamento de Antioquia. Este lugar ha sido afectado por la erosión costera, de manera particular la línea de costa localizada entre el corregimiento de Río Hobo (municipio de Arboletes) y Puerto Rey (municipio de los Córdoba). Cabe nota que los corregimientos Minuto de Dios (municipio de Arboletes) y Puerto Rey están uno al lado del otro y su división es solo administrativa. Correa y Vernet

(2004) estudiaron sobre la línea costera antioqueña los impactos de las obras de protección costera y las posibles causas naturales y/o antrópicas de la erosión. Estos autores determinaron que, de 145 km de la longitud de línea de costa analizados, 130 km presentaron problemas de erosión, y que entre ellos los sitios más afectados son los corregimientos de Minuto de Dios-Puerto Rey. Los autores sugieren que las posibles causas de erosión en este sector, se pueden atribuir a intervenciones antrópicas (extracción intensiva de arena, diseños poco adecuados de las obras de protección costera y modificaciones de cauces de ríos), y causas naturales (aumento del nivel del mar, oleajes energéticos, altos índices de infiltración y escorrentía cerca de la línea de costa, suelos y terrazas litorales débiles con composiciones de arenas finas y arcillas).

De acuerdo con Correa *et al.* (2005), la espiga que existía en los años 50 en el sector de puerto Rey, permitía una protección natural contra la acción directa del oleaje en gran parte del litoral del municipio de Arboletes. Estos autores sugieren que su desaparición aceleró los procesos erosivos en el municipio de Arboletes ocasionado problemas ambientales debido a la notable pérdida de terreno donde estaban asentados ecosistemas costeros y problemas económicos/sociales por la pérdida de las playas y posiblemente del volcán de Lodo, su principal atractivo turístico.

Uno de los aspectos que ha acelerado los procesos es el nivel medio del mar (NMM). En el Caribe colombiano el aumento del NMM en la zona norte de Antioquia, ha mostrado ser uno de los causantes en la erosión costera (INVEMAR, 2003; Correa y Lorduy, 2008; Vernet *et al.*, 2012; Murillo y Londoño, 2018). Paniagua (2013) estudió la migración histórica de la línea de costa y realizó una predicción de la ubicación de la misma considerando el aumento del NMM. Para esto se utilizó como referencia la imagen de satélite del sector Puerto Rey del año 2009 y realizó predicciones para el sector de Puerto Rey-Minuto de Dios (año 2054), para Arboletes y el Tié (año 2059). Los resultados sugieren un retroceso en la línea de costa en Puerto Rey de 350m (2054), de 122m en Arboletes y 286m en El Tié (2059).

Hoyos *et al.* (2006) realizaron un análisis de la variación de la línea de costa en el departamento de Córdoba y norte del departamento de Antioquia, cuantificando la magnitud de los procesos erosivos entre los años 1938 y 2004. Obtuvieron que el área total perdida fue de 298 hectáreas, con un máximo retroceso de 972 m en el sector de puerto Rey. Correa *et al.* (2007) en el período 1938-2005 analizaron la erosión litoral entre Arboletes y Punta San Bernardo. Los retrocesos fueron atribuidos a ascensos relativos del NMM, configuración del terreno como terrazas y acantilados y la fuerte disminución en las fuentes de arena debido a las intervenciones antrópicas principalmente minería. Estos autores calcularon valores medios de retrocesos de líneas de costa entre 30 y 100 m con tasas promedio entre 0.5 y 1.5 m/año. Además, encontraron que la zona más crítica en toda el área de

estudio correspondió al tramo puerto Rey y punta Brava con una pérdida total de 1,6 km de línea costera y una tasa de erosión calculada entre 40 m/año y 70 m/año.

Los problemas erosivos del Caribe colombiano no solo son atribuidos a causas naturales, sino también a fuertes intervenciones antrópicas. Es así como Rangel (2009) sugiere una fuerte contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa caribe colombiana. En su estudio, este autor tuvo en cuenta los sectores como puerto Rey, Paso Nuevo, La Rada, El Rodadero, Riohacha, Manaure y San Andrés Islas. En el caso particular de puerto Rey, este autor sugiere que una intervención antrópica en el año 1954 dio paso para la desaparición de la barra de arena.

Rangel *et al.*, (2015) realizaron un estudio para el período 1980-2014 sobre la erosión a lo largo de la costa del Caribe Colombiano, evaluando las magnitudes y sus causas. Este estudio se hizo con base en fotografías aéreas, orto-fotografías e imágenes satelitales. Los resultados revelaron que, alrededor del 48% de la línea de costa en Colombia tiene fuertes procesos erosivos. De manera particular, estos autores obtuvieron en los sectores de puerto Rey y punta Brava, retrocesos de entre 90 y 220 m respectivamente.

Por último, Correa y Paniagua (2016) describen la evolución histórica de puerto Rey. Los autores proponen que los procesos que permitieron la pérdida de la península de Punta Rey y de alguno de los acantilados y playas del municipio de Arboletes son: el déficit de sedimentos arenosos hacia al sur de Arboletes, la intervención antrópica en los años 50 y las características geológicas, geomorfológicas y litológicas del sitio. Actualmente la erosión persiste en el lugar debido al aumento el NMM, el oleaje energético (principalmente en época de fin y principios de año), la construcción de obras de protección costera sin los estudios necesarios para su diseño y los asentamientos humanos y sus implicaciones en la parte alta del acantilado.

Con el fin de avanzar en el entendimiento del problema erosivo en el sector entre puerto Rey y río Hobo, se plantea este trabajo el cual se enfoca el estudio hidrodinámico de la zona. De manera particular se proponen escenarios probables de cambios en la dirección del oleaje y con/sin la presencia de obras costeras. Este trabajo se realizará por medio de la implementación de un modelo numérico hidrodinámico y de sedimentos, con el cual se espera determinar el impacto de las condiciones del oleaje en este sector.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Determinar los cambios hidrodinámicos producidos entre puerto Rey y río Hobo (Caribe Colombiano), bajo distintos escenarios de dirección del oleaje en presencia de obras costeras mediante el uso de un modelo numérico.

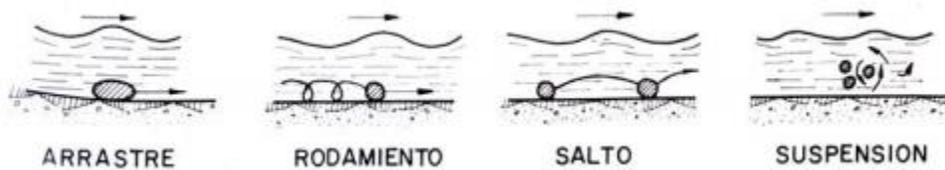
### **2.2. Objetivos específicos:**

- Establecer las fuentes principales y las características de los sedimentos de la zona de estudio.
- Determinar las principales características del oleaje en la zona de estudio.
- Analizar escenarios de modelación numérica en casos donde se combinen las características del oleaje en presencia de obras costeras.
- Determinar los cambios en los campos de oleaje y corrientes en la zona de estudio.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1. Fuentes de sedimento.

Los sedimentos son partículas que provienen de rocas o suelos y que son transportadas por los ríos o por el viento. Con el tiempo, estas logran depositarse en lagos, laguna, playas, entre otros (García, 1998). Los ríos y quebradas son las principales fuentes de sedimentos de las playas, debido a la gran cantidad de sedimentos que estos transportan (Ibarra *et al.*, 2019). La descarga de sedimentos de un río depende de las variaciones temporales de flujo y del tipo de suelos por el cual el río transcurre. Dependiendo del caudal del río, su flujo tiene la capacidad de mover partículas de tamaños, desde arcillas hasta gravas; el más fino se transporta por suspensión, mientras el de mayor tamaño por saltación, rodamiento o arrastre (figura 1) (Cabrera, 1975).



**Figura 1.** Tipos de transporte en los sedimentos fluviales. fluviales (R. del Moral, 1978).

Los sedimentos se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño (en mm). La Tabla 1 muestra la clasificación del tamaño de los sedimentos propuesto por Wentworth (1922) y modificado por BGS

**Tabla 1.** Clasificación de tamaño de los sedimentos. Tomado y modificado de <https://post.geoxnet.com/escala-granulometrica-de-udden-wentworth/>.

| Tamaño del clasto o cristal en mm | Clastos sedimentarios |                                  | Rocas cristalinas, sedimentarias o metamórficas |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---|
| 256                               | Bloques               | <b>G<br/>R<br/>A<br/>V<br/>A</b> | Grano muy grueso                                |
| 64                                | Grava                 |                                  |   |
| 16                                | Guijarro              |                                  | Grano grueso                                    |

|       |                  |                                  |                  |
|-------|------------------|----------------------------------|------------------|
| 4     | Granos           |                                  |                  |
| 2     | Arena muy gruesa | <b>A<br/>R<br/>E<br/>N<br/>A</b> | Grano medio      |
| 1     | Arena gruesa     |                                  |                  |
| 0.5   | Arena media      |                                  |                  |
| 0.25  | Arena fina       |                                  | Grano fino       |
| 0.125 | Arena muy fina   |                                  |                  |
| 0.032 | Limo             | <b>L<br/>O<br/>D<br/>O</b>       | Grano muy fino   |
| 0.004 | Arcilla          |                                  | Criptocristalino |

### 3.2. Diámetros característicos de una muestra

Una muestra de sedimentos puede tener un amplio tamaño de granos, por esto se hace necesario caracterizarla mediante valores característicos. Para ello se emplea los diámetros, que corresponden a los porcentajes (10, 50 y 90%) de material retenido en los tamices llamados  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$ . Para esto con los valores retenidos en los tamices se realiza la curva granulométrica por medio de la cual se obtienen los tamaños característicos mencionados. El valor  $D_{50}$  es uno de los más usados y representa 50% del material y constituye el tamaño de grano promedio (UUSACE, 2002).

### 3.3. Oleaje.

El oleaje es producido por la acción del viento sobre la superficie del mar. De manera general, un estado de mar (promedio estadístico en un período de tiempo determinado) se puede caracterizar mediante los parámetros integrales del oleaje. Estos parámetros son: Altura significativa del oleaje ( $H_s$ ), período asociado al pico espectral ( $T_p$ ) y dirección promedio ( $\theta$ ). Estos parámetros son el resultado de la integración de los espectros en frecuencia y dirección del oleaje.

Cuando el oleaje se acerca a la costa y llega a aguas someras, la parte inferior de la ola interactúa con la superficie del fondo del mar, la ola pierde velocidad y se frena, lo que provoca el proceso de rotura de la misma y una gran turbulencia. Este

fenómeno produce abrasión y levantamiento de las partículas, en un proceso de acción de fuerza tractiva de la ola sobre el fondo de la playa (Ferguson, 2001).

Cuando el oleaje se acerca a la línea de costa, puede producirse fenómenos con reflexión, refracción o difracción. En particular, la difracción se produce cuando el oleaje es interrumpido por un obstáculo que impide tránsito. Los obstáculos pueden ser naturales (Islas) o artificiales (Rompeolas) o salientes, muy comunes de zonas erosivas.

### **3.4. Obras de protección costeras.**

Las obras de protección costera son construcciones implementadas por el hombre para la defensa o estabilización costera. Estas obras de protección pueden diseñarse para proteger asentamientos humanos cerca de la costa, o para proteger la costa misma. Específicamente, las obras se pueden construir para: 1) prevenir la erosión de la línea de costa; 2) prevenir inundaciones en zonas costeras causadas por el incremento del nivel del mar; 3) proteger contra la energía del oleaje las entradas y los puertos mismos, generando zonas de calma; 4) proteger de sedimentación a canales de navegación en bocas estuarinas o lagunares y obras de ingeniería costera (USACE, 2002).

#### **3.4.1 Tipos de obras costeras**

Existen numerosos criterios para clasificar las obras de protección costera. En particular, aquí nos referiremos a las obras como blandas o duras.

##### **3.4.1.1. Obras blandas**

Estas se caracterizan por ser amigables con la naturaleza al aprovechar los recursos naturales existentes en el área a proteger o la forma misma de costa. Entre las más conocidas están:

- **Arrecifes artificiales:** Estos arrecifes permiten reducir la energía del oleaje y a su vez servir como hábitat natural de muchas especies.
- **Relleno de playas:** Consiste en aumentar el volumen de la playa con sedimentos de la misma región y que tengan diámetros similares a los de playa original. El volumen del material se puede depositar tanto en la parte sumergida de la playa, como en la emergida, con el fin de que el mismo oleaje se encargue de distribuirla.

- **Siembra de manglares:** La presencia de manglares cerca de la línea de costa permite la protección de esta. Sus raíces arqueadas ayudan a disipar la energía del oleaje y, al igual que los arrecifes de coral, sirven como hábitat natural de otras especies.

También existen otros tipos de obras blandas como: manejo de aguas lluvias y servidas en la parte alta de los acantilados, perfilamiento de taludes, protección y regeneración de dunas y plantación y estabilización de vegetación costera, entre otros.

#### 3.4.1.2. Obras duras.

Este tipo de obras se caracterizan por tener estructuras rígidas y que en general impiden el transporte de sedimentos. Son diseñadas para grandes períodos de retorno y generan grandes impactos al medio ambiente (tanto a favor como en contra). Entre estas se encuentran:

- **Espolones o espigones:** Son obras construidas de manera perpendicular a la línea de costa con el fin de retener los sedimentos que son transportados paralelos a la línea de costa. Son obras que se plantearon inicialmente, para sitios con un gran transporte de sedimentos. En general, acumula sedimentos a un lado de la obra y del otro lado genera erosión. Es la obra costera que más ha sido empleada (no solo en Colombia) para el control de la erosión (Suarez, 2001). Los espolones pueden generar tres tipos de impactos: un impacto físico, debido a la reducción de velocidad en uno de sus lados dependiendo de la dirección de la deriva litoral, lo que genera una acumulación de sedimentos en esta zona y erosión del lado contiguo; el segundo es un impacto ambiental, ya que debido a la poca circulación del agua se genera una zona de poca renovación del agua alterando la calidad y la productividad biológica; un impacto socioeconómico ya que no es suficiente un espolón, siempre son necesarios muchos (Sánchez y Jiménez, 1994).
- **Rompeolas o diques exentos:** Se caracterizan construirse manera paralela y a una cierta distancia de la línea de costa. Son construidas con rocas o con pentápodos. Tienen como objetivo disminuir la energía del oleaje antes de llegar a la línea de costa. Esta obra modifica las corrientes de tal manera que, si hay los suficientes sedimentos disponibles, se genera una playa perpendicular que se conecta con la playa, a esta configuración es llamada Tómbolo.

Otros tipos de obras duras son: gaviones y bolsacretos, geotubos (geotextiles), muros de contención, entre otros

### 3.5. Modelo Delf3D

Delft3D es un modelo numérico en 3D que es usado para estudiar la hidrodinámica costera, el transporte de sedimentos, la morfología y la calidad del agua en áreas fluviales, estuarinas y costeras. Este modelo se compone de varios módulos que pueden ser usados o no por el usuario.

El módulo FLOW, permite simular la hidrodinámica y el transporte multidimensional (2D o 3D), y calcular los flujos no estacionarios. El módulo MOR permite realizar el cálculo del transporte de sedimentos (tanto carga total, como suspendida) y los cambios morfológicos para sedimentos cohesivos y no cohesivos. Tanto las corrientes como el oleaje son forzadores del sistema y son utilizados para el transporte de sedimentos en una amplia variedad de fórmulas.

Con el fin de calcular la carga suspendida, este módulo se conecta con el módulo de advección-difusión de FLOW. Una característica esencial del módulo MOR es la retroalimentación dinámica con los módulos FLOW y WAVE, que permiten que los flujos y el oleaje se ajusten en cada paso de tiempo a la batimetría local que se modifica. En general, Delft 3D permite realizar simulaciones en cualquier escala de tiempo desde días (impacto de tormenta) hasta siglos (dinámica del sistema). A continuación, se describen las principales formulaciones usadas por el modelo.

#### 3.5.1. Hidrodinámica

El módulo FLOW, resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para aguas someras, utilizando la hipótesis de Boussinesq, para un dominio 3D con varias capas en vertical o promediado (2D) con una sola capa (Deltares, 2017). En nuestro caso, debido a que la zona de estudio es somera (profundidades menores a 5.5m) se utilizará información de las corrientes y transporte de sedimentos promediadas en la vertical (2D). La ecuación de flujo del modelo Delft3D, el cual se encarga de la parte hidrodinámica se describe como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + \zeta)v]}{\partial y} = Q \quad (1)$$

Donde  $\zeta$  es la superficie libre (en metros),  $d$  es la profundidad media (en metros),  $u$  es la componente zonal de la velocidad,  $v$  es la componente meridional de la velocidad y  $Q$  es el flujo en  $m^3/s$ . Esta ecuación se puede incorporar a la ecuación general de movimiento en dirección  $x$  definida como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0(d + \zeta)} + \nu_h \nabla^2 u \quad (2)$$

Donde  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m^2/s$ ),  $\rho_0$  es la densidad de referencia ( $Kg/m^3$ ),  $\zeta$  es la variación de la superficie libre con la profundidad,  $\tau_s$  es la tensión por viento ( $N/m^2$ ),  $\tau_b$  es la tensión en el fondo,  $\nu$  es la viscosidad ( $m^{-2}/s$ ).

De igual manera, se puede definir la ecuación (2) en dirección  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0(d + \zeta)} + \nu_h \nabla^2 v \quad (3)$$

### 3.5.2. Oleaje

Este módulo permite la simulación de la propagación del oleaje utilizando una descripción espectral. Para esto utiliza la descripción de la acción de onda  $N$  en función del tiempo, espacio y en el espectro:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

Donde:

$\frac{\partial N}{\partial t}$  Variación local

$\frac{\partial c_x N}{\partial x}$  Propagación espacial con velocidad  $c_x$

$\frac{\partial c_y N}{\partial y}$  Propagación espacial con velocidad  $c_y$

$\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}$  Variación de frecuencia del espectro debido a variaciones en la

profundidad y en las corrientes y  $C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt}$

$\frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta}$  Termino de refracción debido a variaciones en la profundidad.

$\frac{S}{\sigma}$  Termino fuente: generación, disipación interacciones no lineales onda - onda

### 3.5.3. Sedimentos no cohesivos.

Con el fin de calcular el transporte de sedimentos no cohesivos (arenas), su velocidad de sedimentación ( $W_{s,0}$ ) se calcula siguiendo el método de Van Rijn (1993). La formulación utilizada depende del diámetro del sedimento en suspensión.

$$w_{s,0} = \frac{(s-1)gD_s^2}{18\nu} \quad \text{si} \quad 65 \mu\text{m} < D_s \leq 100 \mu\text{m} \quad (5)$$

$$w_{s,0} = \frac{10\nu}{D_s} \left( \sqrt[18\nu]{1 + \frac{0.01(S-1)gD_s^3}{\nu^2}} - 1 \right) \quad \text{si} \quad 100 \mu\text{m} < D_s \leq 1000 \mu\text{m} \quad (6)$$

$$w_{s,0} = 1.1\sqrt{(s-1)gD_s} \quad \text{si} \quad D_s > 1000 \mu\text{m} \quad (7)$$

Donde:

$S$ : densidad relativa de la fracción de sedimento  $\frac{\rho_s}{\rho_w}$

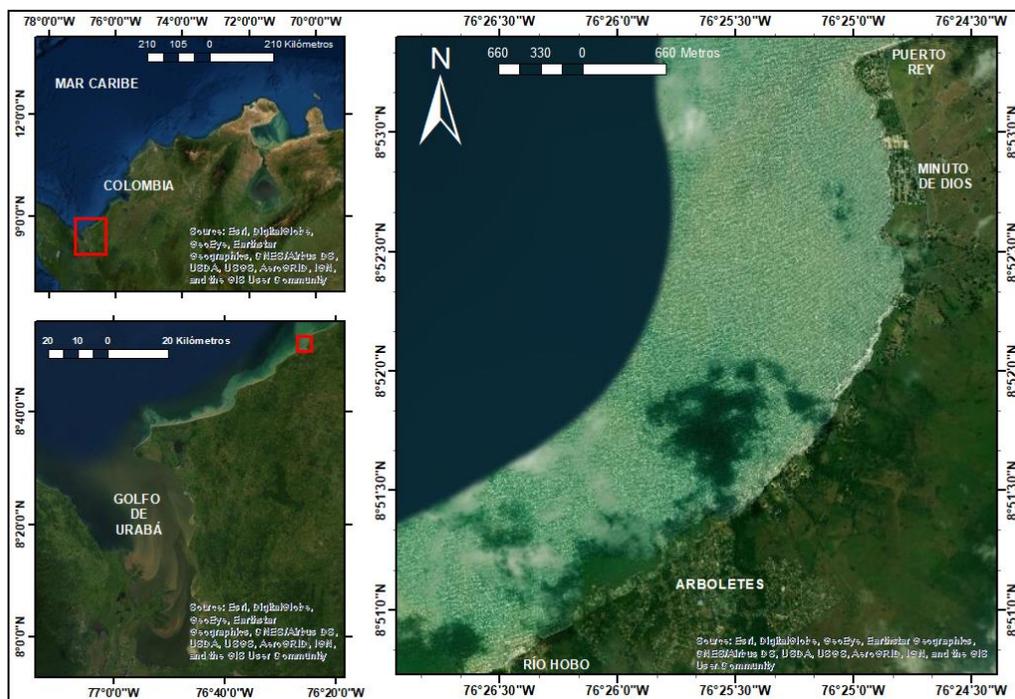
$D_s$ : diámetro representativo de la fracción de sedimento

$\nu$ : coeficiente de viscosidad cinemática del agua [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Descripción del área de estudio

Los corregimientos de Minuto de Dios y Puerto Rey están ubicado en los límites entre el municipio de Arboletes (departamento de Antioquia) y el municipio de Los Córdoba (Córdoba), respectivamente. El municipio de Arboletes limita al sur con los municipios de San Pedro de Urabá y Turbo, y al occidente con los municipios de San Juan de Urabá y Necoclí. De otro lado, el municipio de los Córdoba limita al norte con el municipio de Puerto Escondido, al sur con Canalete, al este con el municipio de Montería y al oeste con el municipio de Arboletes (figura 2). La línea de costa del corregimiento pertenece al litoral antioqueño y cordobés. En la zona, uno de los referentes geográficos/turísticos de mayor renombre es el volcán de Lodo de Arboletes. Un diapiro con una altura aproximada de 15 m por encima de la terraza marina y un diámetro aproximado de 200 m (COMUGRID, 2001; García, 2007).



**Figura 2.** Área de estudio. Localización de los corregimientos de Puerto Rey (Los Córdoba) y Minuto de Dios y Río Hobo (Arboletes). Fuente propia.

La zona de estudio presenta dos épocas climáticas: la temporada seca con fuertes vientos llamados Alisios, provenientes del noreste del mar Caribe y la temporada húmeda con vientos del suroeste. Esta variación en la dirección de los vientos es característica de la migración anual y latitudinal de la zona de convergencia

intertropical (ZCIT) (Poveda, 2004). La temporada seca empieza a finales de diciembre y va hasta principios de abril, donde el viento tiene velocidades promedias de 8 m/s y precipitaciones cercanas a 40 mm/mes. La temporada húmeda, se desarrolla entre los meses de mayo y noviembre, y allí se registran velocidades medias promedio de 3 m/s, y precipitaciones de hasta los 100 mm/mes (Thomas *et al.*, 2007). En cuanto a las mareas, el mar Caribe, en general, tiene un régimen de marea del tipo semiduro mixto, dos mareas altas y dos bajas diurnas (Molina et al., 1992; Higuita y Quintana, 2020).

Con el fin de desarrollar de manera adecuada cada uno de los objetivos específicos planteados, a continuación, se presenta la metodología planteada.

#### 4.2. Características y fuentes de sedimentos

Con el fin de realizar el primer objetivo específico, se obtuvieron las características de los sedimentos de la zona de estudio, a partir de los resultados alcanzados de la componente de Geología del proyecto de Erosión Costera en el cual se tomaron muestras de dos campañas de mediciones realizadas del 19 de octubre al 9 de noviembre de 2018 (Componente Geología, 2018). Las muestras fueron tomadas en los sitios volcán de lodo y río Hobo. En la zona de volcán de lodo se tomaron cerca al escarpe del volcán, la zona de swash, en la isobata de 1,5 m y la isobata de 7 m. En río Hobo se tomaron muestras en la barra de arena que se forma cuando el río no cuenta con el suficiente caudal para desembocar el mar (figura 2).

Las muestras fueron procesadas y por medio de un tamizando y análisis granulométrico y estadístico (programa GRADISTAT ®), se obtuvieron los diámetros característicos D10, D50 y D90 (Tabla 2). Cabe notar que el valor D50 es un parámetro de entrada requerido para llevar a cabo la modelación numérica. Como se tiene muy pocos valores d50 para poder realizar un mapa de sedimentos de la zona (lo cual es posible dentro de las opciones de la interfaz del modelo), se decidió promediar los valores más altos del d50 de Arboletes y río Hobo.

**Tabla 2.** Valores D50 para la zona de volcán de lodo y Río Hobo.

|                 | ARBOLETES     |               |             | Río Hobo       |                                 |
|-----------------|---------------|---------------|-------------|----------------|---------------------------------|
|                 | Zona de Swash | Isobata 1.5 m | Isobata 5 m | Barra de arena | Base del acantilado del caserío |
| <b>D10 (µm)</b> | 98.39         | 64.38         | Nan         | 283.1          | 83.55                           |
| <b>D50 (µm)</b> | 138.0         | 75.89         | Nan         | 450.2          | 311.1                           |
| <b>D90 (µm)</b> | 295.6         | 89.45         | Nan         | 889.1          | 1110.0                          |

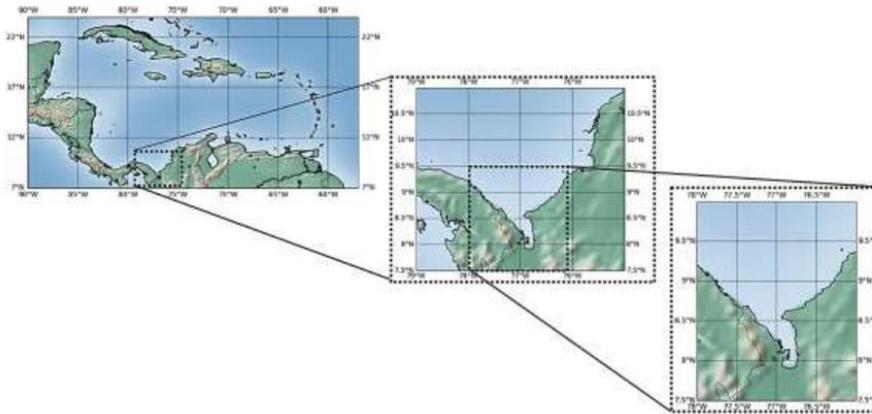
Con el fin de identificar de una manera adecuada las principales fuentes de sedimentos, se utilizó información de sobrevuelos con un Dron e imágenes

satelitales de acceso libre. Las imágenes tomadas por Drones fueron medidas en el marco del proyecto de Erosión Costera (Componente de geología, 2018).

Esta información fue combinada y se obtuvo un mapa en el cual se ubicaron los principales ríos y quebradas de la región, los cuales podrían ser la fuente potencial de sedimentos. De la misma manera se ubicaron las zonas de acantilados, susceptibles a ser erosionada y las cuales podrían aportar sedimento a la dinámica litoral.

### 4.3. Parámetros integrales del oleaje

En el segundo objetivo específico, se obtuvieron las principales características del oleaje en la zona. Con este fin se utilizaron los principales resultados de la componente de modelación del oleaje del proyecto de Erosión Costera (Subcomponente de modelación de oleaje, 2018). Esta componente calibró/validó el modelo WAVEWATCH III (WW III) para el período 1997 a 2017 en el área del Caribe Colombiano. Este modelo utilizó información batimétrica *in situ* medida en el marco del proyecto, en zonas cercanas a la zona de estudio información de las cartas náuticas 412 y 043 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y en la zona lejana del Caribe la base de datos ETOPO1 (Amante *et al.*, 2016).



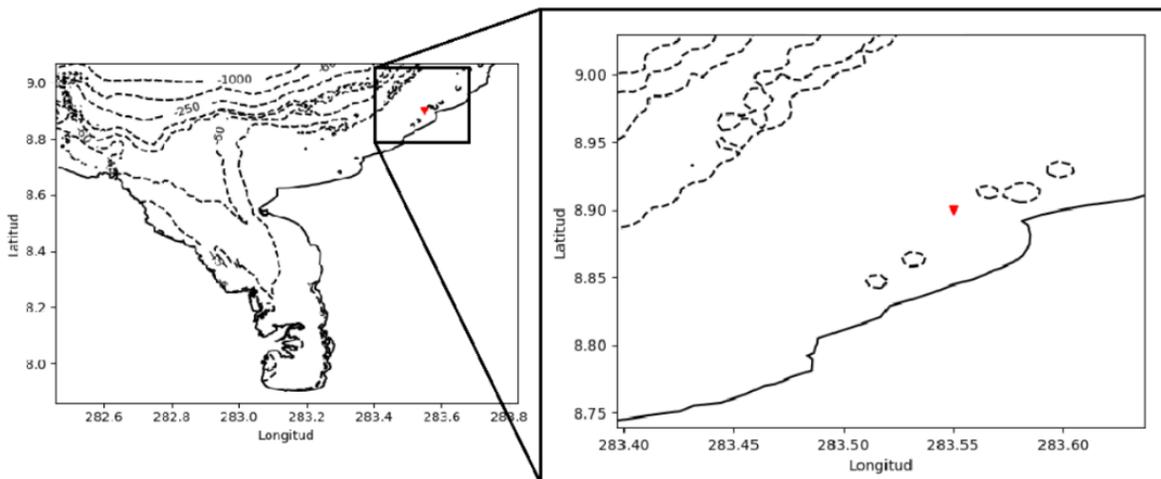
**Figura 3.** Mallas de modelación de oleaje a escala regional. Tomado de Componente de Modelación Numérica del oleaje, Proyecto Erosión Costera.

En esta implementación fueron usadas mallas anidadas a través del módulo multigrad (Figura 3) hasta lograr las condiciones de frontera para la modelación en aguas someras, cuyas resoluciones espaciales son mostradas en la Tabla 3. Para la validación del modelo se usó información de boyas en aguas profundas de la NOAA y aguas someras de la Dirección Marítima Colombiana.

**Tabla 3.** Especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones con el modelo WWIII. Tomado del subcomponente de Modelación Numérica, Proyecto Erosión Costera.

| ID Malla | Latitud min - max | Longitud min - max | Resolución (grados) | Resolución (km) |
|----------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------------|
| Caribe   | 7° - 24°          | 270° - 303°        | 1/6                 | 18.5            |
| Colombia | 7.5° - 11°        | 281° - 285°        | 1/12                | 9.25            |
| Uraba    | 7.5° - 10°        | 282° - 284°        | 1/60                | 1.85            |

La información generada por el modelo WWIII, fue utilizada como condiciones de frontera para el cálculo de las condiciones del oleaje a escala local empleando el modelo SWAN. Con esta información se obtuvieron series de datos de parámetros integrales en una boya virtual cerca del área de estudio. El sitio donde fueron extraídos los parámetros mencionados está ubicado en la zona de arboletes y cerca de puerto Rey (Figura 4).



**Figura 4.** Localización de la Boya virtual para un punto denominado Volcán de Lodos. Punto localizado en aguas intermedias para la zona de aproximación al punto final para el diseño de obras. Tomado de Componente de Modelación Numérica del oleaje, Proyecto Erosión.

#### 4.4. Análisis de los casos

Con el fin de cumplir con el tercer objetivo, se utilizó los resultados del análisis de probabilidad conjunta del proyecto de Erosión Costera (Subcomponente de modelación de oleaje, 208) y los escenarios con y sin obra. Uno de los escenarios planteados es el de las condiciones actuales de la zona (sin obra) y el segundo caso donde se simuló la antigua espiga de Punta Rey. En este último caso, la obra

propuesta está conformada por un a espiga de roca que se extiende desde la línea de costa hasta 1.6km tratando de seguir la alineación de la espiga natural (con obra).

Estos dos casos se combinan con la información del oleaje y en particular con análisis conjunto entre la altura significativa del oleaje y el período asociado al pico espectral. Es necesario tener en cuenta que la otra variable importante en este análisis es la dirección del oleaje. Por lo tanto, con el fin de reducir los casos a modelar del análisis de probabilidad conjunta entre  $H_s$  y  $T_p$ , se escogió un valor de  $H_s$  (1.2 m) y su período pico asociado  $T_p$  (8.5 s). Y fueron combinados con dos direcciones de oleaje norte y noroeste. Las direcciones del oleaje, el valor  $H_s$  y  $T_p$  asociado a este, corresponden a los resultados hallados por el subcomponente de modelación de oleaje. En este trabajo, en total se modelaron tres casos por 7 días, correspondientes al 15 marzo del 2018 hasta el 22 de marzo.

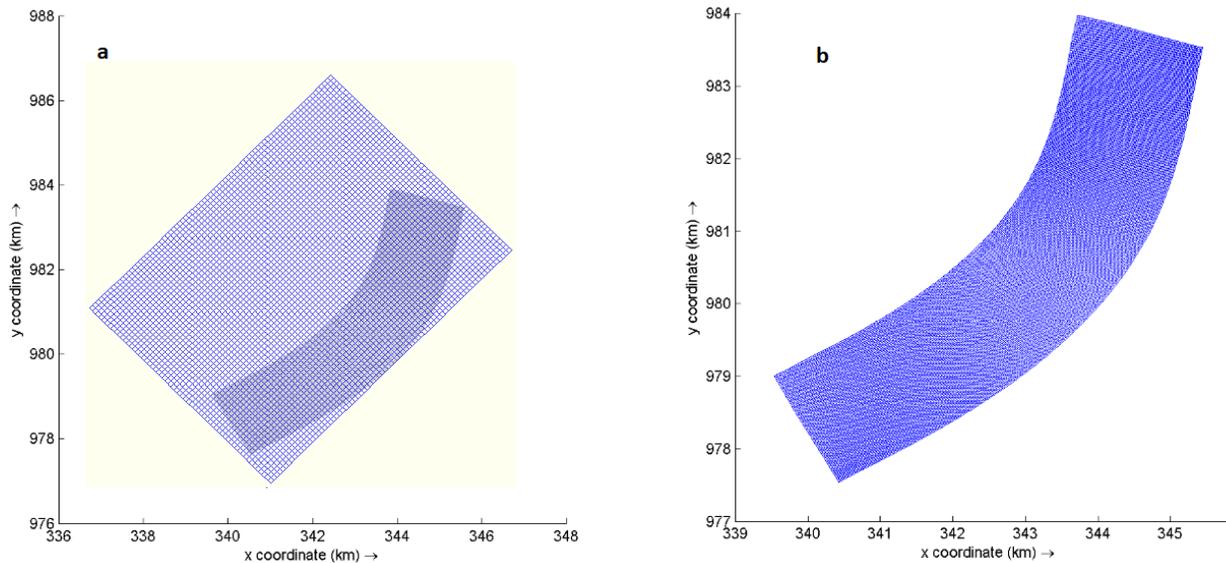
#### **4.5. Modelo numérico Delft 3D**

A continuación, se presentan los detalles del ejercicio numérico utilizando el modelo Delft 3D. Con esto se da cumpliendo al cuarto objetivo. La modelación se realizó utilizando Delft3D. Este modelo está compuesto por varios módulos agrupados en torno a una misma interfaz. Permite entre otras cosas realizar simulaciones hidrodinámicas y transporte de sedimentos en dos y tres dimensiones (Deltares, 2014). En este trabajo, debido a que los lugares de estudio son zonas relativamente someras solo se analizaron los resultados en dos dimensiones y, además, los módulos usados en esta modelación son: WAVE, donde se corre oleaje, y FLOW, donde se corre corriente y morfología.

##### **4.5.1. Mallas de cálculo**

Las mallas de cálculo fueron creadas con ayuda del módulo RGFGRID, del paquete de software Delft3D. RGFGRID permite el diseño y la generación de mallas curvilíneas estructuradas, por lo tanto, se generaron dos mallas de cálculo. Con el fin lograr una alineación similar a la línea de costa de Arboletes y evitar errores en el modelo se diseñó una malla rectangular con 80 celdas en dirección M (siguiendo la orientación de la línea de costa) y 60 celdas en dirección N (transversal a la línea de costa), obtenido una orientación de la malla de  $45^\circ$ . Cada celda tiene un tamaño aproximado de 100 metros, con lo cual se cubre un área aproximada de  $48\text{km}^2$ . La segunda es una malla curvilínea, cubre un área más pequeña y es mucho más fina. Esta malla tiene 243 celdas en dirección M y 81 celdas en dirección N, y el tamaño de las celdas es en promedio de 20 metros. Para correr los escenarios de oleaje,

se anido las dos mallas descritas anteriormente (figura 5a), y para los procesos de corriente y morfología, se usó la malla más fina (figura 5b).

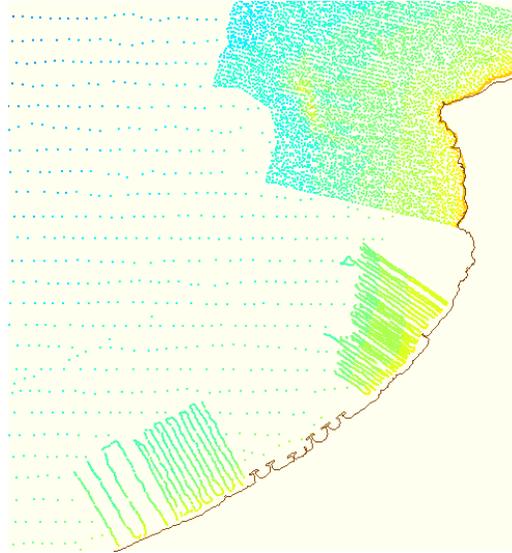


**Figura 5.** Mallas de cálculo. a) Mallas anidadas de oleaje; b) Malla de flujo.

Tanto la malla de oleaje como la malla de flujo luego son usadas por los módulos Delft3D-WAVE y Delft3D-FLOW y sus mallas correspondientes. A continuación, se muestra el procedimiento utilizado para la interpolación de los datos batimétricos.

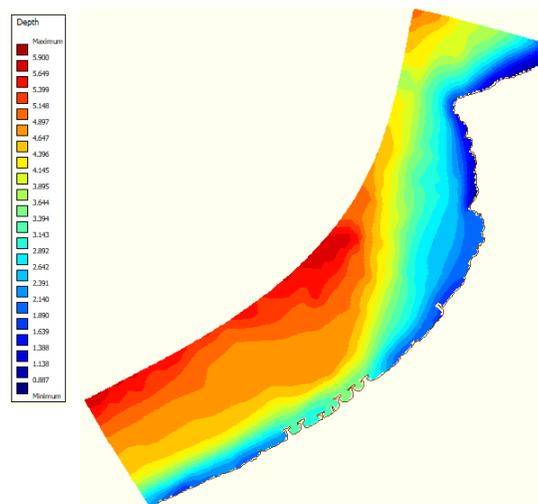
#### 4.5.2. Datos de batimetría.

Una vez listas las mallas de cálculo, se procede a realizar la interpolación de la información batimétrica con la que se cuenta. En total se utilizaron cuatro superficies batimétricas. Las dos primeras proporcionadas por la componente de Topo-batimetría del proyecto de Erosión Costera (Componente topo batimetría, 2018), correspondientes a las zonas de volcán de Lodos y río Hobo, medidas en el año 2019. La tercera batimetría corresponde a la carta náutica 411, elaborada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH); y la cuarta fue suministrada por el proyecto “Programa de monitoreo costero en las playas urbanas intervenidas con obras de protección costera y en el volcán de Lodos en el municipio de Arboletes, Antioquia” la cual comprende una zona de medición en la zona de Puerto Rey (Caicedo, 2016). Las batimetrías mencionadas anteriormente se procesaron mediante el software ArcGis® (Figura 6). Luego la información fue interpolada para obtener un campo batimétrico para la zona de estudio.



**Figura 6.** Información batimétrica de proyectos locales y cartas náuticas.

Por último, la interpolación de las batimetrías se hizo mediante el módulo de interpolación de datos, QUICKIN del paquete de software Delf3D. Se utilizaron las herramientas de interpolación comúnmente usada cuando, en general, hay una baja densidad de datos. En primer lugar, se utilizó *Triangular Interpolation*, mediante la cual se definió cuatro como el número mínimo de muestras para el promedio en cada una de las celdas de la cuadrícula. Con el fin de obtener datos batimétricos cercanos a la línea de costa, se usó la herramienta *Internal Diffusion* y una vez obtenidos todos los valores de profundidad se realizó un suavizado con la herramienta *Smoothing* con un factor de 0.5. De esta manera se obtuvieron los datos de profundidad en toda la zona de estudio (figura 7).



**Figura 7.** Batimetría interpolada utilizando la herramienta *Triangular Interpolation*.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de los análisis estadísticos y salidas del modelo numérico. Estos resultados se presentan de manera que se dan cumplimiento a los objetivos específicos.

### 5.1. Caracterización de los sedimentos

Fueron caracterizados los sedimentos del sitio volcán de Lodos y río Hobo, ubicados en el área de estudio. Para esto se realizó se calcularon los porcentajes de tipo de suelo en cada una de las muestras tomadas *in situ*.

De acuerdo con las Tabla 4 y 5, en general, el material de la zona corresponde a arenas muy finas a finas, con predominancia de las primeras. En el sitio de volcán de Lodos y en particular la zona de swash, se presentan los sedimentos de mayor tamaño (arenas finas), al ser una franja de mucha energía con la capacidad de mover este tipo de sedimentos. En la isobata de los 5 m, los sedimentos predominantes son Lodos, atribuidos a la salida de material del volcán. En el caso del río Hobo, las proporciones en los tamaños de los sedimentos de la base del acantilado y de la de la playa son similares. Vale la pena notar la presencia de arenas medias a gruesas, debido a la presencia de la desembocadura del río.

**Tabla 4.** Características de los sedimentos de las muestras tomadas en volcán de Lodo.

| <b>Volcán de Lodo</b> |  |
|-----------------------|--|
| <b>Zona de Swash</b>  | Arenas finas (48%)<br>Arenas muy finas (36%)<br>Arenas medias (11.1%)<br>Arenas gruesas (3,3%)                   |
| <b>Isobata 1.5 m</b>  | Arenas muy finas (87%)<br>Arenas finas (8%),<br>Limo grueso (3.9%)<br>Arena media (0.3%)<br>Arenas gruesa (0.2%) |
| <b>Isobata 5 m</b>    | Lodos (100%)   |

**Tabla 5.** Características de los sedimentos de las muestras tomadas en río Hobo.

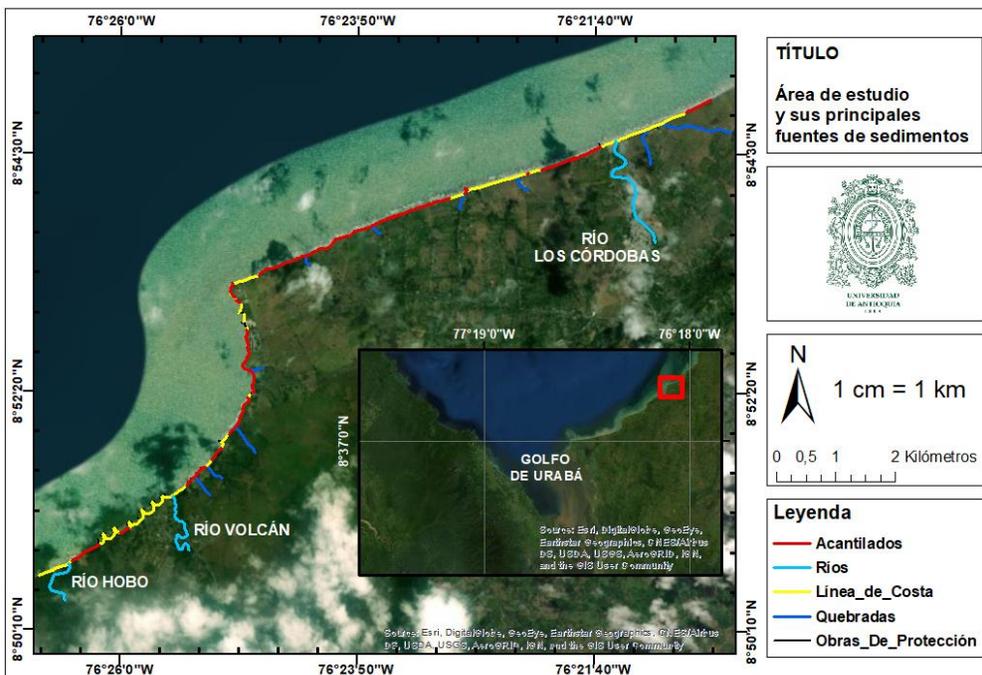
| <b>Río Hobo</b>       |   |
|-----------------------|---|
| <b>Playa río Hobo</b> | Arena media (71.5%)<br>Arena gruesa (21.9%)<br>Arena fina (21.9%) |

|  |   |
|--|---|
| <b>Base del<br/>acantilado del<br/>corregimiento</b> | Arena media (33.8%)<br>Arena gruesa (25.4%)<br>Arena fina (16.5%)<br>Arena muy fina (11.7%)<br>Limos muy gruesos (0.7%) |
|--|---|

Cabe notar que los análisis granulométricos de las dos zonas mencionadas se pueden consultar en el informe de la componente de Geología del proyecto de erosión costera (Componente de Geología, 2018). Los sedimentos de finos a muy finos son propensos a ser transportados en suspensión por la corriente de deriva que se genera cuando el oleaje incide sobre la playa de forma oblicua y rompe. Los sedimentos medios a gruesos son transportados por saltación y dependerán de la energía del oleaje. Las características del sedimento fueron usadas en la modelación numérica, donde se consideró que el tipo de sedimentos era no cohesivo, con un valor característico  $D_{50}$  de 0.29 mm.

## 5.2. Fuentes de sedimentos

Las imágenes satelitales y las tomadas con el Dron fueron procesadas en el programa ArcGis® versión 10.5. Con el fin de determinar las posibles fuentes de sedimentos alrededor de la zona de estudio (Puerto Rey a río Hobo) este análisis incluyó una zona mucho mayor hacia el norte (Figura 8).



**Figura 8.** Área de estudio y sus principales fuentes de sedimentos.

De acuerdo con la figura 8, se identificaron tres ríos importantes en la zona: río Hobo ubicado al sur de la zona de Arboletes, río Volcán situado en la zona urbana de Arboletes y el río Los Cordobas que se encuentra (al norte de la antigua espiga de Puerto Rey (departamento de Córdoba). De igual manera se identificaron nueve quebradas (arroyos), las cuales se supone tienen un bajo caudal, cuatro ubicadas al norte de la zona urbana de Arboletes y al sur de la antigua espiga de Puerto Rey, y seis ubicadas al norte de la antigua espiga (departamento de Córdoba). Se cree que estas quebradas, transportan el flujo de agua principalmente en la época de lluvias.

Se realizaron salidas de campo en el marco del proyecto de Erosión Costera donde se apoyó la componente de Geología. En las salidas realizadas en época seca se evidenció la desembocadura del río Hobo permaneció cerrada, al igual que demás quebradas y ríos de Arboletes. Esto luego se pudo verificar por medio del análisis de las fotos tomadas con el Dron. La desembocadura al mar de estos afluentes, es interrumpida por una alta acumulación de sedimentos que forman una barra de arenas (figura 9a). Esta barra desaparece en época de lluvias, ya que el caudal del río aumenta y logra atravesar la barra de arena (figura 9b).



**Figura 9.** Desembocadura río Hobo. a) época seca; b) época de lluvias...

De otro lado, teniendo en cuenta que el sedimento erosionado, podría ser transportado por la corriente y de esta manera ser fuente de sedimento, se calculó la extensión de los acantilados de la zona ampliada. En general, los acantilados tienen una longitud aproximada de 9.5 km, de los cuales 3.8 km se encuentra entre Río Hobo y punta Rey.

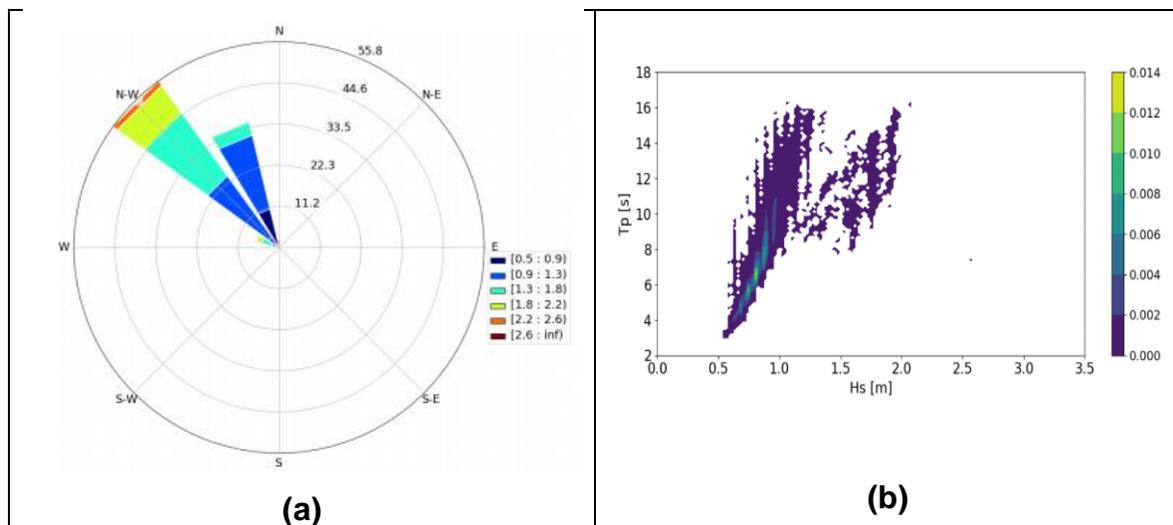
En general, los aportes sedimentarios varían según la época climática, esta condición tiene implicaciones en el transporte de sedimentos, pues la cantidad de sedimentos que puede estar al alcance de la deriva litoral por la desembocadura de los ríos es diferente. Estas características, unidas a las condiciones de oleaje (más

o menos energético) permiten acumular sedimento en barras formadas enfrente de la boca del río. De igual manera el oleaje más energético, puede provocar mayor erosión en los acantilados y a su vez aumentar la cantidad de sedimentos fino para ser transportado por la deriva litoral.

### 5.3. Características del oleaje

A continuación, se presentan las principales características del oleaje halladas por el subcomponente de modelación del Proyecto de Erosión Costera. Estos resultados corresponden a la dirección predominante de la zona de estudio, la altura significativa del oleaje y su período pico asociado ( $T_p$ ), variables esenciales para llevar a cabo la modelación.

**Figura 10.** Características del oleaje. a) Rosa de oleaje para la boya virtual asociada a Volcán de Lodos, b) Probabilidad conjunta  $H_s - T_p$ , para la boya virtual Volcán de Lodos (VLD).



La zona de Volcán de Lodos presenta una dirección predominante que proviene del NW con alturas de oleaje de mayor ocurrencia entre 0.9 m y 1.3 m, también muestra una dirección menos probable proveniente del N con alturas inferiores a los 1.3 m (figura 10a). Por otro lado, la figura 10b representa la probabilidad de ocurrencia de la altura significativa de oleaje y su período pico asociado a este. El subcomponente halló que la mayor probabilidad de ocurrencia se encuentre entre valores de 0.70 m de altura significativa y un período asociado entre 3.5 a 4 segundos, y hasta valores de 1.15 m con un período asociado entre los 5 y 7 segundos.

Con los resultados hallados, se logró determinar los escenarios de modelación con la dirección más predominante (NW) y la menos predominante (N), y a su vez una altura de oleaje significativa de 1.2 metros con un período asociado de 8.5 segundos.

Con el fin de conocer la dinámica hidrodinámica y morfológica para escenarios con mayor y menor ocurrencia.

#### 5.4. Escenarios de modelación

Los escenarios definidos para la modelación, fueron seleccionados teniendo en cuenta las características del oleaje y la presencia o no de obras. De acuerdo con los mencionado anteriormente, se presentan los valores comunes para todas las modelaciones en la Tabla 6.

**Tabla 6.** *Parámetros de entrada comunes a los escenarios modelados.*

| <b>Módulo de oleaje</b>                 |                        |
|---|------------------------|
| <b>Altura significativa de ola (Hs)</b> | 1.2 metros             |
| <b>Período Pico (Tp)</b>                | 7 segundos             |
| <b>Dispersión del oleaje</b>            | 14 deg                 |
| <b>Gravedad (g)</b>                     | 9.8 m/s <sup>2</sup>   |
| <b>Densidad del agua</b>                | 1025 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>Tipo de sedimentos</b>               | No cohesivos           |
| <b>Coefficiente Chezy</b>               | U = 30 ; V = 30        |
| <b>Densidad especifica</b>              | 2650 kg/m <sup>3</sup> |
| <b>D50</b>                              | 294µm                  |

Los valores del coeficiente de Chezy utilizados para la componente U y V, fueron utilizados con base en la estabilidad del modelo. Un análisis detallado del mismo se puede consultar en el Anexo A.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los casos modelados, en los que se muestran la dirección del oleaje y si fue o no utilizada la obra. Es de notar que los resultados presentados corresponden a modelaciones realizadas durante siete días calendario. Es decir, se analiza el corto plazo del transporte de sedimentos.

**Tabla 7.** *Casos a modelar en el sector puerto Rey – río Hobo,*

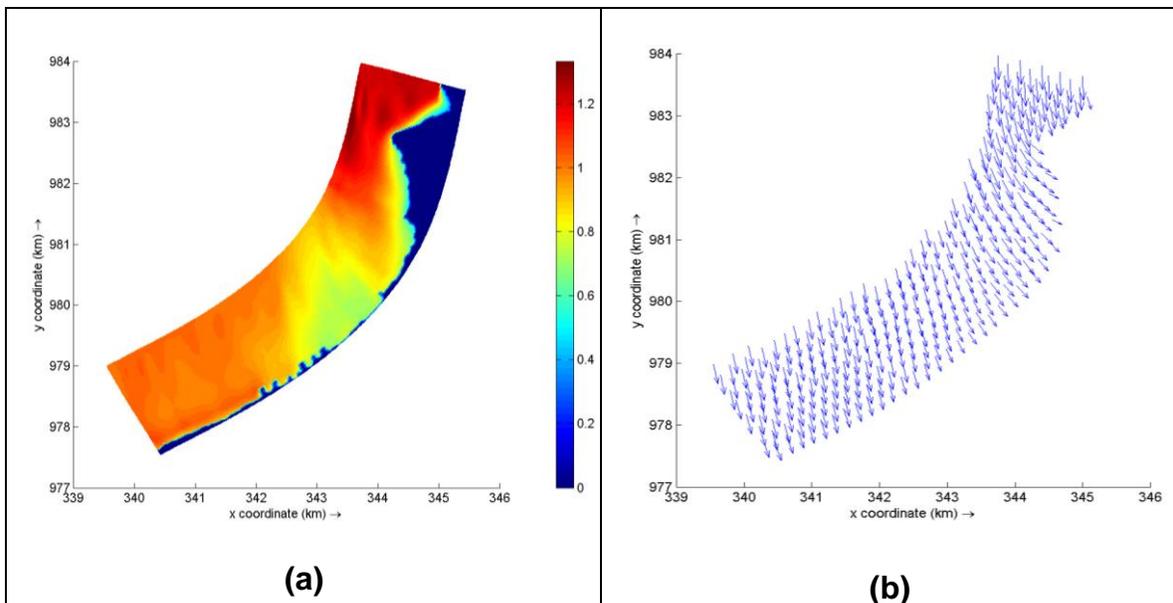
| <b>Número del caso</b> | <b>Dirección de oleaje</b> | <b>Presencia obra</b> |
|------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1                      | Norte                      | No                    |
| 2                      | Norte                      | Si                    |
| 3                      | Noroeste (NW)              | No                    |

### 5.4.1 Caso 1. Sin obra y oleaje proveniente del norte.

#### Altura significativa y dirección del oleaje.

En la figura 11, se presentan los campos de altura significativa y dirección del oleaje. Se observa como el oleaje de mayor altura llega a la zona punta Rey con un valor aproximado de 1.2 m en su zona profunda y de 0.7m cerca a la línea de costa. Esta punta protege la zona cercana ubicada al sur y al parecer parece reflejar el oleaje que debería llegar a la zona de la playa municipal. Esos valores de altura, asociados a esta dirección, son similares a los reportados para la zona de volcán de Lodos de la subcomponente de modelación de oleaje, donde asignan este valor a las mayores probabilidades de ocurrencia conjunta.

Para la zona entre la playa municipal y el sector de río Hobo, el oleaje presenta valores promedio de 1 m en la zona profunda. Este valor también coincide con el Hobo calculado por la subcomponente de modelación de oleaje y reportado en el rango de mayor probabilidades de ocurrencia para esta zona. Los resultados sugieren que la batimetría cerca a la zona de volcán de Lodos modifica la magnitud de la altura significativa que incide en esta zona.

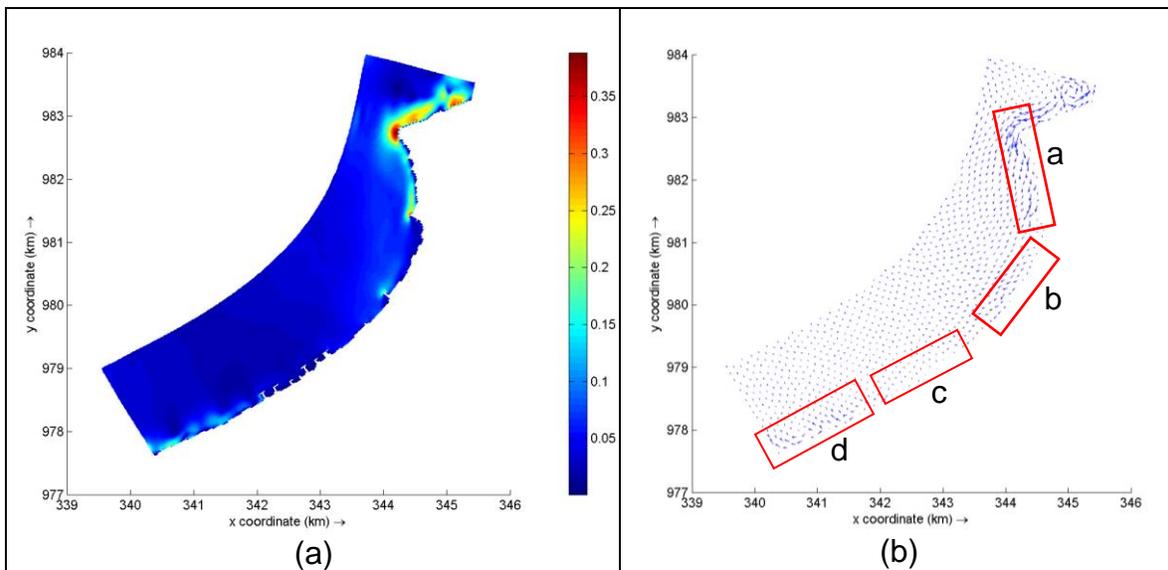


**Figura 11.** Campos instantáneos (2018, marzo, 22, 00) para la zona de estudio caso 1: a) Altura significativa del oleaje (m). b) Dirección media del oleaje.

## Magnitud y dirección de las corrientes

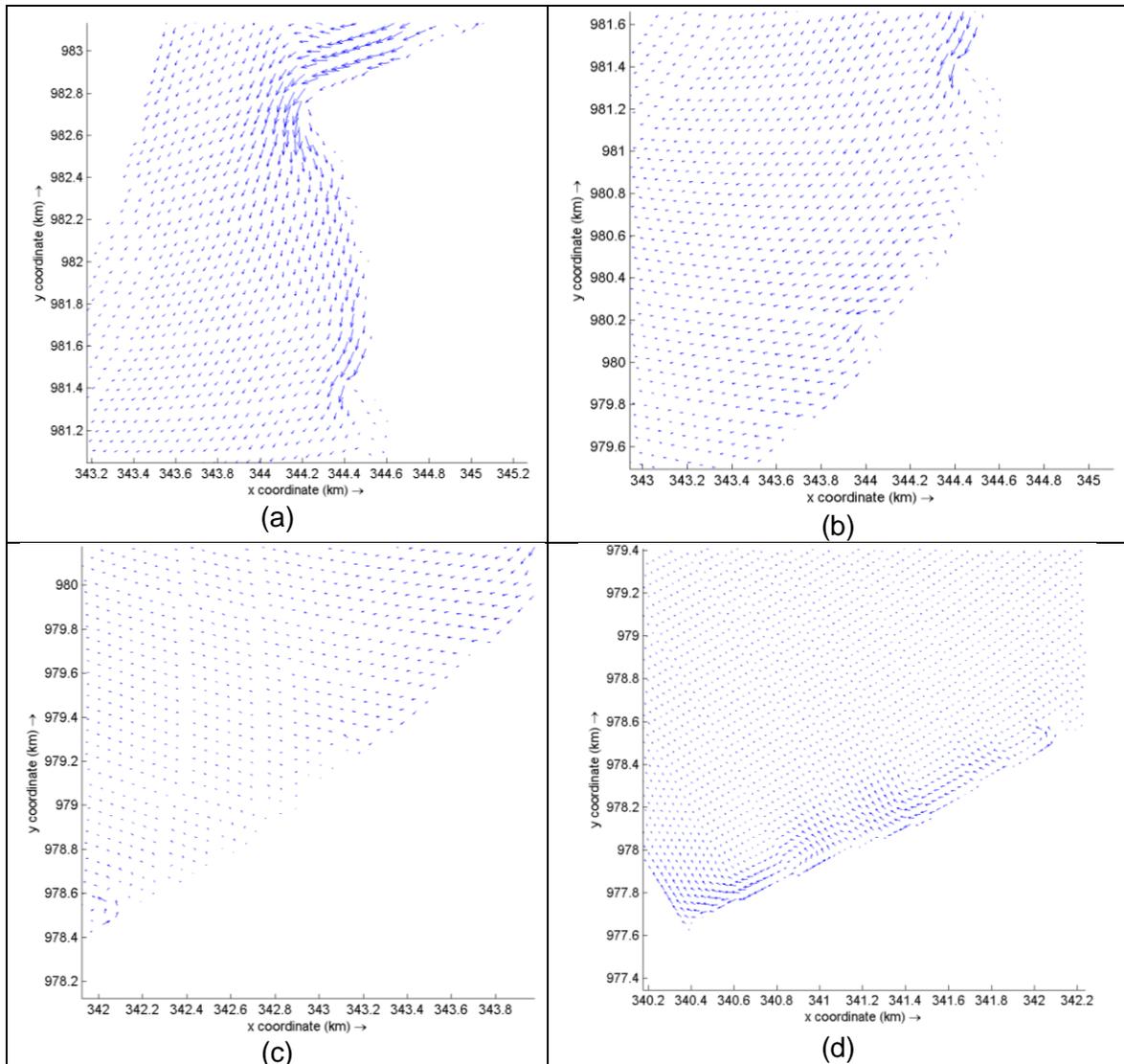
En la figura 12 se presentan los campos instantáneos de magnitud y dirección de las corrientes integradas en profundidad para el caso 1. Las mayores velocidades promedio se encuentran en el sector de punta Rey, con un valor aproximado de 0.37 m/s. Este valor disminuye entre 0.15 m/s y 0.25 m/s en una saliente ubicada al sur de puerto Rey, al parecer debido a la interrupción del flujo. En la zona de volcán de Lodos se observan velocidades menores a 0.1 m/s, este valor disminuye hacia el oeste debido a la interrupción del flujo debido a la presencia de los Tómbolos ubicados en la playa municipal.

En la zona de río Hobo, las corrientes aumentan a valores de hasta 0.2 m/s, coincidiendo con el aumento en la altura significativa del oleaje. Estos resultados coinciden con los obtenidos por el subcomponente de circulación oceánica, los cuales mostraron velocidades medias de 0.19 m/s en este sector (Subcomponente de modelación de circulación, 2018).



**Figura 12.** Campos instantáneos (2018, marzo, 22, 00) para la zona de estudio caso 1: a) magnitud de la corriente (m/s). b) Dirección de la corriente.

En general los resultados sugieren una relación entre valores altos de energía del oleaje y la magnitud de las corrientes, asociado probablemente a la rotura de ese oleaje y la generación de corrientes. En la figura 13 se presentan los campos de dirección de las corrientes ampliadas de algunos sectores de interés.



**Figura 13.** Campos de dirección promediada de la corriente para la zona de estudio caso 1: a) Zona de puerto Rey; b) zona al sur de puerto Rey; c) sector volcán de Lodo y serie obras; d) zona de río Hobo.

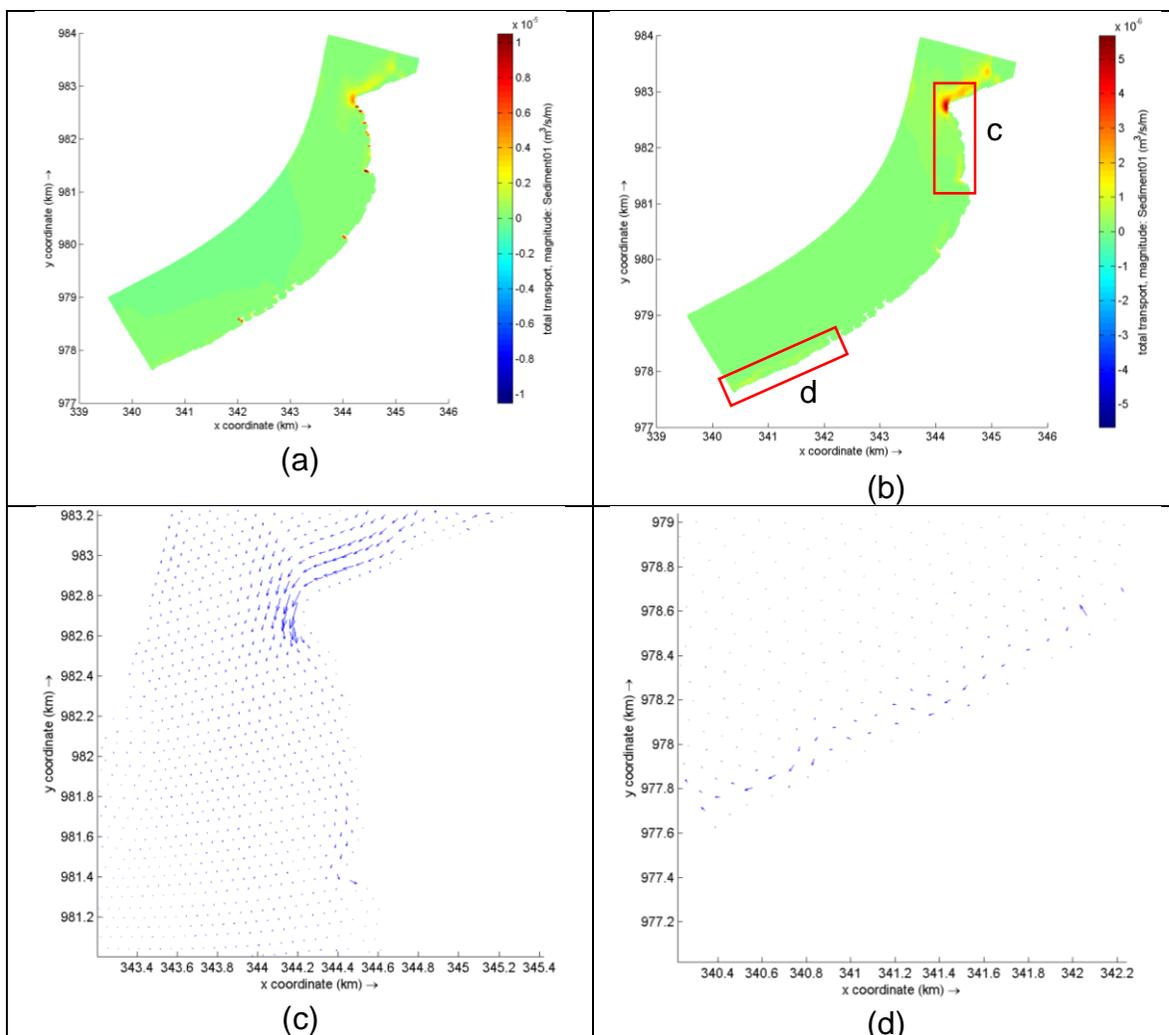
En la figura 13 se observa detalladamente la dirección de la deriva litoral en la zona de puerto Rey (a), al sur de puerto Rey (b), sector volcán de Lodo y obras (c) y zona de río Hobo (d). En puerto Rey, la corriente tiene una dirección SW, al sur de puerto Rey una dirección S, hasta que es interrumpida por la pequeña saliente que modifica su trayectoria. Cerca de la zona de volcán de Lodo, la dirección de la deriva no se logra marcar como en la zona norte, probablemente debido a la influencia del espolón que está al norte, y la poca altura de ola que incide sobre esta zona

Luego, la deriva sigue su dirección hacia el SW, pero valores bajos de su magnitud (0.1 m/s). Debido al tamaño de la malla, no se logra identificar el comportamiento de las corrientes al interior de los Tómbolos de Arboletes. Por último, la deriva vuelve a ser más notoria hasta el sector de río Hobo, donde se observa un flujo con

dirección NE y SW, este comportamiento probablemente se deba a la presencia de barras sumergidas producto de la desembocadura del río Hobo, las cuales, y debido a la dirección, están generando unas corrientes de retorno.

### Evolución del transporte total de sedimentos.

En las figuras 14 se muestran campos de magnitud de transporte total ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) para dos momentos del experimento numérico. Esto, con el describir la evolución del transporte total de sedimentos en el tiempo de modelado. En las primeras horas de simulación (13 horas), la mayor cantidad de flujo de sedimentos se observa en la zona de punta Rey, en especial de la punta hacia el este. Es de resaltar que al lado oeste de los espolones también evidencia alto flujo de transporte de sedimentos.

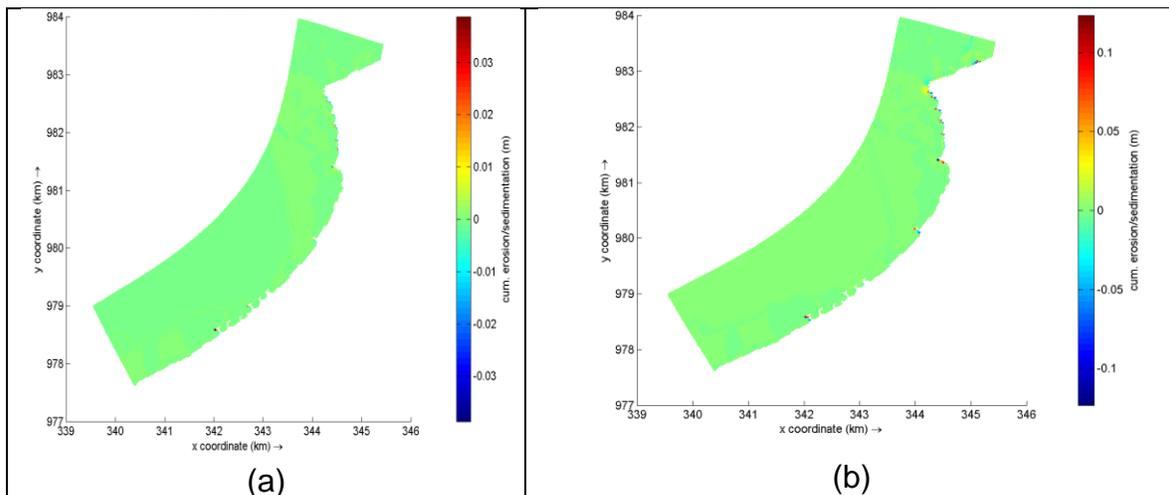


**Figura 14.** Transporte total de sedimentos para: a) 15 de marzo a las 13 horas. b) 22 de marzo a las 00 horas; c) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de puerto Rey. d) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de Río Hobo.

Pasados siete días de modelación, el transporte aumentó en la zona de puerto Rey con valores entre  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  y  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , y en la zona de Río Hobo aparece un aproximado de  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Cabe resaltar que estos valores son relativamente pequeños porque indica la cantidad de volumen de sedimentos que es transportado en un momento determinado, no la cantidad acumulada. La figura 14c muestra el campo vectorial del transporte medio de sedimentos, para la zona de puerto Rey, allí se logra observar como el flujo de sedimentos coincide con la dirección de la deriva litoral, esto mismo sucede para la zona de Río Hobo en La figura 14d donde los sedimentos tienen una dirección NE y SW, y se logra ver como algunos tienen dirección hacia mar adentro a causa de la corriente retorno vista en la figura 13d.

### Zonas de acreción/erosión.

La figura 15, muestra los campos de acreción/erosión acumulados en dos momentos del experimento numérico, luego de 10 horas de modelación y en la última hora de modelación (a y b, respectivamente). Los valores color azul indican erosión y entre amarillo y rojo, acreción. La zona de puerto Rey es donde se logra evidenciar los mayores cambios, allí se observa una zona extensa de erosión en cerca de la punta con un valor aproximado de 0.05 m, y acreción unos metros al sur con un valor aproximado de 0.025 m. Es claro que para poder determinar de manera adecuada las zonas de acreción/erosión, es necesario un mayor tiempo de modelado.



**Figura 15.** Campos de acreción/erosión para el caso 1, luego de: a) 10 horas de modelación, b) última hora de modelación (2018, 22, 02, 00).

En general, las zonas que presentan valores altos de erosión, como río Hobo y puerto Rey, han mostrado las mayores alturas de ola y velocidades de corrientes. La deriva litoral de estas dos zonas está bien es intensa respecto a los demás sitios y coincide con alto transporte de sedimentos.

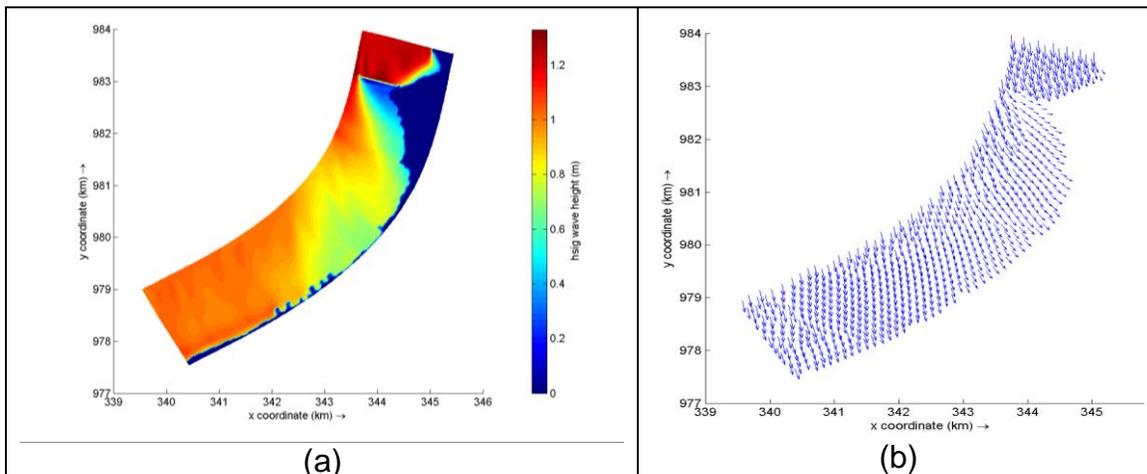
De otro lado, la zona de volcán de lodo tiene una incidencia de oleaje relativamente energético. Esto combinado con sus características geológicas, zonas costeras de arenas finas y Lodos, se requieren muy poca energía del oleaje para ser erosionado (Correa, 2004).

Por último, los resultados sugieren que los espigones y tómbolos interrumpen el paso de la deriva litoral. Aunque los segundos logran formar al interior una playa, esta interrupción podría afectar a zonas aledañas (Sánchez y Jiménez, 1994).

#### 5.4.2. Caso 2: Con obra y oleaje proveniente del norte

##### Altura significativa y dirección del oleaje.

En la figura 16, se presentan los campos de altura significativa y dirección del oleaje para el caso 2. Se observa como la presencia de la obra disminuye la energía del oleaje las zonas cercanas que se encuentran al sur de la obra y hasta la zona del río Volcán. De manera particular se protegen las líneas de costa de los corregimientos de puerto Rey y Minuto de Dios. En estos lugares la altura de ola significativa cerca de la línea de costa esta entre 0.1 m y 0.3 m, mientras que para el caso sin obra se registraba alturas entre 0.7 m y 0.9 m. Es decir, una disminución aproximada de 0.6 m. El campo de direcciones del oleaje presenta frentes de olas difractados en dirección perpendicular a la línea de costa.



**Figura 16.** Campos instantáneos (2018, marzo, 22) para la zona de estudio caso 2: a) Altura significativa del oleaje (m). b) Dirección del oleaje.

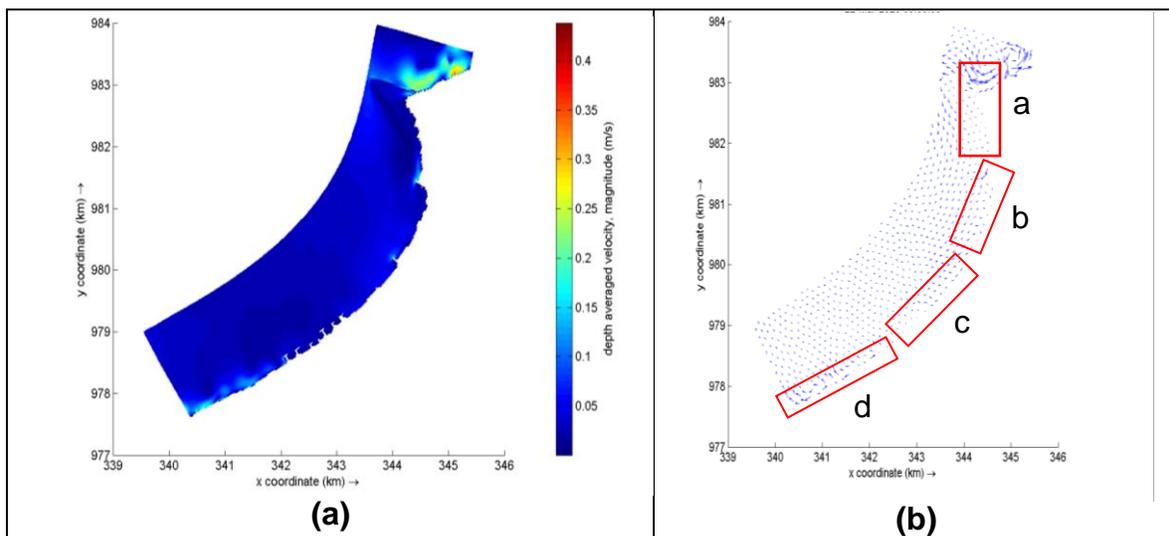
En la zona de volcán de Lodos no hay disminución significativa de la altura de ola respecto al caso sin obra, por lo cual el valor de altura significativa de ola es muy similar en ambos casos. Este comportamiento se puede asociar a la dirección del oleaje, debido al cual gran parte del oleaje llega de manera directa a esta zona. El

oleaje trata de bordear la obra y a medida que eso sucede, la magnitud de altura disminuye. Como el oleaje que está llegando a la zona tiene menor energía, se espera que las corrientes superficiales muestren poca intensidad en la zona protegida al sur de la espiga.

Cabe mencionar, que, por el tamaño de la malla y la dimensión de la obra, gran parte del oleaje llega de manera directa al espigón. Los valores de altura y dirección en esa zona deben ser tomados con cuidado, ya que la cercanía de la frontera del modelo podría producir valores anómalos en esa zona.

### Magnitud y dirección de las corrientes superficiales

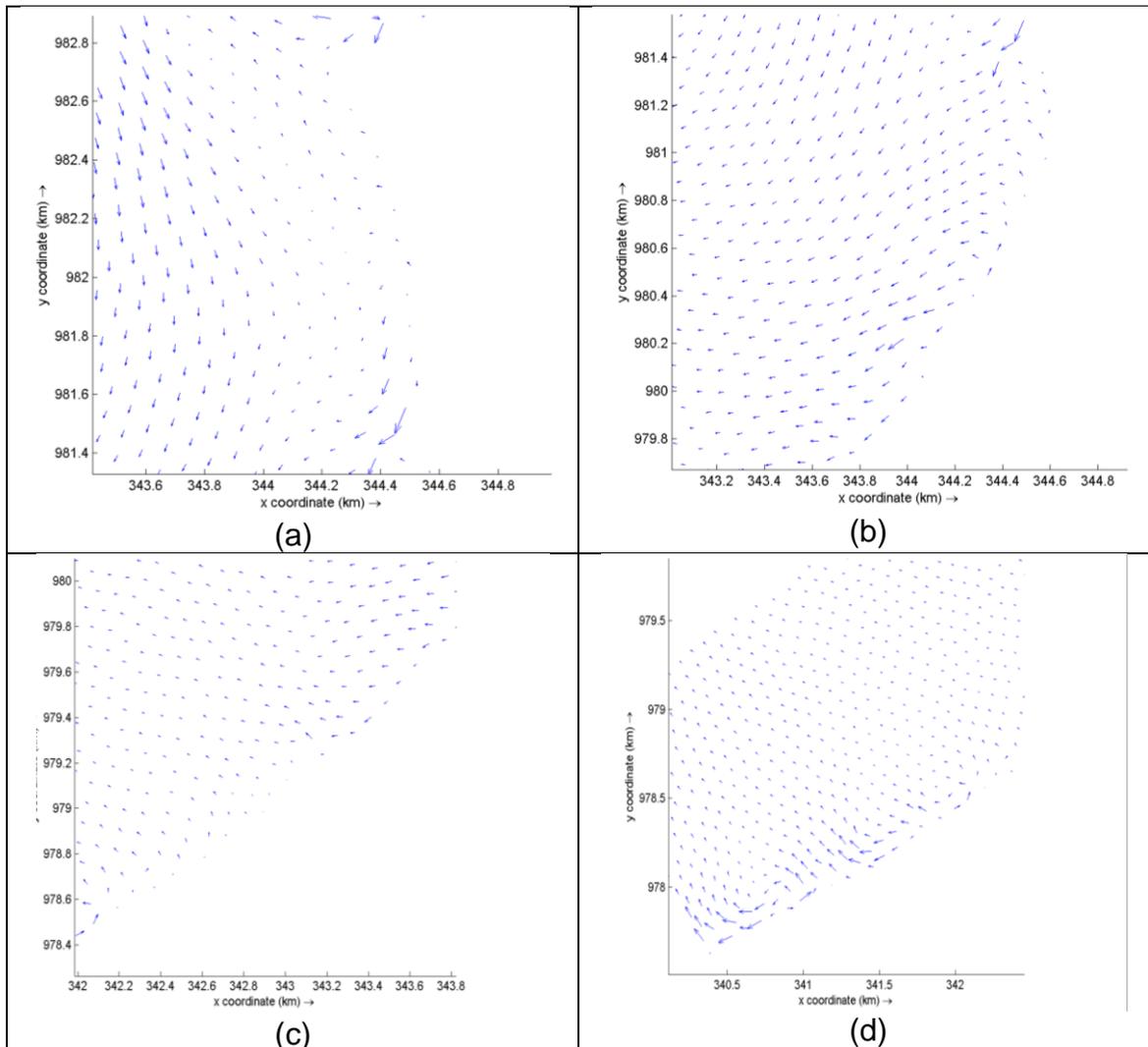
En la figura 17, se presentan los campos instantáneos de magnitud y dirección promediada de las corrientes integradas en profundidad para el caso 2. Como era de esperarse, la magnitud de la corriente disminuyó para la zona protegida al sur de la espiga. Los resultados muestran velocidades promedio de corriente entre 0.05 m/s y 0.1 m/s. Se logra evidenciar magnitudes entre 0.15 m/s y 0.2 m/s en la pequeña saliente al sur de puerto Rey. Los valores de la magnitud de la corriente para la zona de volcán de Lodo y la playa municipal, son similares al caso sin obra. Lo mismo ocurre en la zona de río Hobo, las magnitudes son similares al caso sin obra. Esto probablemente se deba a que, por la dirección, el oleaje no sea refractado como en otros escenarios.



**Figura 17.** Campos instantáneos (2018, marzo, días entre 15 - 22) para la zona de estudio caso 2: a) magnitud de la corriente (m/s). b) Dirección de la corriente.

Al comparar los campos de dirección de la corriente con el caso sin obra, no se observa tan claramente la corriente litoral (Figura 17b). Está corriente era más notoria en la zona de puerto Rey y al sur de allí. Nuevamente, cerca de la pequeña

saliente las velocidades aumentan y logra observarse parte de la deriva litoral. En la zona de la playa y río Hobo se observa como la corriente es mayor en comparación a las zonas anteriores, esto será descrito con mayor detalle con ayuda de la figura 18d.

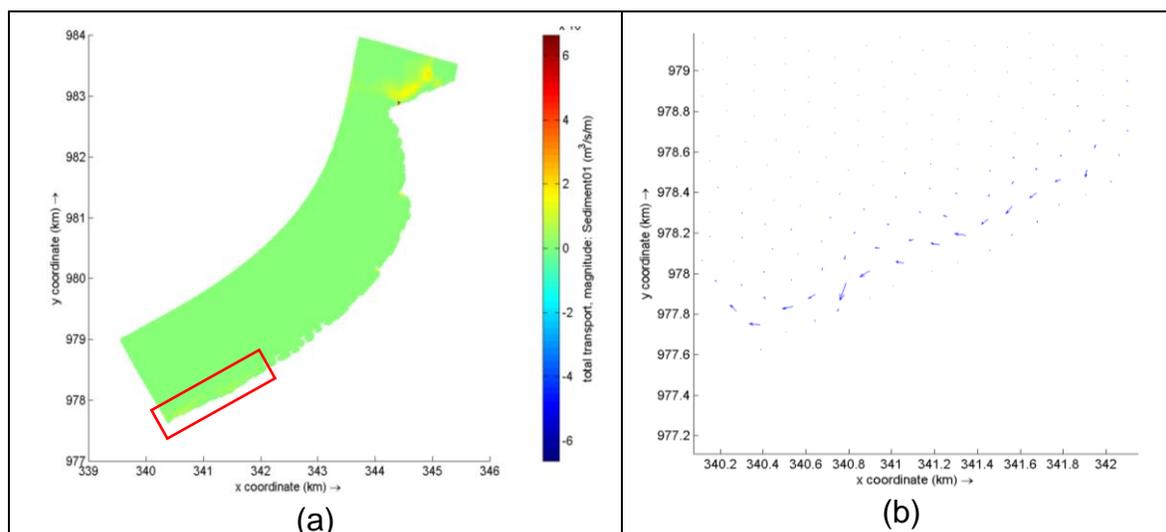


**Figura 18.** Campos de dirección promediada de la corriente para la zona de estudio caso 2: a) Zona de puerto Rey; b) zona al sur de puerto Rey; c) sector volcán de Lodo y serie obras; d) zona de río Hobo.

Al igual que en resultados anteriores, la energía del oleaje es refractada por el espolón, y por lo tanto la corriente total intensificada por la rotura es de poca magnitud. Aun así, la deriva conserva su curso en dirección S y luego en dirección SW hasta ser interrumpida por las obras de la playa de Arboletes. Con respecto a río Hobo, las corrientes de retorno y de deriva que se observan en la gráfica sin obra, se siguen viendo en esta (figura 18d). Recordemos el comportamiento para esta zona es similar al caso sin obra.

## Evolución del transporte total de sedimentos

La figura 19, muestra la magnitud del transporte total de sedimentos (figura 19a) y la dirección del transporte total de sedimentos para la zona de Río Hobo (figura 19b). Ambos escenarios corresponden al último día de modelación (2018, marzo, 22, 00).

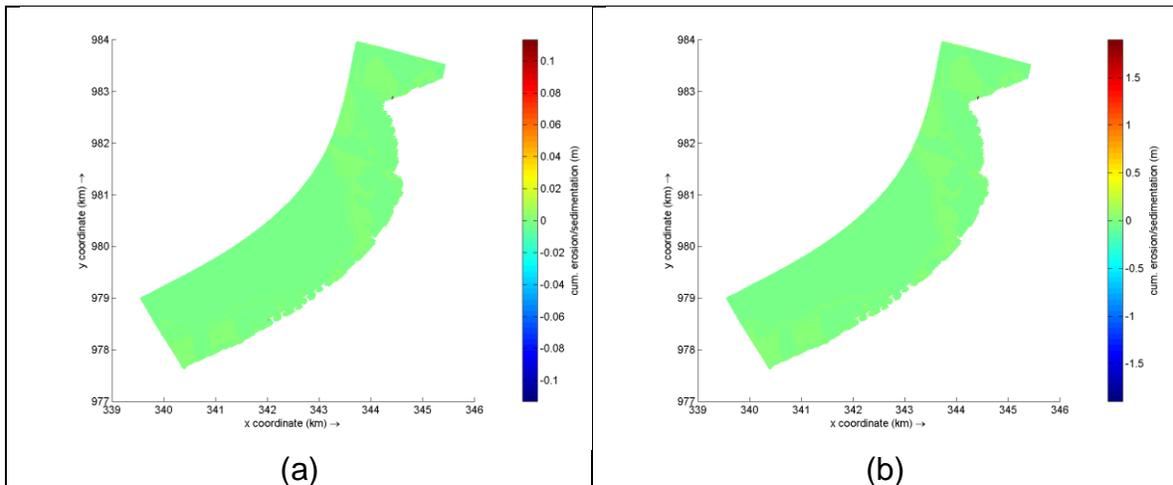


**Figura 19.** Transporte total de sedimentos (magnitud y dirección). a) Magnitud del transporte total de sedimentos para el último día de modelación (2018, marzo, 22,00); b) dirección del transporte total de sedimentos para el último día de modelación (2018, marzo, 22,00), zona río Hobo.

El transporte total de sedimentos que se ve en la figura 19a para la zona que está un poco al norte de la punta de Puerto Rey, se le atribuye a la presencia de la obra, y al oleaje que incide sobre ella, cabe resaltar que por estar tan cerca de las fronteras de la malla, no se acepta como un valor real.

Lo que sugieren los resultados hidrodinámicos, es que la obra propuesta modifica las condiciones hidrodinámicas de la zona y por lo tanto de transporte de sedimentos en la región bajo la sombra de la obra (figura 19b). Las disminuciones de la energía del oleaje y de la deriva litoral, no permitieron evidenciar el transporte de sedimentos en esta zona. También se le atribuye el poco tiempo de modelado. Por otro lado, en la misma figura 19a se logra ver un pequeño flujo de transporte de sedimentos en la zona de Río Hobo, con un valor aproximado de  $1.5 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  y es por este motivo que se decidió mostrar la dirección del transporte total de sedimentos para esa zona (figura 19b), allí se puede ver como los sedimentos tienen una dirección de NE-SW. Cabe recalcar que para este escenario se habla de dirección para la última hora de modelación, mientras que, sin obra corresponde a la dirección del transporte total medio de sedimentos.

## Zonas de acreción/erosión.



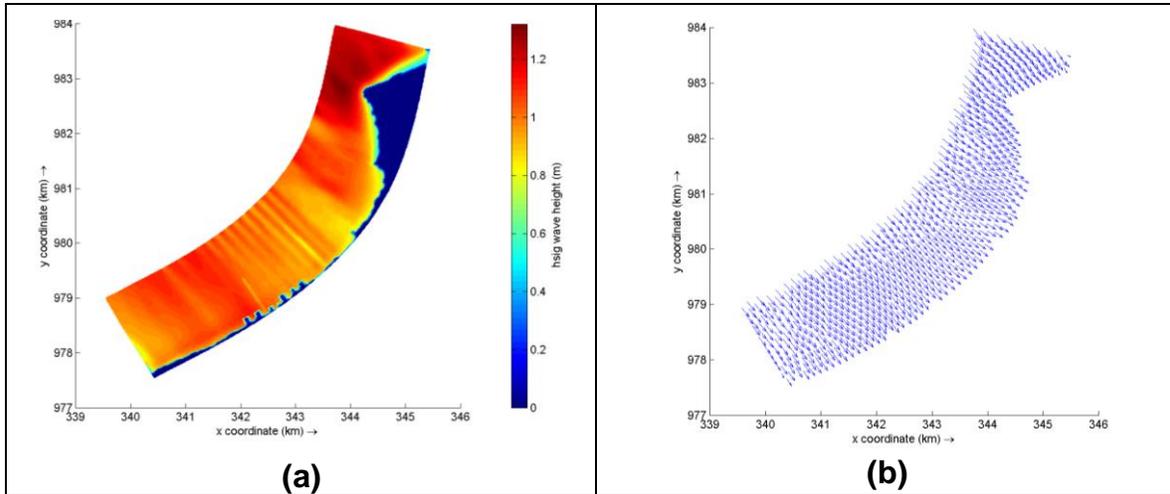
**Figura 20.** Campos de acreción/erosión para el caso 2, luego de: a) 10 horas de modelación, b) última hora de modelación (2018, 22, 02, 00).

Como era de esperarse, no se logra evidenciar zonas de acreción o erosión, esto se debe a los resultados mostrados en este escenario con obra; la poca energía con el que el oleaje incide, genera como corrientes y poco flujo del transporte de sedimentos, también se le atribuye el poco tiempo de modelación realizado.

### 5.4.3. Caso 3: sin obra con oleaje proveniente del NW

#### Altura significativa y dirección del oleaje.

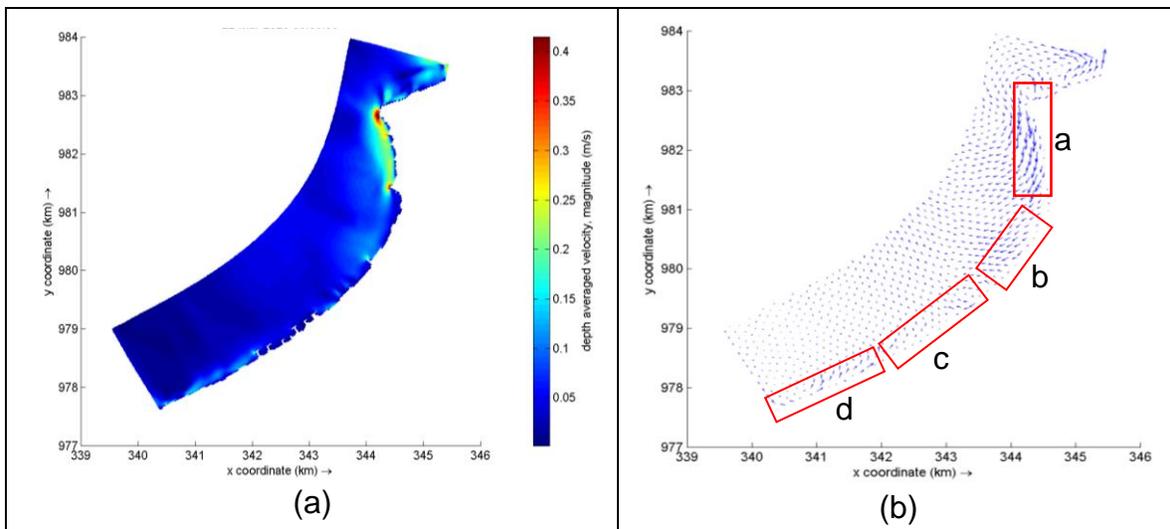
En la figura 21, se muestran los campos de altura y dirección promedio del oleaje para el caso 3. Con un oleaje proveniente del noroeste (NW), toda la zona de estudio queda más expuestas a la incidencia del mismo. En puerto Rey cerca de la línea de costa, el oleaje oscila entre 0.8 m y 1m, con valores de hasta 1.2m. En la zona de volcán de Lodos y playa municipal, también se evidencia un aumento de la altura del oleaje, con valores de hasta 0.8 m. En el sector de río Hobo, las alturas mayores son cercanas a 1 m. Se observa una gran diferencia entre las alturas de ola para los escenarios N y NW. En el primer caso, la dirección del oleaje permite que el oleaje se refracte con la punta de puerto Rey, y de esta manera, se generan zonas de calma. Caso contrario para dirección proveniente del NW, el oleaje sobre la línea de costa es más energético debido a que llega de manera directa. Al igual que los resultados propuestos por el subcomponente de modelación del oleaje, la dirección NW está causando las alturas más altas con respecto a la dirección N.



**Figura 21.** Campos instantáneos (Año, mes, día, hora) para la zona de estudio caso 3: a) Altura significativa del oleaje (m). b) Dirección del oleaje.

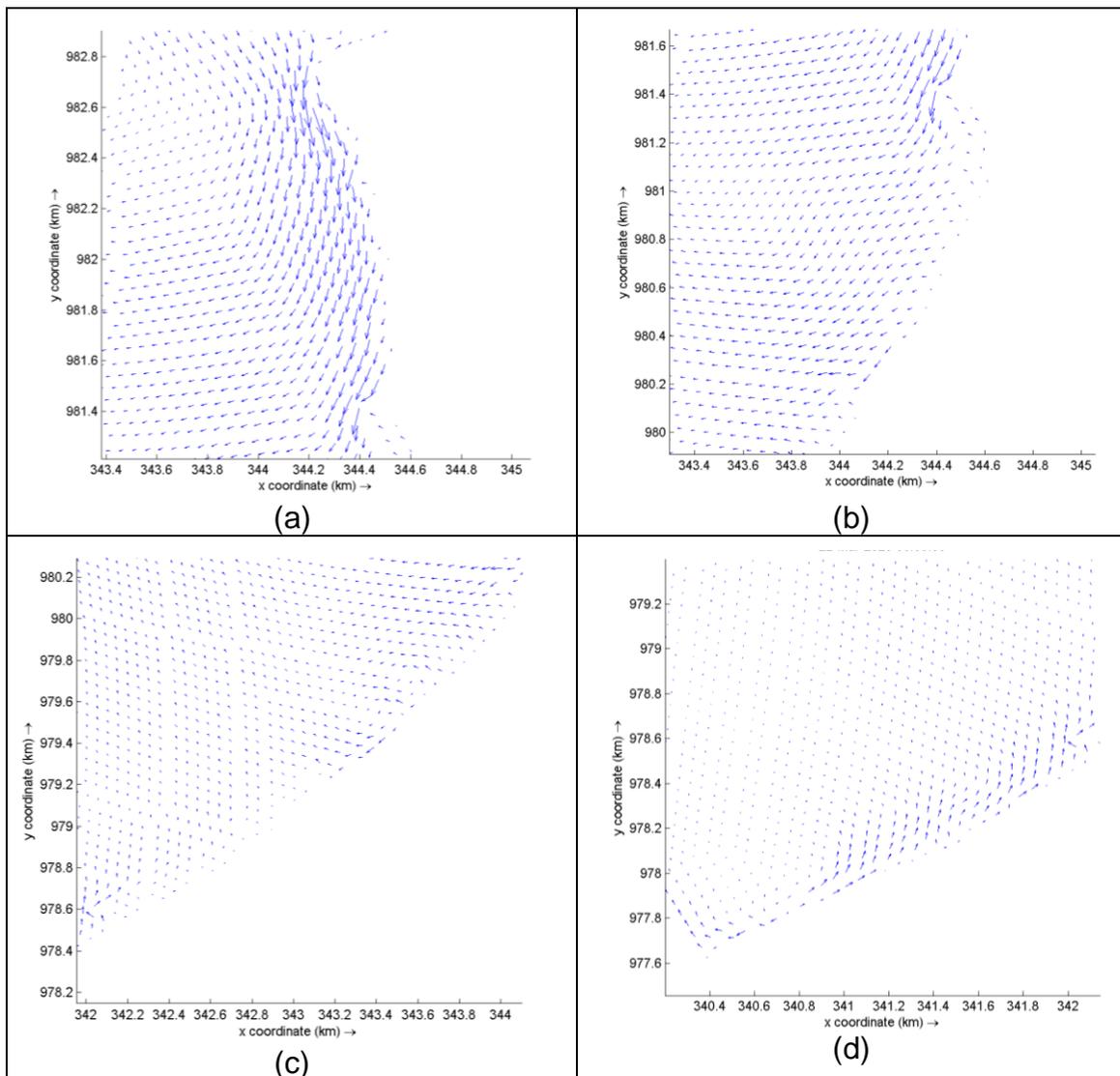
### Magnitud y dirección de las corrientes superficiales

En la figura 21, se presentan los campos instantáneos de magnitud y dirección de las corrientes integradas en profundidad para el caso 3. Los resultados sugieren que la zona de puerto Rey y un poco más al sur de esta, es donde mejor se presenta las corrientes de mayor magnitud, siendo inclusive mayores a los valores encontrados en los escenarios 1 y 2. Los valores de las magnitudes se encuentran entre 0.2 m/s y 0.4 m/s, siendo los valores más altos los cercanos a puerto Rey. La zona de río Hobo muestra magnitudes de hasta 0.15 m/s. En general, en este escenario las magnitudes se incrementan debido a la dirección del oleaje.



**Figura 22.** Magnitud promedio del corriente integradas en profundidad para la zona de estudio caso 3: a) magnitud promedio de la corriente (m/s). b) Dirección promedio de la corriente.

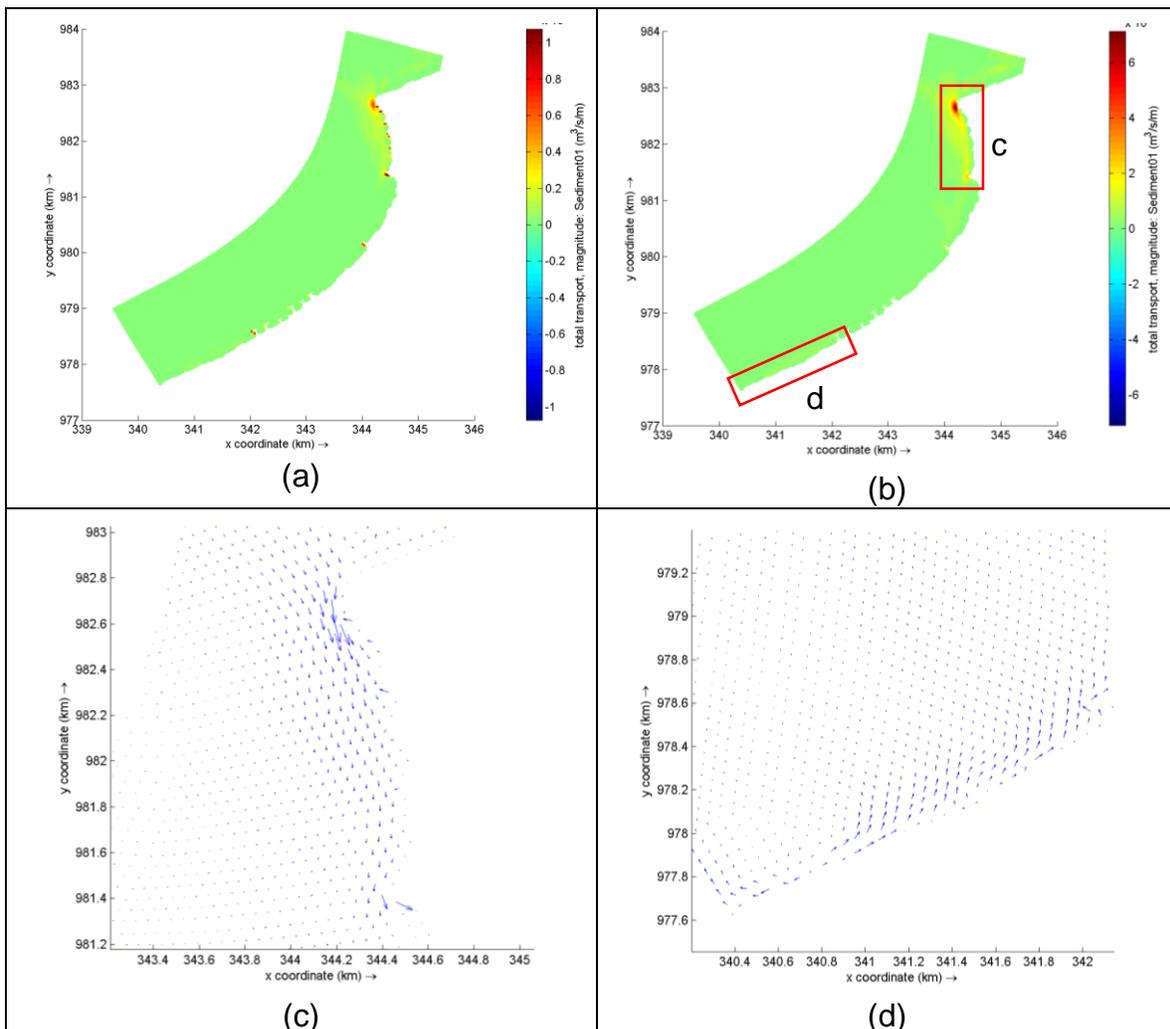
Haciendo un zoom en las zonas a, b, c y d, obteneos la figura 23; en la zona de Puerto Rey (figura 23a), se puede ver como la corriente está bien marcada, siguiendo una dirección hacia S, hasta encontrarse con la pequeña saliente que desvía un poco su trayectoria. En la figura 23b se ve como la corriente al estar un poco más al sur, empieza a dirigirse hacia mar adentro, aquí la deriva no se ve tan marcada, al igual que en la zona de Arboletes y la serie de obras (figura 23c); donde al parecer las corrientes también se están dirigiendo hacia aguas más profundas. La dirección con la cual está llegando el oleaje es casi perpendicular a la costa, lo que podría estar generando estas corrientes hacia aguas profundas. Por otro lado, para la zona de Río Hobo si se logra ver la deriva litoral, pero con una dirección SW-NE, y también con direcciones hacia mar adentro.



**Figura 23.** Dirección promedio de la corriente para la zona de estudio caso 3: a) Zona de puerto Rey; b) zona al sur de puerto Rey; c) sector volcán de Lodo y serie obras; d) zona de río Hobo.

## Evolución del transporte total de sedimentos.

En las figuras 24 se muestra la magnitud del transporte total de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) para dos momentos del experimento numérico. Esto, con el fin describir la evolución de esta variable en el tiempo de modelado. En las primeras horas de simulación (13 horas), la mayor cantidad de flujo de sedimentos se observa en la zona de punta Rey, en especial de la punta hacia el este (figura 24a), el valor para esta zona oscila entre  $0.2$  y  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Es de resaltar que al lado oeste de los espolones también evidencia alto flujo de transporte de sedimentos. A los siete días de simulación, el transporte total de sedimentos se incrementa en la zona de Puerto Rey alcanzando valores entre  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  y  $6.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , también se logra ver un poco de transporte total de sedimentos en la zona de Río Hobo, con un valor estimado de  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

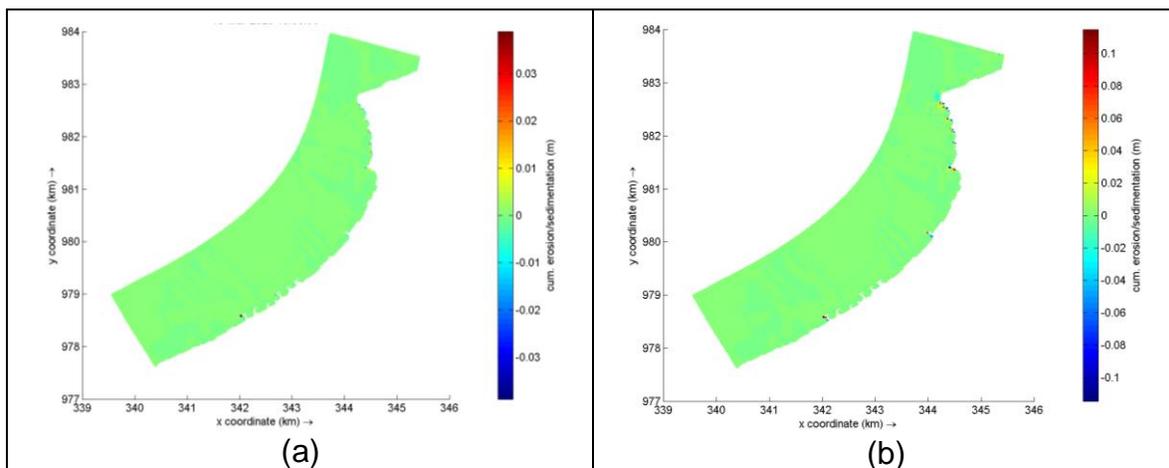


**Figura 24.** Transporte total de sedimentos para: a) 15 de marzo a las 13 horas. b) 22 de marzo a las 00 horas; c) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de puerto Rey. d) campo de vectores del transporte medio de sedimentos para la zona de Río Hobo

Se evidencia como el caso 3 alcanza valores de transporte de sedimentos mayores al caso 1 (con oleaje proveniente del N), esto con cuerda con los valores hallados en la altura del oleaje y las velocidades de corrientes; al incidir el oleaje de forma más directa en la costa, incrementa el valor las variables ya menciona. En cuanto a la dirección del transporte medio total de sedimentos; se logra ver como estos tienen una dirección hacia el S en la zona de Puerto Rey y al sur de esta (figura 24c). Para la zona de Río Hobo; las corrientes tienen una dirección hacia NE, coincidiendo con la dirección de la corriente para la misma zona (figura 23d) y, esta dirección es opuesta a la hallada para el caso 1 (figura 18 d). Es claro que la batimetría de Río Hobo tiene una gran influencia en la dirección de las corrientes y del transporte total de sedimentos

### Zonas de acreción/erosión.

La figura 25, muestra los campos de acreción/erosión acumulados en dos momentos del experimento numérico, luego de 10 horas y en la última hora de modelación (a y b, respectivamente).



**Figura 25.** Campos de acreción/erosión para el caso 4, luego de: a) 10 horas de modelación, b) la última hora de modelación (2018, marzo, 22, 00).

En este resultado se logra ver una erosión entre 0.04 m y 0.02 m para la punta de puerto Rey (figura 25b), coincidiendo que los resultados anteriores de transporte de sedimentos y velocidad de la corriente. También se ve como en las salientes y algunas obras, claro que los valores no parecen superar los 0.08 m. En comparación al caso 1, aquí se logra evidenciar un poco más de erosión en la punta de Puerto Rey.

Por problemas de estabilización del modelo, no se logró realizar un caso 4 donde se tuviera en cuenta la presencia de la obra y una dirección proveniente del oleaje de NW.

## 6. CONCLUSIONES

Tanto acantilados como los afluentes son las principales fuentes de sedimentos de la zona de estudio, la gran extensión de acantilados y las variaciones del oleaje incidente, altera la dinámica hidrodinámica y de flujo de transporte para la zona de estudio.

A pesar del poco tiempo de modelación, se logró evidenciar que la hidrodinámica en zonas como puerto Rey y río Hobo, están respondiendo bien ante las implicaciones de un oleaje proveniente del N y NW.

El transporte total de los sedimentos y su dirección está fuertemente relacionado con la velocidad promedio de la corriente y la incidencia del oleaje, esto aplica para todos los casos expuestos.

La hidrodinámica de la zona de puerto Rey y río Hobo se ve altamente influenciada por las características de la dirección del oleaje. De acuerdo con los resultados la situación de mayor desventaja para el litoral es cuando el oleaje viene del NW.

Las zonas de acreción y erosión se evidenciaron en muy poca magnitud, esto se le atribuye al poco tiempo modelado, por lo cual se espera que, si se modela por mucho más tiempo, se podrá evidenciar estas áreas de acreción y erosión con mayor detalle.

En cuanto a la obra propuesta, en la que se pretende recuperar la espiga natural del puerto Rey, los resultados sugieren que la espiga genera una amplia zona de calma para los sitios al sur (entre ese lugar y la zona de las playas del municipio de Arboletes), para un oleaje proveniente del norte.

Río Hobo, presenta grandes cambios en cuanto a la dirección de la corriente y el transporte total de sedimentos para las dos direcciones plateadas; pues para un oleaje proveniente del N la dirección de la corriente y el transporte total de sedimentos tiene una dirección SW; para una dirección proviene del NW la dirección de la corriente y el transporte de sedimentos es opuesta, es decir NE.

La zona de Puerto Rey mantuvo las mismas direcciones para todos los casos (S), pero en menor magnitud para un oleaje proveniente del N con y sin obra.

## **7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Se sugiere realizar experimentos numéricos con un mayor tiempo de modelación (orden de meses), de tal manera que abarquen características principales de cada época climática. De esa manera poder establecer las condiciones particulares de cada una.

Explorar los casos con oleaje NE, en los cuales la obra propuesta podría reducir de manera significativa su energía. Así como otras orientaciones de la obra propuesta.

Realizar más escenarios de modelación, donde se incluya diferentes alturas de olas y períodos, y combinarlos con la presencia y ausencia de la obra propuesta.

La ausencia de datos medidos limita la validez de este trabajo en muchos aspectos. Sin embargo, los resultados coinciden con varios de los autores que han trabajado en la zona. Se recomienda realizar mediciones de los parámetros de entrada del modelo y desarrollar un experimento numérico adecuado.

Se sugiere combinar el modelo Delft 3D y el modelo Xbeach con el fin de obtener resultados en mallas más finas alrededor de los sitios de volcán de Lodo, río Hobo y puerto Rey.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

Cabrera, H., (1975). Origen y transporte de sedimentos en estuarios. Universidad de Oregon. Ciencias Marinas, 2(1), (pp.106-114).

Comugrid, 2001. Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre. Municipio de los Cordobas (Cordoba, Colombia).

Correa I.D., Arroyave, J. F. (2016). The Arboletes-Punta Rey Littoral, Southern Caribbean Coast. In Landscapes and Landforms of Colombia (pp. 55-63). Springer, Cham.

Correa, I. D., Alcántara-Carrió, J., & GONZALEZ, R. D. A. (2005). Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean coast. *Journal of Coastal Research*, 52-57.

Correa, I., Ríos, A., González, D., Toro, M., Ojeda, G., & Restrepo, I. (2007). Erosión litoral entre arboletes y punta san bernardo, costa caribe colombiana. *Boletín de Geología*, 29 (2), 115-129.

Correa-Arango, I. D., & Lorduy, R. (2008). Implicaciones del ascenso del nivel del mar sobre los litorales de Colombia. *Cambio Climático ¿Una Caja de Pandora?* (1ª ed.). CORANTIOQUIA, Oficina Asesora de Comunicaciones. Pp 26-38.12.

Correa-Arango, I. D., & Vernetto, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo), costa Caribe colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, Santa Marta, v. 33, n. 1, Dec. 2004, pp 07 28.

Crowell, M., Honeycutt, M., & Hatheway, D. (1999). Coastal erosion hazards study: phase one mapping. *Journal of Coastal Research*, 10-20.

Del río, L., & Gracia, F. J. (2009). Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology*, 112(1-2), 82-95.

Deltares, D. (2017). Delft3D-FLOW Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena Including Sediments, User Manual.

Ferguson B. (2001) "Shoreline erosion and its potential control on thurmond lake". IECA. Shoreline stabilization. Soil stabilization series. Vol. 16. pp.41-48.

García-Valencia, C. (Ed). 2007. Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar N° 12. Santa Marta, Colombia. 180p. Atlas.

Gobernación de Antioquia, Universidad del Norte y Universidad de Antioquia (2018). Informe final de la componente de Geología, Recuperado de: proyecto Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia.

Gobernación de Antioquia, Universidad del Norte y Universidad de Antioquia (2018). Informe final del subcomponente de modelación del oleaje. Recuperado de: proyecto Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia.

Hermelín, M., (2005). Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004. Universidad EAFIT, Grupo de Geología Ambiental e Ingeniería Sísmica (pp. 213-224). Medellín, Colombia

Higueta, M., & Quintana. (2020). Modulaci3n de las corrientes en el golfo de Urabá, a partir de la onda de mare (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia. Turbo. Colombia.

Hoyos, N., Acosta, S., & Correa, I. D. (2006). Sistema de informaci3n geogr3fica para el estudio de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba, Colombia: Herramientas de diseño, implementaci3n y uso. *Gesti3n y Ambiente*, 9(3), 147-156.

Ibarra Marinas, A.D., Belmonte Serrato, F., & Rubio Iborra, J. (2016): El impacto territorial del uso agrícol y turístic del litoral: evoluci3n de los cambios de uso del

suelo en las cuencas litorales del sur de la Región de Murcia (1956-2013). Boletín de la A.G.E., 72 (en prensa)

Invemar. (2003). Programa holandés de asistencia para estudios de cambio climático, Colombia: Definición de la vulnerabilidad de los sistemas biogeofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe Continental, Caribe Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. VII Tomos, Resumen Ejecutivo y CD-Atlas Digital. Programa de Investigación para la Gestión Marina y Costera - GEZ, Santa Marta, Colombia. ISBN: 958- 97264-2-9.

Mentaschi, L., Vousedoukas, M. I., Pekel, J. F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. Scientific reports, 8(1), 12876.

Merlotto, A., & Bértola, G. R. (2007). Consecuencias socio-económicas asociadas a la erosión costera en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina.

Murillo, E., & Londoño, G. (2018). Variabilidad espacio-temporal del nivel del mar en la costa del Caribe colombiano (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia

Paniagua Arroyave, J. F. (2013). Migración histórica actualizada y predicción de la posición de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral antioqueño, considerando escenarios de ascenso del nivel del mar (Master's thesis, Universidad EAFIT).

Posada, B. O., D., & Henao, W. (2011). Diagnóstico de la erosión costera del territorio Morales, insular colombiano. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales 24 (p. 112). Santa Marta, Colombia.

Posada, P. B. O., Henao Pineda, W. (2008). Diagnóstico de la Erosión en la zona costera del Caribe Colombiano., Serie de publicaciones especiales, No.13, Santa Marta, INVEMAR, 2008, pp. 200.

Posada, P., Oliva, B., Henao Pineda, W., & GUZMÁN OSPITIA, G. (2009). Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano.. *Diagnóstico*, 80, 100.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología en Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 28(0370-3908), 22.

Rangel Buitrago, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe colombiana. *Gestión y Ambiente*, 12(2).

Rangel Buitrago, n., Anfuso, g., Williams, A. (2015) Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia. *Ocean & Coastal Management* 114:129–144.

Rangel-Buitrago, N., Williams, A. T., & Anfuso, G. (2017). Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls. *Ocean & Coastal Management*, 156, 58-75.

Restrepo, A., Agudelo, P., Tejada, C., Morales, R., Torres, R., y Osorio, A. (2005). Estudio y evaluación de alternativas de solución para la protección costera de unos sectores de la costa caribe colombiana. *Boletín Científico CIOH No. 23*. 90–102

roelvink, D., Van Dongeren, A., Mccall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van geer, P. & Quataert, E., (2015). Xbeach Technical Reference Kingsday Release Model Description and Reference Guide to Funtionalities. Deft. The Netherlands.

Sánchez-Arcilla, Agustín; Jiménez, José A. Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera. *Ingeniería del agua*, 1994, vol. 1, no 2.

Stronkhorst, J., levering, A., Hendriksen, G., Rangel-Buitrago, N., & Appelquist, L. R. (2018). Regional coastal erosion assessment based on global open access data: a case study for Colombia. *Journal of CoastalConservation*, 1-12.

Suarez, J. (2001). Estructuras Marinas. Control de la erosión en zonas tropicales, (pp. 533-534). Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos — Ingeniería de Suelos Ltda,

Tolman, H. L., 2009. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp.

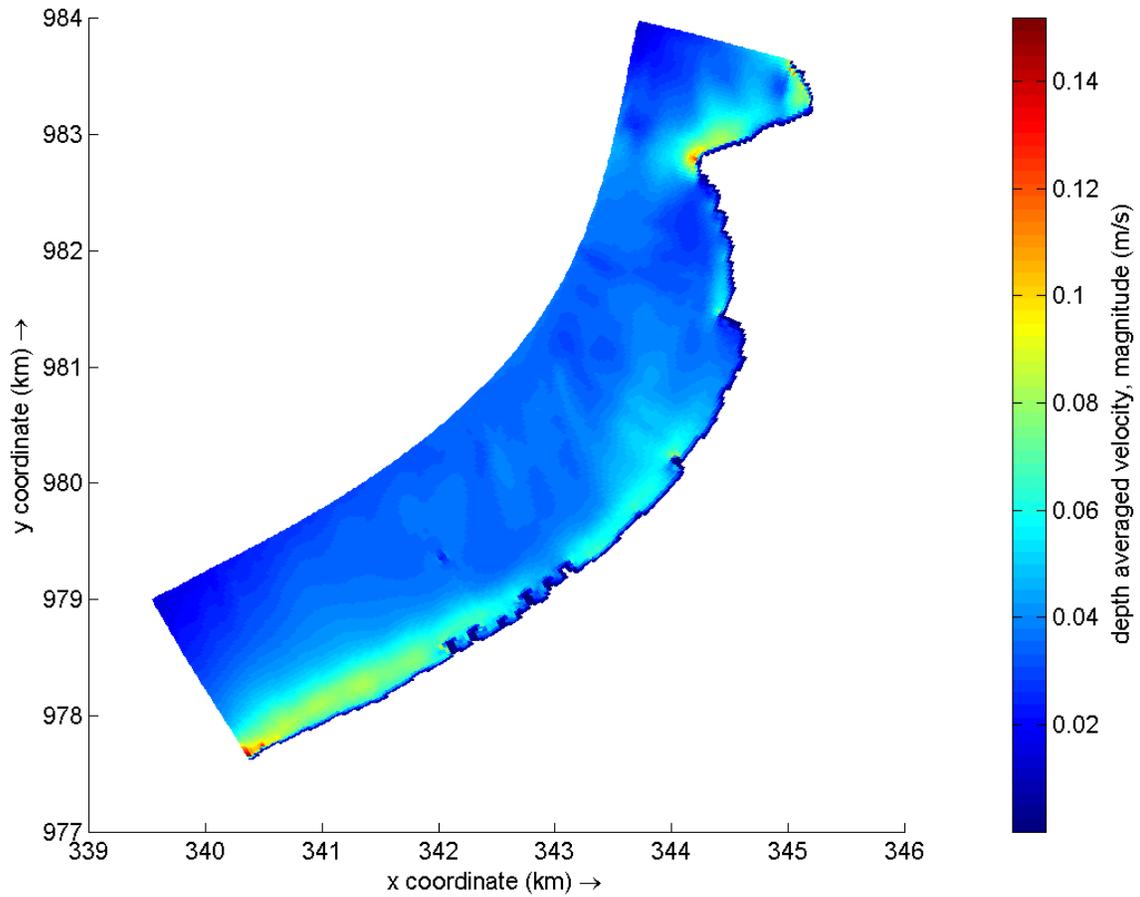
USACE (2002). Coastal sediment properties. US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual – Part III. EM 1110-2-1100.

Vernette, G., Correa Arango, I. D., Franco, B., & Rocío, G. (2012). Introducción a los cambios del nivel del mar y sus consecuencias sobre la zona costera.

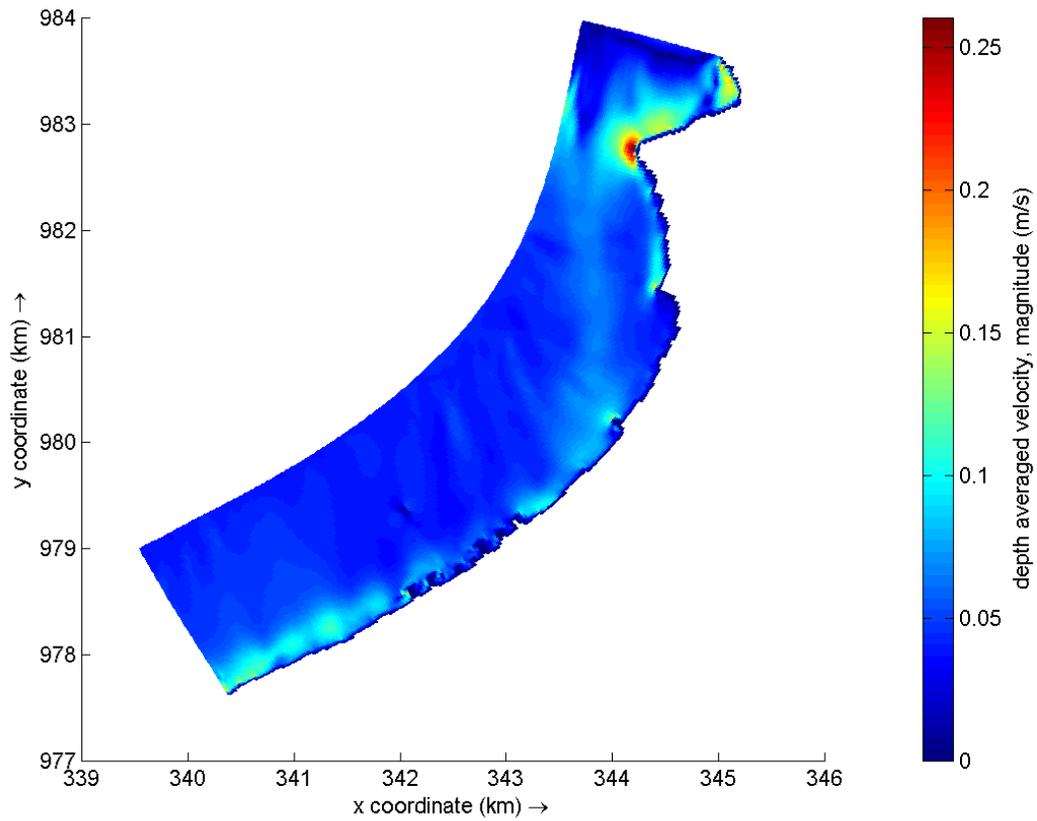
## 9. ANEXOS

### Análisis de coeficiente de Chezy.

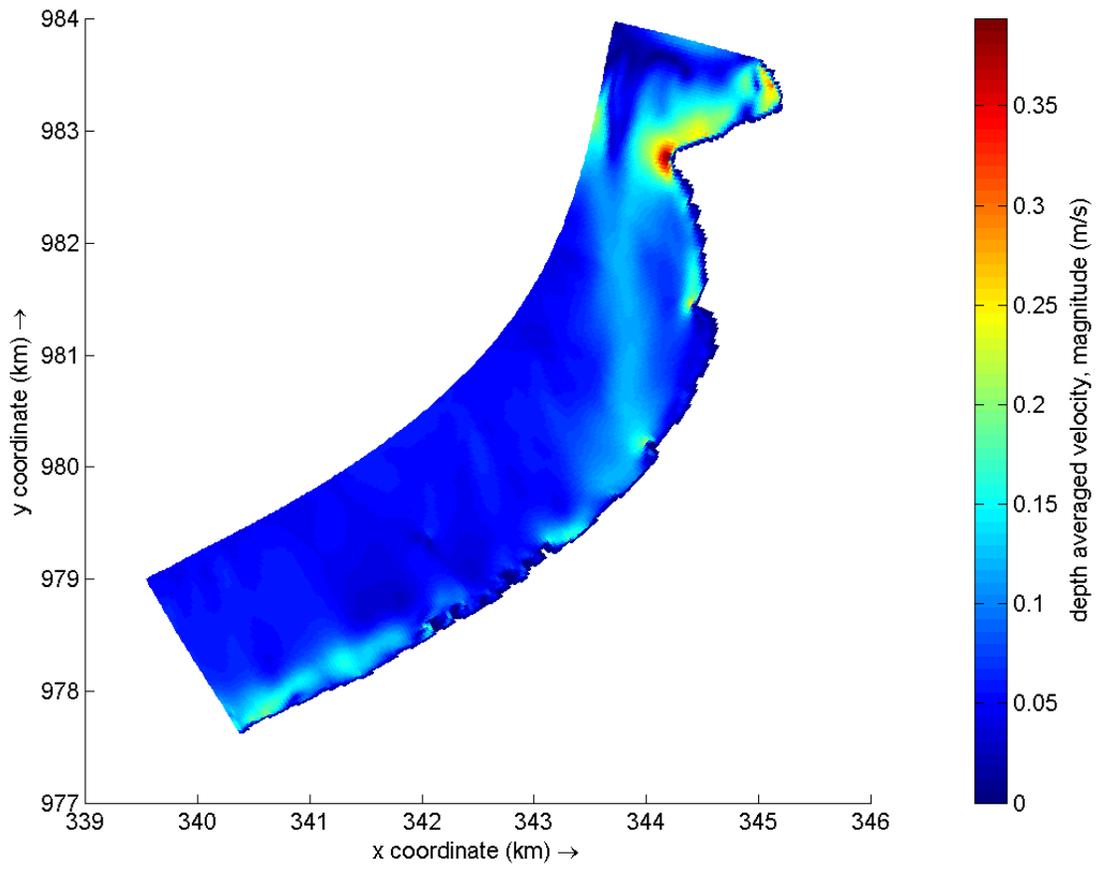
**Anexo A.** Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 10.



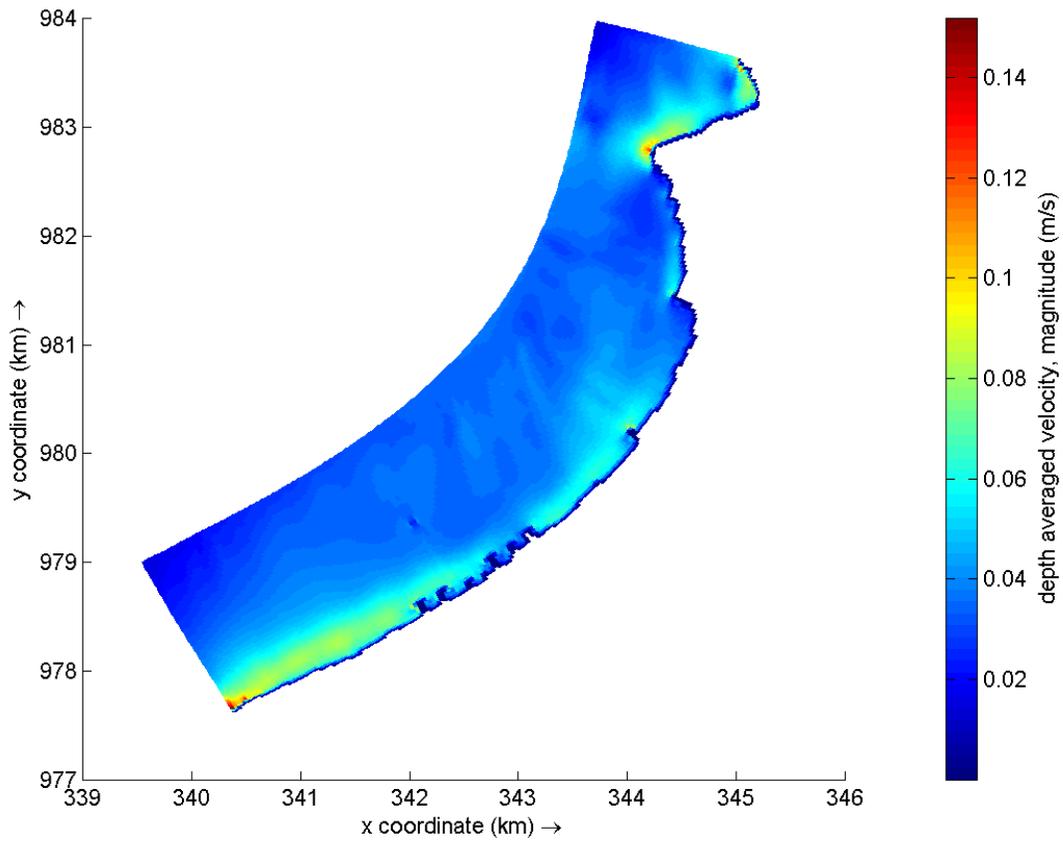
**Anexo B.** Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 20.



**Anexo C.** Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 30.



**Anexo D.** Valor de la corriente promediada en profundidad para un coeficiente Chézy igual a 40.



## Valores de corrientes superficiales para la zona de Río Hobo y Volcán de lodo

*Anexo E. Principales características de las corrientes superficiales en cada sitio de estudio: direcciones predominantes (con porcentaje de ocurrencia), velocidad media y velocidad máxima. Tomado y modificado de Subcomponente de circulación Oceánica.*

| <b>Sector</b>                          | <b>Direcciones predominantes (%)</b> | <b>Velocidad media (m/s)</b> | <b>Velocidad Máxima (m/s)</b> |
|--|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Turbo (punta las vacas)                | NNE (29.6)<br>SE (23.1)              | 0.12                         | 0.31                          |
| Necoclí (Zapata)                       | NE (42.6)<br>ENE (26.0)              | 0.16                         | 0.43                          |
| San Juan de Urabá (Damaquiel y Uveros) | EN (44.7)<br>ENE (30.7)              | 0.19                         | 0.55                          |
| Arboletes (Río Hobo y Volcán de Lodo)  | NE (56.7)                            | 0.19                         | 0.53                          |