



EROSIÓN COSTERA

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados



MAR CARIBE

Erosión costera en el litoral antioqueño

Compilación de resultados

**Erosión costera
en el litoral antioqueño
Compilación de resultados**

Gobernación de Antioquia
Secretaría de Infraestructura Física de Antioquia
DAPARD (Ahora DAGRAN)
Universidad de Antioquia (Entidad líder)
Universidad Nacional (Entidad colaboradora)
Universidad del Norte (Entidad colaboradora)

Editores literarios

Vladimir G Toro (PhD Oceanografía Física)

Carlos Alberto Palacio Tobón (PhD Ingeniería-Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos)

Mauricio Andrés Correa Ochoa (MSc en Ingeniería)

Autores de capítulos

Iván Darío Correa Arango (PhD en Geología Marina) – Capítulo 1°

Rodolfo Silva Casarín (PhD en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos) – Capítulo 1°

Javier Alcántara Carrió (PhD en Ciencias del Mar) – Capítulo 1°

Yina Villamil Velásquez (MSc en Estudios Socioambientales) – Capítulo 2°

Laura Milena Guerrero Cardozo (MSc en Sociología Política) - Capítulo 2°

Myriam Elizabeth Vargas Morales (MSc en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales) – Capítulo 3°

Alba Cecilia Bustamante Caro (MSc en Geomorfología y Suelos) – Capítulo 4°

Alfredo Jaramillo Vélez (MSc en Oceanografía) – Capítulo 5°

Mónica María Zambrano Ortiz (PhD en Ciencias Biológicas) – Capítulo 6°

Juan Camilo Restrepo López (PhD en Ciencias del Mar) – Capítulo 7°

Andrés Fernando Osorio Arias (PhD en Ciencias y Tecnologías Marinas) – Capítulo 7°- Capítulo 8°

Ligia Estela Urrego Giraldo (PhD en Biología) – Capítulo 7°

Juan David Osorio Cano (PhD en Ciencias Marinas) – Capítulo 7°

Maximiliano Arredondo Ramírez (MSc en Ingeniería) – Capítulo 7°

Carlos Alejandro Henao Vargas (Ing. Civil) – Capítulo 7°

María Alejandra Piedrahita Ospina (Ing. Civil) – Capítulo 7°

Juan Fernando Salazar Villegas (PhD en Recursos Hidráulicos) – Capítulo 8°

Yuley Cardona Orozco (PhD en Ciencias Atmosféricas y Oceánicas) – Capítulo 8°

Luisa Fernanda Gutiérrez Acosta (MSc en Ingeniería - Recursos Hidráulicos) - Capítulo 8°

Vladimir Giovanni Toro Valencia (PhD en Oceanografía Física) – Capítulo 8°

Rubén Darío Molina Santamaría (PhD en Ingeniería Ambiental) – Capítulo 8°

José Andrés Posada Marín (MSc en Ingeniería Ambiental) – Capítulo 8°

Rubén Darío Montoya Ramírez (PhD en Recursos Hidráulicos) – Capítulo 8°

Víctor José Saavedra Mejía (MSc en Recursos Hidráulicos) – Capítulo 8°

Gloria Shilliane Londoño Colorado (Ingeniera Oceanográfica) – Capítulo 8°

Keiner José Ruiz Murillo (Ingeniero Oceanográfico) – Capítulo 8°

José Manuel Calderón Burgos (Ingeniero Oceanográfico) – Capítulo 8°

Raúl Andrés Montoya Sánchez (PhD en Ingeniería) – Capítulo 9°

Lennin Flórez-Leiva (MSc en Oceanografía) – Capítulo 10°

Autores corporativos

Secretaría de Infraestructura Física

DAPARD (Ahora DAGRAN)

Gobernación de Antioquia

Coautores

Capítulo 2°

Esneider Julio Bravo (Estudiante Oceanografía)

Oriana García Echavarría (Estudiante Sociología)

Colaboración de: Yurany Andrea Monsalve Vanegas (MSc en Educación y Desarrollo Humano)

Capítulo 3°

Viasleidys Hinestroza Hinestroza (Especialista en Gestión Ambiental)

Laura Arenas Álvarez (Administradora de Empresas)

Cristian Yamid Torres Bedoya (Administrador de Empresas)

Capítulo 4°

Marisol Cardona Sánchez (Ingeniera Geóloga)

Sara Mira Puerta (Geóloga)

Luis Felipe Ortega Molina (MSc en Geomorfología y Suelos)

Isabel López Genes (Ingeniera Oceanográfica)

Juan David Ruiz Parody (Ingeniero Oceanográfico)

Daniela Cifuentes Torres (Ingeniera Oceanográfica)

Jairo Andrés Rojas Vargas (Ingeniero Oceanográfico)

Capítulo 5°

Carlos Eduardo Gutiérrez Mosquera (Ingeniero Civil)

Marleny García Echavarría (Oceanógrafa)

Vicky Stefany Montoya Pacheco (Ingeniera Oceanográfica)

Karen Lorena Llorente Quiñonez – (Ingeniera Oceanográfica)

Stefanía Grisales Loaiza – (Ingeniera Oceanográfica)

Capítulo 6°

Elkin Darío Castellón Castrillón (PhD en Agroquímica)

Nelsy Villalba Negrete (MSc en Ciencias del Mar)

Jorge Luis Atencio Mejía (Oceanógrafo)

María Elena Álvarez Hernández (Estudiante Ecología de zonas costeras)

Yerys Jasbleidy Calderón Goez (Estudiante Ecología de zonas costeras)

Capítulo 7º

Subcomponente Mediciones In Situ

Luis Jesús Otero Díaz (PhD en Ciencias y Tecnologías del Mar)

Juan Carlos Ortiz Royero (PhD en Oceanografía Física)

Oscar Andrés Álvarez Silva (PhD en Ciencias del Mar)

Silvio Raúl Ospino Ortiz (MSc en Física Aplicada)

Andrés Fernando Orejarena Rondón (MSc en Oceanografía Física)

Marco José Vega Fuentes (MSc en Física Aplicada)

Oscar Guillermo Ospino Olivares (Estudiante de Maestría en Física Aplicada)

Carolina Consuegra Sánchez (Estudiante de Maestría en Física Aplicada)

Jairo Eduardo Cueto Fonseca (Estudiante de Maestría en Física Aplicada)

Subcomponente Mediciones en Laboratorio

Ligia Estela Urrego Giraldo (PhD en Biología)

Juan David Osorio Cano (PhD en Ciencias Marinas)

Estefanía Zapata Torres (Ingeniera Oceanográfica)

Daniela Andrea Ortiz Múnera (Ingeniera Oceanográfica)

Mauricio Mosquera Jaraba (Ingeniero Oceanográfico)

Capítulo 8º

Subcomponente Modelación Atmosférica

Leydis Milena Arroyo Quinto (Ingeniera Ambiental)

Samir David Velásquez Lara (Ingeniero Ambiental)

Carlos Mario Doria Martínez (Ingeniero Ambiental)

Subcomponente Modelación Oleaje

Sergio Padilla Álvarez (Ingeniero Oceanográfico)

Ferney Orejuela Moreno (Ingeniero Oceanográfico)

Edwin Yamir Quintero Medina (Ingeniero Oceanográfico)

Subcomponente Modelación Circulación Oceánica

Manuela Higueta Sánchez (Oceanógrafa)

Yury Caterine Calderón Urrego (Oceanógrafa)

Ricardo Andrés Quintana Barranco (Ingeniero Oceanográfico)

Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos

Lina Lucero Campillo Cuervo (Ingeniera Oceanográfica)

Giner Andrey Jiménez Ruiz (Ingeniero Oceanográfica)

Daniel Fernando Valbuena Sierra (Ingeniero Oceanográfico)

Capítulo 9º

Víctor Alejandro Correa Gómez (Ingeniero Oceanográfico)

Capítulo 10º

Fabio Andrés Chaverra Castañeda (Ecólogo de zonas costeras)

Alexis David Quintero Montoya (Ingeniero de Telecomunicaciones)

Cristian Mariano Hincapié Lopera (Ingeniero Oceanográfico)

Jader Yamid Osorio Tabares (Ingeniero Oceanográfico)

Juan Guillermo Torres Córdoba (Ingeniero Oceanográfico)

César Augusto Jaramillo Gutiérrez (Estudiante de Ingeniería de Telecomunicaciones)

Luis Alfredo García Oquendo (Estudiante Ingeniería Oceanográfica)

Apoyo administrativo

Vanessa Rave Valencia - Apoyo administrativo

María Cecilia Castaño Rodríguez - Apoyo Comunicaciones

Lina María Arias Hernández (Estudiante Comunicación Social – Periodismo) – Apoyo Comunicaciones

Juan Fernando Ardila Molina – Apoyo Administrativo - Dibujante

César Augusto Suárez González - Apoyo Logístico

Coordinación Editorial

Sandra María Echeverri García (Estudiante Maestría Gestión Ambiental)

Diseñadores

Grafiservicios SAS

Cítese como:

Referencia final

Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021).

Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados.

(Formatos impreso y digital).

© Medellín / Antioquia / Colombia.

Litografía Grafiservicios S.A.S

Primera cita en el texto (Estilo APA)

(Gobernación de Antioquia [Gob.ANT], Universidad de Antioquia [UdeA], Universidad Nacional [UNAL], Universidad del Norte [UNINORTE], 2021)

Citas posteriores en el texto (Estilo APA)

(Gob.ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021)

Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados es una publicación de carácter científico.

Su edición cuenta con el ISBN 978-628-7519-41-1 para formato impreso y el ISBN 978-628-7519-42-8 para formato digital, que amplía el alcance de la publicación impresa.

Este producto intelectual está protegido por el copyright ©.

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

σ Desviación Estándar

°C Grados centígrados

ADCP Acoustic Doppler Current Profiler (Correntómetro - Perfilador de corrientes de efecto Doppler)

ASCAT Advanced Scatterometer

ASON Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre

CAMS Climate Anomaly Monitoring System
CCPC. Contra Corriente Panamá – Colombia

CIOH Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas

COBE Centennial in situ Observation-Based Estimates

CORPOURABÁ Corporación Para el Desarrollo Sostenible del Urabá

CRU Climate Research Unit

CTD Conductivity – Temperature -Depth Sensor (Sensor de conductividad, temperatura y profundidad)

Da Corregimiento de Damaquiel - Necoclí

D01 Dominio 1

D02 Dominio 2

D03 Dominio 3

DAP Disponibilidad A Pagar

DEF Diciembre, Enero y Febrero

DEFMAM Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo

DEM Modelo de Elevación Digital

DGPS Differential Global Positioning System

DS Desviación estándar

DTF Depósito a Término Fijo

E Dirección Este

ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EFMA Enero, Febrero, Marzo y Abril

e.g Por ejemplo

EM Error Medio

EMC Error Medio Cuadrático

ENE Dirección este-noreste

ENSO El Niño Southern Oscillation

ERA. ECMWF Re-Analysis

ESE Dirección este-sudeste

F Número de Freud.

FMA Febrero, Marzo, Abril

GHCN Global Historical Climatology Network

h Profundidad del agua en el canal

H Altura de ola

he Calado sobre la estructura artificial

Hm Altura de ola media

HAPs Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

Hrms Altura de la ola media cuadrática

hr Profundidad de sumergencia de las raíces del manglar en el canal

Hs Altura de ola significativa

IDW Distancia Inversa Ponderada

i.e Es decir

INVEMAR Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”

JASO Junio, Agosto, Septiembre, Octubre

JJA Junio, Julio, Agosto

JJAS Junio, Julio, Agosto, Septiembre

JJASON Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre

L Longitud de onda

LISST Laser In Situ Scattering and Transmissionmetry (Sensor in situ de difracción láser y transmisión)

MAM Marzo, Abril, Mayo

mg.l⁻¹ Miligramos por litro

MJJAS Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre

MMM Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory

N Dirección Norte

NCAR National Center for Atmospheric Research

NCEP National Centers for Environmental Prediction

NDEFM Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero, Marzo

NE Dirección noreste

NNE Dirección nor-noreste

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

OBS Optical Back-Scattering sensor (Sensor óptico de retro-dispersión)

OCA Grupo de Investigación Océano, Clima y Ambiente

OD Oxígeno Disuelto

pH Potencial de hidrógeno

PLV Punta las Vacas

PSU Unidades Prácticas de Salinidad

R Coeficiente de correlación de Pearson

RH Río Hobo

RRTM Rapid Radiative Transfer Model

RSME Error cuadrático medio

SE Dirección sureste

SON Septiembre, Octubre y Noviembre

T Periodo de ola

TDS Sólidos disueltos totales

TH Temporada húmeda

TIN Red de Triángulos Irregulares

Tp Periodo pico de oleaje

TS Temporada Seca

TT Temporada de Transición

U Corregimiento de Uveros

U10 Componente zonal del viento a 10 metros sobre la superficie

UD University of Delaware

UdeA Universidad de Antioquia

UNAL Universidad Nacional de Colombia

Ur Número de Ursell

Uv Uveros

V10 Componente meridional del viento a 10 metros sobre la superficie

VDL Volcán de Lodo

VPN Valor Presente Neto

Z1 Zona de muestreo 1 (playa)

Z2 Zona de muestreo 2 (marina)

Za Zapata

ZCIT Zona de Convergencia InterTropical

GLOSARIO

Anticlinal: Pliegue cuyo núcleo está constituido por rocas estratigráficamente más antiguas.

Diapiro: Tipo de intrusión en la cual un material dúctil y deformable es forzado a través de las rocas suprayacentes quebradizas. En regiones con esfuerzos tectónicos bajos, el diapiro es en forma de hongo o domo, mientras que, en regiones con altos esfuerzos tectónicos, el material de los diapiros se mueve a lo largo de fracturas inducidas en las rocas circundantes. Cuando el material del diapiro es lodo y sale a superficie, se llama “volcán de lodo”.

Diaclasa: Fractura que separa en dos partes una masa de roca, sin que se produzca desplazamiento a lo largo de ella.

Discordancia: Relación geométrica entre capas de sedimentos que representa un cambio en las condiciones en que se produjo el depósito de sedimentos.

DSAS: “*Digital Shoreline Analysis System*”: Sistema de Análisis Digital para Litorales. Este método compara imágenes de varios años y establece la diferencia de playa ganada o perdida entre los diferentes años.

EPR: “*End Point Rate*” método que estima el comportamiento de la tasa de cambio anual entre dos fechas de la línea de costa, dividiendo la cantidad de costa erosionada o en acreción por el número de años comprendido entre las dos fechas de las imágenes analizadas. La desventaja de este método es que no tiene en cuenta las líneas de costa intermedias.

ESRI: *Environmental Systems Research Institute*: empresa que desarrolla y comercializa software para Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Falla de rumbo: Fractura con desplazamiento horizontal.

Hiato: Intervalo de tiempo geológico medible que no está representado por estratos en ningún lugar determinado.

IGAC: “Instituto Geográfico Agustín Codazzi”: Entidad gubernamental colombiana encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia.

Litificación: Proceso natural mediante el cual un sedimento incoherente se transforma en una roca sedimentaria consolidada, por cementación y compactación durante la diagénesis.

Meteorización: Conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos de alteración y descomposición de una roca en superficie.

Sinclinal: Pliegue cuyo núcleo está constituido por las rocas estratigráficamente más modernas.

USGS: *United States Geological Survey*. Agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos, con cuatro grandes disciplinas científicas: Biología, geografía, geología e hidrología.

AGRADECIMIENTOS

La Universidad de Antioquia agradece a la Gobernación de Antioquia el financiamiento otorgado para la ejecución del proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”.

El equipo de la Componente Social agradece a las comunidades de los centros poblados de río Hobo, en Arboletes, de los corregimientos de Uveros, Damaquiel, en el municipio de San Juan de Urabá, Zapata en el municipio de Necoclí y a sus Juntas de Acción Local, quienes hicieron posible un trabajo articulado y participativo con las familias interesadas en contribuir a la comprensión y el manejo de la problemática de erosión costera.

Asímismo, a las asociaciones en los corregimientos: Corregimiento de Uveros: Asociación ASPAGRAUS, Asociación ASOSAPAR; municipio de Necoclí: Asociación ACUIPAZ, Asociación ASOPOSAGRO; Corregimiento de Damaquiel: Asociación ASOSAPAR, Asociación ASPAGRAUS, Asociación AGRODAMATUR y a la Mesa Ambiental para la Defensa del Volcán en Arboletes, por su participación y aporte de los procesos comunitarios que se han ido desarrollando durante su gestión ciudadana y a la Corporación Cultural El Totumo Encantado por contribuir a la creación de otros puentes y de lenguajes para la construcción de ciencia y participación social en la investigación.

Finalmente, a las Secretarías de planeación e infraestructura de los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y de Arboletes, por su apoyo en la generación de información oportuna y pertinente para mejores resultados.

La Componente Valoración Económica reconoce la participación de los hogares de los centros poblados de Damaquiel y Zapata, así como la de los hogares de las cabeceras municipales de Arboletes, San Juan de Urabá, Necoclí y en el distrito de Turbo, en las encuestas de valoración económica aplicadas entre enero y marzo de 2019.

De igual manera, reconoce el apoyo de la Alcaldía del municipio de Necoclí; del secretario de planeación, Jorge Luis Lozano Anaya, de la Alcaldía de San Juan de Urabá; del secretario de gobierno Emelides Muñoz de la Alcaldía de Turbo y del secretario de turismo, Wilson Medrano, de la Alcaldía de Arboletes. Asímismo en el municipio de Arboletes, resalta la colaboración de Donismer Barrera, técnico operativo del SISBÉN y de Héctor Doria Mier funcionario de CORPOURABÁ.

Por último, a la comunidad de Zapata, Damaquiel, Uveros y Río Hobo por su acompañamiento y apoyo durante las salidas de campo de la componente.

Los integrantes de la Componente Geología, Geomorfología y Suelos agradecen a las personas de las juntas de acción locales y a las comunidades de los sitios Zapata, Damaquiel, Uveros, Río Hobo y volcán de lodo por su apoyo y su compañía, sin su ayuda habría resultado muy difícil el trabajo de campo y la difusión del proyecto, a todos ellos infinitas gracias. También agradecen al personal de la Dirección Marítima y de la Armada Nacional por su colaboración para acceder al sector de punta *Las Vacas*.

La información de Topografía – Batimetría que sustenta este proyecto tan importante para la conservación del litoral antioqueño no habría sido posible sin la participación y sin la cooperación de entidades como Capitanía de Puerto, la Escuela de Combate Fluvial ESCOFLU, la Estación de Guardacostas de Urabá, el Batallón de Infantería de Marina No. 16, CORPOURABÁ, Global International Trading U.S.A. Corp., por su acompañamiento e información suministrada. Así mismo se hace extensivo el agradecimiento a las comunidades y a sus líderes comunitarios quienes amablemente nos acogieron y acompañaron durante las mediciones, brindando el apoyo requerido en la logística del trabajo en campo.

Los miembros de la Componente Ambiental, a la Gobernación de Antioquia por su patrocinio para la ejecución del proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”, en el marco del cual se ejecutó la misma, articulada con otros componentes para realizar una investigación interdisciplinar; a la Universidad de Antioquia por el soporte logístico, de espacios y de personal para el desarrollo adecuado de las diversas actividades relacionadas con

la ejecución del proyecto, a cada uno de los integrantes del equipo de trabajo por su profesionalismo y por su compromiso con el mismo, a las comunidades de cada uno de los lugares donde se adelantaron muestreos y a todas aquellas personas que aportaron a que este proyecto llegara a feliz término.

Los miembros de la Subcomponente Mediciones In Situ agradecen a las comunidades y pescadores de Zapata, Uveros y Arboletes por su invaluable apoyo durante las campañas de campo, pero, fundamentalmente por su calidez, su compañía y su gran calidad humana. Excelsos representantes de una gran región.

La Subcomponente Diseño y Construcción de Dispositivos de Medición Oceanográfica tras una serie actividades de laboratorio y de campo, agradece a la Gobernación de Antioquia por el financiamiento de la investigación, al grupo OCA y al grupo OCEANICOS por el apoyo en todo el proceso de ejecución de las actividades de planificación, laboratorio y campo. A las comunidades de Uveros, San Juan de Urabá, Arboletes y Turbo por su disposición en la fase de campo para realizar la instalación de los equipos.

El trabajo de la Subcomponente Mediciones en Laboratorio se llevó a cabo gracias al apoyo del laboratorio de hidráulica y mecánica de fluidos de la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, donde se usó el canal de olas para ejecutar las modelaciones físicas. De igual forma, gracias al profesor Mauricio Toro por el apoyo como director del laboratorio, a Luis Fernando Ospina como laboratorista y al grupo de investigación OCEANICOS en los que se destaca la participación del estudiante de doctorado Alejandro Cáceres y el estudiante de maestría Johan Kamil Delgado por el apoyo y las recomendaciones pertinentes durante todo el proyecto. Se agradece además el apoyo del profesor Nelson Vanegas Molina como director del laboratorio de procesos de manufactura y al laboratorista Oscar León Mejía por su asesoría y apoyo durante el proceso de soldadura de los modelos paramétricos empleados durante el estudio.

Juan Fernando Salazar, líder de la Subcomponente Modelación Atmosférica, la colaboración de la comunidad de la región de Urabá durante la visita técnica y las reuniones en las cuales participó en el marco del proyecto. Los miembros de la Subcomponente Modelación atmosférica, a la profesora Ángela María Rendón de la Universidad de Antioquia por su colaboración con asuntos técnicos del modelo WRF y los experimentos de modelación y a Sandra María Echeverri por su colaboración con la edición de los informes del proyecto. Todas las simulaciones en el servidor del grupo de investigación GIGA de la Universidad de Antioquia, obtenido con financiación de COLCIENCIAS a través del programa de investigación “Gestión del riesgo asociado con cambio climático y ambiental en cuencas hidrográficas” (UT-GRA, Convocatoria 343 de 2011). Se usaron datos de bases de datos globales o regionales referenciadas en el documento.

La Subcomponente Modelación de Circulación Oceánica, al investigador Julien Jouanno del Laboratoire d’Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, por su apoyo en la configuración y puesta a punto del modelo numérico y al grupo OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín.

La Subcomponente Modelación de Oleaje a las instituciones DIMAR-CIOH y la Corporación Autónoma Regional CORPOURABÁ, que contribuyeron con la información medida in situ, vital para mejorar los resultados obtenidos con los modelos numéricos de oleaje. Las series de oleaje en el golfo se calibraron con datos obtenidos del proyecto “Expedición Caribesur: Antioquia y Chocó costeros” (Osorio et al, 2016).

La Subcomponente Modelación de Sedimentos, a los encargados de los servidores UNICA de la Universidad Nacional de Colombia y del grupo GIGA de la Universidad de Antioquia. Su apoyo y su colaboración fundamental para el desarrollo de los experimentos numéricos.

PRÓLOGO

La erosión costera es un proceso complejo de origen natural y / o antrópico que tiene consecuencias negativas asociadas a la pérdida de ecosistemas, de infraestructura, de viviendas, de terrenos productivos e inclusive ha ocasionado el desplazamiento de algunas comunidades. Este proceso tiene una génesis y una evolución propias de cada sitio, el cual depende, entre otros, de la geología local, de fenómenos climáticos, de estado de los ecosistemas y acciones humanas, por lo tanto, las soluciones deben ser específicas para cada lugar.

En las últimas décadas, el litoral antioqueño ha sufrido un incremento de la erosión y desde entonces se han ejecutado obras costeras con el fin de mitigar este proceso. Sin embargo, estas obras, aunque eventualmente solucionan la erosión de manera puntual, agudizan el problema en sus zonas aledañas. Es por esto que el litoral antioqueño sufrió una invasión de obras costeras inadecuadas, cada una tratando de controlar la erosión para un lugar específico. Las obras que se han construido han generado casos tan graves como el de Arboletes, donde la erosión ha puesto en peligro la vía que comunica a Antioquia con el departamento de Córdoba y sitios naturales insignias del departamento como el volcán de lodo.

Con este panorama, para nada alentador, la Gobernación de Antioquia y la Universidad de Antioquia firmaron en 2017 un convenio marco para el estudio de la erosión costera en el litoral antioqueño. Este convenio fue desarrollado con las Universidades Nacional y del Norte, implementando una investigación para proponer solución en seis sitios del litoral antioqueño con evidencias de erosión avanzada. Son ellos, volcán de lodo y río Hobo en el municipio de Arboletes, Uveros y Damaquiel en el municipio de San Juan de Urabá, Zapata en el municipio de Necoclí y finalmente punta *Las Vacas* en el distrito de Turbo. Por primera vez en Antioquia, y tal vez en Colombia, los estudios incluyeron componentes sociales y biofísicas que cuantificaron desde su campo de experticia las condiciones de cada uno de los sitios. De manera específica, en el tema físico se utilizaron modelos numéricos, así como mediciones de variables con instrumentos oceanográficos de última generación. Esto permitió un estudio integral del problema erosivo con miradas de profesionales expertos en áreas de la geología, ecología, oceanografía y procesos costeros que con la ayuda de la comunidad concertaron las propuestas de solución para cada uno de los sitios.

Las soluciones que se propusieron fueron desarrolladas teniendo en cuenta las condiciones y usos actuales e históricos de cada una de las comunidades. Estas fueron desde obras duras de ingeniería (obras comunes de protección) hasta obras blandas, las cuales son totalmente novedosas y permitirán en un futuro proteger el litoral con obras que se acomodan a la morfología y condiciones físicas de la costa a menores costos. Las soluciones, además, permitieron proponer para algunas comunidades el diseño de malecones con lo cual se espera que sus pobladores puedan recuperar su vocación turística.

Este documento es un texto de consulta para las personas que van a desarrollar futuros estudios costeros en esta región antioqueña. Su metodología, la cual incorpora mediciones de variables oceanográficas y costeras, y el trabajo con la comunidad se sugiere sea consultada por su enfoque novedoso y por los excelentes resultados obtenidos con las comunidades. Aunque las soluciones se proponen para los seis sitios de la costa de Antioquia, de acuerdo a la caracterización gruesa realizada de todo el litoral antioqueño, es posible que algunas de estas puedan ser implementadas no únicamente en Antioquia sino también en Colombia. Es de notar que los diseños propuestos y las obras que se van a construir deben ser actualizadas y monitoreadas, ya que la zona costera es un lugar muy dinámico que involucra la interacción de procesos tierra-mar.

Por último, es de resaltar que estos estudios fueron desarrollados en gran parte con personas de la región que han sido y están siendo formadas por la Universidad de Antioquia. Este documento y los demás productos entregados con este proyecto tienen una alta calidad y demuestran que en Urabá se están formando profesionales de alto nivel, en temas costeros y oceanográficos.

Este libro es la evidencia del compromiso de la Gobernación de Antioquia con las personas, instituciones y comunidades de la región costera, lugar donde está el futuro de Antioquia. Vale la pena anotar que la actual administración departamental en cabeza del DAGRAN y de la Universidad de Antioquia, firmaron un nuevo convenio marco, lo cual ha permitido desarrollar en los últimos años el proyecto “Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño – PIMECLA”, del cual se espera obtener resultados que serán publicados de manera similar en los próximos años.

Gobernación de Antioquia

Tabla de Contenido

Capítulo 1°

Antecedentes

1.1 Contexto físico general de los problemas de erosión de playas y de acantilados del litoral antioqueño	45
1.1.1 Contexto físico general de la región del Urabá-Darién (Costas antioqueña y chocoana)	45
1.1.2 Fisiografía y geomorfología actuales del litoral antioqueño	49
1.1.3 Introducción a las magnitudes y a las causas de la erosión litoral entre Turbo y Arboletes	50
1.2 Referencias	52

Capítulo 2°

Componente Social

2.1 Introducción.....	57
2.1 Metodología	57
2.2 Resultados	58
2.2.1 Establecimiento de un primer orden de ocupación y uso del litoral afectado por la erosión costera	58
2.2.2 Nuevas dinámicas de organización y de ocupación del litoral generados por el conflicto armado y nuevos intereses económicos	60
2.2.3 La población impactada por la erosión costera en la actualidad	63
2.3 Análisis	63
2.4 Conclusiones	65
2.5 Referencias	66

Capítulo 3°

Componente Valoración Económica

3.1 Introducción.....	71
3.2 Métodos	71
3.3 Resultados	75
3.4 Conclusiones	76
3.5 Referencias	77

Capítulo 4°

Componente Geología Y Geotecnia

4.1. Geología regional.....	81
4.1.1 Estructuras de la geología regional	82
4.1.2 Estratigrafía local	83
4.2 Geomorfología.....	83
4.3 Procesos Geomorfológicos: Retroceso de línea de costa.....	84
4.4 Suelos y sedimentos.....	85
4.5 Riesgo y vulnerabilidad a la erosión costera.....	85
4.6 Referencias.....	89

Capítulo 5°

Componente Topografía Batimetría

5.1 Introducción.....	93
5.2 Metodología.....	93
5.2.1 Topografía.....	94
5.2.2 Batimetría.....	94
5.2.3 Software.....	94
5.2.4 Correcciones aplicadas	94
5.2.5 Procesamiento	95
5.3 Resultados y análisis.....	95
5.3.1 Punta Las Vacas	95
5.3 Zapata.....	97
5.3.3 Damaquiel.....	98
5.3.4 Uveros.....	99
5.3.5 Río Hobo	99
5.3.6 Volcán de lodo.....	100
5.4 Conclusiones	101
5.5 Referencias	102

Capítulo 6°

Componente Ambiental

6.1 Introducción.....	105
6.2 Metodología.....	105
6.2.1 Área de estudio.....	105

6.2.2 Toma de muestras y análisis.....	106
6.3 Resultados y discusión.....	106
6.3.1 Parámetros Físico Químicos	107
6.3.1.1 Temperatura	107
6.3.1.2 Salinidad	107
6.3.1.3 Potencial de Hidrógeno (pH)	108
6.3.1.4 Oxígeno disuelto (OD).....	108
6.3.1.5 Sólidos totales disueltos	109
6.3.1.6 Clorofila	109
6.3.1.6 Nutrientes	110
6.3.2 Contaminantes	110
6.3.3 Granulometría	111
6.3.4 Biológicos	111
6.4 Conclusiones.....	115
6.5 Referencias.....	116

Capítulo 7º

Componente Mediciones Físicas

7.1 Subcomponente Mediciones *In Situ*

7.1 Subcomponente Mediciones In Situ	121
7.1.1 Introducción	121
7.1.2 Equipos de medición.....	121
7.1.3 Zonas de medición.....	121
7.1.3.1 Mediciones puntuales.....	121
7.1.3.2 Mediciones en perfiles.....	122
7.1.3.3 Resultados de las mediciones	122
7.1.3.4 Conclusiones.....	123

7.2 Subcomponente

Mediciones En Laboratorio

7.2.1 Introducción	124
7.2.2 Metodología	124
7.2.2.1 Caracterización del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo usado en las modelaciones físicas.....	125
7.2.2.2 Características del clima marítimo	126
7.2.2.3 Estructuras artificiales	128

7.2.2.4 Técnicas de medición en el laboratorio.....	129
7.2.3 Resultados y análisis	130
7.2.3.1 Evolución de la ola a través de un modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo	130
7.2.3.2 Influencia del incremento de la densidad en el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo en la atenuación del oleaje	131
7.2.3.3 Influencia de la altura de ola propagada en la atenuación de oleaje para la modelación con el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo	131
7.2.3.4 Influencia del periodo en la atenuación del oleaje para la modelación con el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo.....	132
7.2.3.5 Velocidades en el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo	132
7.2.3.6 Influencia del periodo sobre las velocidades.....	133
7.2.3.7 Variación de las velocidades a lo largo del canal	133
7.2.3.8 Evolución de la ola a través de estructuras artificiales.....	133
7.2.3.9 Influencia de la altura de ola propagada en la atenuación del oleaje para la modelación con las estructuras artificiales.....	134
7.2.3.10 Influencia del período en la atenuación del oleaje para las modelaciones con las estructuras artificiales	134
7.2.3.11 Influencia de la profundidad en la atenuación del oleaje para la modelación con las estructuras artificiales	135
7.2.3.12 Comparación entre la energía disipada por el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo y las dos estructuras artificiales (cóncava y convexa)	135
7.2.4 Conclusiones.....	135
7.2.5 Referencias.....	138

Capítulo 8º

Componente Modelación Numérica

8.1 Subcomponente Modelación Atmosférica

8.1 Subcomponente Modelación Atmosférica.....	143
8.1.1 Introducción	143
8.1.2 Métodos y resultados.....	144
8.1.3 Referencias.....	146

8.2 Subcomponente Modelación Oleaje

8.2.1 Introducción	147
8.2.2 Zona de estudio	148
8.2.3 Modelación de oleaje	148
8.2.3.1 Recopilación de información secundaria.....	148
8.2.3.2 Metodología de modelación.....	149
8.2.3.2.1 Estrategia de modelación escala oceánica	149
8.2.3.2.2 Modelación de oleaje (Escala Local-golfo de Urabá).....	154
8.2.3.2.3 Variabilidad del oleaje para condiciones ENSO (Fase fría la Niña y cálida el Niño)	158
8.2.4 Referencias.....	160

8.3 Subcomponente Modelación Circulación Oceánica

8.3.1 Introducción	162
8.3.2 Metodología	162
8.3.2.1 Recopilación y procesamiento de información.....	163
8.3.2.2 Configuración del modelo	163
8.3.2.3 Integración del modelo	164
8.3.2.4 Evaluación del modelo	165
* Evaluación con perfiles de corrientes	166
* Evaluación con corrientes en un nivel	167
*Transectos de temperatura y salinidad	168
8.3.3 Análisis de resultados en el golfo de Urabá y el litoral antioqueño.....	168
8.3.4 Conclusiones.....	172
8.3.5 Referencias.....	172

8.4 Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos

8.4.1 Introducción	173
--------------------------	-----

8.4.2 Metodología utilizada.....	173
8.4.2.1 Datos	173
8.4.2.2 Modelos de transporte de sedimentos.....	174
8.4.3 Resultados.....	174
8.4.4 Análisis y conclusiones.....	176
8.4.5 Referencias.....	181

Capítulo 9º Componente Diseño de Obras

9.1 Introducción.....	185
9.1.1 Generalidades de las obras, ventajas y desventajas	185
9.2 Datos	186
9.2.1 Disponibilidad de información.....	186
9.3 Métodos	187
9.4 Resultados	187
9.4.1 Historia, alternativas propuestas	187
9.4.1.1 Volcán de lodo	187
9.4.1.2 Río Hobo.....	189
9.4.1.3 Zapata.....	190
9.4.1.4 Uveros	191
9.4.1.5 Damaquiel	193
9.4.1.6 Punta Las Vacas.....	194
9.5 Conclusiones	196
9.6 Referencias	196

Capítulo 10º Anexos

10.1 Subcomponente Diseño y Construcción de Dispositivos de Medición Oceanográfica	201
10.1.1 Introducción	201
10.1.2 Diseño de instrumentos	201
10.1.3 Resultados.....	203
10.1.4 Referencias	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización geográfica del Urabá-Darién y de la línea de costa de Antioquia

Figura 1.2 Marco tectónico del Urabá-Darién y movimiento relativo de las placas suponiendo que Sur América está inmóvil.

Figura 1.3 Mapa geológico del Urabá-Darién

Figura 1.4 Corte esquemático de la estructura geológica general del Urabá-Darién ubicado unos 100 km al sur del límite sur actual del golfo

Figura 1.5 Esquema general del diapirismo de lodos

Figura 1.6 Ejemplos de manifestaciones diapíricas modernas

Figura 1.7 Cambios eustáticos (globales) del nivel del mar en los últimos 140.000 años

Figura 1.8 Fisiografía general de la región del Darién

Figura 1.9 Esquema general de la ubicación y procesos geológicos, climáticos y oceanográficos activos sobre una franja litoral

Figura 1.10 Esquema de tres tipos básicos de franjas litorales en el borde costero antioqueño

Figura 1.11 A) Fragmento de la cartografía de las costas de Colombia realizada por la expedición del Brigadier español Francisco Fidalgo en el período 1792-1810. B) Carta de Navegación DIMAR: Cabo Tiburón a Isla Fuerte

Figura 1.12 Características generales de la franja litoral entre Turbo y Arboletes y tasas de erosión y acreción en m/año basadas en comparaciones de aerofotografías IGAC del período 1950 - 2004

Figura 1.13 Aspectos básicos de la erosión litoral en el sector punta Rey-Arboletes-río Hobo

Figura 1.14 Evolución morfológica del sector desembocadura del río Turbo-punta Las Vacas entre 1946 y 2009

Figura 1.15 Ubicación de abombamientos y emanaderos de gases asociados a la actividad diapírica en el costado este del golfo y costa abierta hasta la desembocadura del río Mulatos

Figura 1.16 Ubicación de fallamientos normales e inversos (probablemente activos) en el subsuelo del costado este del golfo de Urabá

Figura 1.17 Detalle del contexto tectónico del subsuelo del golfo entre el delta del río Caimán Nuevo y la punta Las Vacas

Figura 2.1 Línea de costa anterior y poblamiento costero. Cartografía social Uveros, transcrita

Figura 2.2 Línea de tiempo construida con información aportada por los diferentes actores estratégicos de las áreas estudiadas

Figura 2.3 Peñangué, Corregimiento de Zapata, 2018

Figura 2.4 Qué implica la participación social en el ordenamiento territorial

Figura 2.5 Cartografías sobre la erosión. Recuerdos y propuestas

Figura 3.1 Principal problema que afecta a río Hobo, Uveros, Damaquiel, Zapata y punta Las Vacas

Figura 3.2 Valor Presente Neto per-cápita1 – VPN (12%) de las obras

de estabilización del problema erosivo en el golfo de Urabá

Figura 3.3 Valor Presente Neto per-cápita1 – VPN (4.54%) de las obras de estabilización del problema erosivo en el golfo de Urabá

Figura 3.4 Valor Presente Neto per-cápita1 – VPN (3%) de las obras de estabilización del problema erosivo en el golfo de Urabá

Figura 4.1 Esquema conceptual de la evolución de la cuenca del Caribe durante el cretáceo tardío

Figura 4.2 Esquema conceptual de la evolución de la Cuenca del Caribe hace 33 m.a

Figura 4.3 Esquema conceptual de la evolución desde el Oligoceno al Plioceno

Figura 4.4 Localización de los cinturones plegados de Sinú, San Jacinto y las provincias geomorfológicas

Figura 4.5 Elementos estructurales mayores de los cinturones plegados Sinú-San Jacinto

Figura 4.6 Geomorfología del litoral Arboletes-Turbo

Figura 4.7 Tasas de acreción y erosión para el litoral entre Arboletes y Turbo

Figura 4.8 Línea de costa, sector volcán de lodo

Figura 4.9 Línea de costa, sector río Hobo

Figura 4.10 Línea de costa, sector Uveros

Figura 4.11 Línea de costa, sector Damaquiel

Figura 4.12 Línea de costa, sector Zapata

Figura 4.13 Línea de costa, sector punta Las Vacas

Figura 4.14 Mapa de riesgo por erosión para volcán de lodo

Figura 4.15 Mapa de riesgo por erosión para el sector del río Hobo

Figura 4.16 Mapa de riesgo por erosión para el sector Uveros

Figura 4.17 Mapa de riesgo por erosión para el sector Damaquiel

Figura 4.18 Mapa de riesgo por erosión para el sector Zapata

Figura 4.19 Mapa de riesgo por erosión para el sector punta Las Vacas

Figura 5.1 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en punta Las Vacas

Figura 5.2 Mapa de pendientes del sitio de estudio punta Las Vacas

Figura 5.3 Principales características topográficas de punta Las Vacas

Figura 5.4 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en Zapata

Figura 5.5 Mapa de pendientes del sitio de estudio Zapata

Figura 5.6 Principales características topográficas de Zapata

Figura 5.7 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en Damaquiel

Figura 5.8 Mapa de pendientes del sitio de estudio Damaquiel

Figura 5.9 Principales características topográficas de Damaquiel

Figura 5.10 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en Uveros

Figura 5.11 Mapa de pendientes del sitio de estudio Uveros

Figura 5.12 Principales características topográficas de Uveros

Figura 5.13 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en río Hobo

Figura 5.14 Mapa de pendientes del sector de estudio río Hobo

Figura 5.15 Principales características topográficas de río Hobo

Figura 5.16 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en volcán de lodo

Figura 5.17 Mapa de pendientes del sector de estudio volcán de lodo

Figura 5.18 Principales características topográficas de volcán de lodo

Figura 6.1 Golfo de Urabá y área correspondiente al litoral antioqueño, en amarillo puntos de muestreo

Figura 6.2 Zonas fijadas para análisis ambiental en los seis sectores establecidos en el sector oriental del golfo de Urabá

Figura 6.3 Valores de temperatura en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.4 Valores de salinidad en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.5 Valores de pH en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.6 Concentración de OD en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.7 Concentración de TDS en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.8 Concentración de clorofila en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.9 Concentración de nitrógeno amoniacal y nitratos en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño

Figura 6.10 Especies fito planctónicas identificadas en aguas costeras del sector oriental del golfo de Urabá

Figura 6.11 Especies zoo planctónicas identificadas en aguas costeras del sector oriental del golfo de Urabá

Figura 6.12 Organismos presentes en los caladeros de pesca

Figura 6.13 Organismos bentónicos encontrados en los sedimentos de las estaciones de muestreo localizadas en el sector oriental del golfo de Urabá

Figura 7.1.1 Puntos de mediciones físicas en la zona de estudio

Figura 7.1.2 Montaje para mediciones puntuales

Figura 7.1.3 Montaje para mediciones en perfiles

Figura 7.2.1 Estructuras duras utilizadas para proteger la línea de costa en el litoral Caribe colombiano

Figura 7.2.2 Canal de oleaje de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Figura 7.2.3 Proceso constructivo de los árboles de mangle

Figura 7.2.4 Modelo físico del mangle para la implementación en el canal de olas

Figura 7.2.5 Distribución de modelos de mangle en el canal para una densidad de 5.6 árboles/m² y para una densidad de 7 árboles/m²

Figura 7.2.6 Boyas sintéticas seleccionadas para extraer el clima marítimo de la región de estudio

Figura 7.2.5 Variación interanual de la altura de ola significativa, Hs (A) y periodo pico, Tp (B) de las boyas sintéticas cercanas al sitio de estudio

Figura 7.2.6 Probabilidad conjunta entre la altura de ola significativa (Hs) y el periodo pico (Tp)

Figura 7.2.7 Proceso constructivo de la estructura cóncava

Figura 7.2.8 Proceso constructivo de la estructura convexa

Figura 7.2.9 Distribución de los sensores resistivos (WG) y del ADV a lo largo del canal

Figura 7.2.10 Evolución general de la altura de la ola media cuadrática (Hrms) a lo largo del canal de olas asociado a H= 0.16 m, T= 2.2 s y h= 0.57 m (hr= 0.22).

Figura 7.2.11 Influencia de la densidad del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo en la disipación de la energía para las alturas de ola de 0.07 m, 0.10 m, 0.13 m, y 0.16 m, para un periodo de 1.8 s, 2.0 s, 2.0 s y 2.2 s respectivamente y evaluada a una profundidad del manglar hr de 0.18 m

Figura 7.2.12 Cambios en la energía disipada en función de la altura de ola para alturas de 0.07 m, 0.10 m, 0.13 m, y 0.16 m, para un periodo de 1.8 s, 2.0 s, 2.0 s y 2.2 s respectivamente, evaluada a una profundidad del manglar hr de 0.18 m

Figura 7.2.13 Perfiles de velocidad, Caso SM1 (H = 0.07 m, T = 1.18 s, h = 0.28) a 1.0 m antes del manglar

Figura 7.2.14 Perfiles de velocidad de los casos SM1 (línea punteada azul) y SM2 (línea punteada roja) con diferente periodo

Figura 7.2.15 Variación de las velocidades a lo largo del canal, para el Caso SM1

Figura 7.2.16 Evolución de la altura de ola a lo largo del canal para el Caso H=0.13 m, T= 2.0 s y h = 0.53 m, considerando la condición con y sin estructura (solo falso fondo)

Figura 7.2.17 Evolución de la altura de ola a lo largo del canal para el Caso H=0.16 m, T= 2.2 s y h = 0.57 m, considerando la condición con y sin estructura (solo falso fondo)

Figura 7.2.18 Cambios en la energía disipada en función de la altura

de ola considerando la estructura artificial 1 (cóncava) y estructura artificial 2 (convexa)

Figura 7.2.19 Cambios en la energía disipada en función del periodo de ola y la profundidad considerando la estructura artificial 1 (cóncava) y estructura artificial 2 (convexa)

Figura 7.2.20 Atenuación de la altura de ola en función del periodo para la misma profundidad y altura de ola incidente para ambas estructuras artificiales

Figura 7.2.21 Comparación de la atenuación de la altura de ola a lo largo del canal considerando el manglar (dos densidades) y las estructuras artificiales para diferentes profundidades

Figura 7.2.22 Atenuación de la altura de ola en función del periodo para la misma profundidad y altura de ola incidente para ambas estructuras artificiales

Figura 7.2.23 Comparación de la atenuación de la altura de ola a lo largo del canal considerando el manglar (dos densidades) y las estructuras artificiales para diferentes profundidades

Figura 8.1.1 Golfo de Urabá visto en los re análisis ERA 5, Era-Interim y en el modelo WRF usado en este estudio

Figura 8.1.2 Localización espacial y topografía de las áreas de interés: A) Dominio mayor que incluye el mar Caribe; y B) Dominio menor en donde se resalta el golfo de Urabá, y la ubicación de dos estaciones en superficie usadas en este estudio

Figura 8.1.3 Un instante de tiempo del viaje de los huracanes Gustav y Hanna por el mar Caribe como se simulan con la implementación de WRF hecha en este estudio

Figura 8.1.4 Comparación entre las componentes del viento superficial (U10 y V10) medidas por ASCAT, simuladas mediante WRF, y obtenidas de los re análisis ERA-Interim y ERA5 en una región que incluye el mar Caribe

Figura 8.1.5 Ciclo anual del viento sobre el mar Caribe simulado mediante el modelo WRF implementado en este estudio

Figura 8.1.6 Comparación entre series de tiempo de la velocidad del viento (panel A) y rosas de viento (panel B) observadas en una estación en Capurganá, y aquellas simuladas por WRF y obtenidas de ERA-Interim y ERA5

Figura 8.1.7 Comparación entre series de tiempo de la velocidad del viento (panel A) y rosas de viento (panel B) observadas en una estación de medición en bahía Colombia y aquellas simuladas por WRF y obtenidas de ERA-Interim y ERA5

Figura 8.2.1 Localización zona de estudio

Figura 8.2.2 A) Boyas con información disponible en el Caribe, B) Localización series de oleaje medidas al interior del golfo y estación meteorológica Turbo_CIOH_AUT

Figura 8.2.3 A) Mallas de modelación de oleaje a escala regional. B) Mallas de modelación de oleaje a escala local (SWAN)

Figura 8.2.4 Esquema propuesto de validación para un modelo de oleaje durante condiciones medias y extremas

Figura 8.2.5 Serie de tiempo modelada y medida para la boya 42056 de la National Data Buoy Center (NDBC) y la boya de Capurganá, durante el proceso inicial de optimización

Figura 8.2.6 Serie de tiempo obtenida para el parámetro óptimo de cds1, curva de optimización del parámetro cds1

Figura 8.2.7 Validación del modelo SWAN y WAVEWATCH III con-

tra mediciones in situ boya DIMAR

Figura 8.2.8 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (Hs) para la región del golfo de Urabá

Figura 8.2.9 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (Tp) para la región del golfo de Urabá

Figura 8.2.10 Ubicación espacial de las boyas virtuales en el golfo de Urabá

Figura 8.2.11 Series de altura de ola significativa (Hs) para las boyas virtuales designadas

Figura 8.2.12 Series de periodo pico (Tp) para las boyas virtuales designadas

Figura 8.2.13 Rosas de oleaje para las boyas virtuales en el golfo de Urabá

Figura 8.2.14 Probabilidad conjunta Hs – Tp, para las boyas virtuales en el golfo de Urabá

Figura 8.2.15 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (Hs) para la región del golfo de Urabá, caso Niño

Figura 8.2.16 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (Hs) para la región del golfo de Urabá, caso Niña

Figura 8.2.17 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (Hs) para la región del golfo de Urabá, caso Normal

Figura 8.2.18 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (Tp) para la región del golfo de Urabá, caso Niño

Figura 8.2.19 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (Tp) para la región del golfo de Urabá, caso Niña

Figura 8.2.20 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (Tp) para la región del golfo de Urabá, caso Normal

Figura 8.3.1 Esquema metodológico para la representación de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá y el litoral antioqueño

Figura 8.3.2 Dominios de cálculo

Figura 8.3.3 Batimetría en el golfo de Urabá de la base de datos ETO-PO2+URABÁ y distribución de los niveles verticales a lo largo del transecto ubicado en la latitud 8.7°N

Figura 8.3.3 Climatología de las corrientes obtenida con los resultados de los últimos 13 años de la integración bajo forzamiento climatológico

Figura 8.3.4 Altura superficial del mar mensual, obtenida con los modelos M1 y M2 y tomada de la base de datos AVISO

Figura 8.3.5 Temperatura superficial del mar mensual, obtenida con los modelos M1 y M2 y tomados de la base de datos Reynolds

Figura 8.3.6 Error cuadrático medio (RMSE) de la temperatura superficial del mar obtenido de la comparación de los resultados de los modelos M1 y M2 con los datos de Reynolds

Figura 8.3.7 Error cuadrático medio (RMSE) de la temperatura superficial del mar obtenido de la comparación de los resultados de los modelos M1 (izquierda) y M2 (derecha) con los datos de Reynolds

Figura 8.3.8 Comparación de la magnitud y dirección de las corrientes en profundidad, medida y simulada con M1 en cada sitio de interés

Figura 8.3.9 Comparación de la magnitud y dirección de las corrientes en profundidad, medida y simulada con M2 en cada sitio de interés

Figura 8.3.10 Rosas de corrientes para los dos sitios de medición (playa La Martina y Akuara), construidas con datos diarios de las salidas de los modelos M1 y M2 y de la información medida en campo

Figura 8.3.11 Ubicación de los transectos donde se realizaron mediciones de temperatura y salinidad

Figura 8.3.12 Transectos de salinidad

Figura 8.3.13 Transectos de temperatura

Figura 8.3.14 Salinidad y corrientes promedio en la capa superficial y en la capa del fondo para las dos épocas climáticas características

Figura 8.3.15 Campo promedio de las corrientes en la capa superficial durante la época húmeda y la época seca para los diferentes sitios de estudio

Figura 8.3.16 Rosas de corrientes en la capa superficial para cada sector

Figura 8.3.17 Campo promedio de las corrientes en la capa del fondo durante la época húmeda y la época seca para los diferentes sitios de estudio

Figura 8.3.18 Rosas de corrientes en la capa del fondo para cada sector

Figura 8.4.1 A) Volcán de lodo. Batimetría final sin obras de protección costera. B) Río Hobo. Batimetría final sin obras de protección costera

Figura 8.4.3 A) Volcán de lodo. Batimetría final con la alternativa 2 (Espigón). B) Río Hobo. Batimetría final con la alternativa 2 (Diques exentos)

Figura 8.4.4 A) Volcán de lodo. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera. B) Río Hobo. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera

Figura 8.4.5 A) Volcán de lodo. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Tómbolos y espolón). B) Río Hobo. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Enrocado)

Figura 8.4.6 A) Volcán de lodo. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Espigón). B) Río Hobo. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Diques exentos)

Figura 8.4.7 A) Damaquiel. Batimetría final sin obras de protección costera. B) Uveros. Batimetría final sin obras de protección costera

Figura 8.4.8 Damaquiel. Batimetría final con la alternativa 1 (Enrocado)

Figura 8.4.9 Zapata. Batimetría final sin obras de protección costera

Figura 8.4.10 Zapata. Batimetría final con la alternativa 1 (Muro de enrocado)

Figura 8.4.11 Zapata. Batimetría final con la alternativa 2 (Muro de enrocado y espolones)

Figura 8.4.12 Zapata. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera

Figura 8.4.13 Zapata. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Muro de enrocado)

Figura 8.4.14 Zapata. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Muro de enrocado y espolones)

Figura 8.4.15 Punta Las Vacas. Batimetría final sin obras de protección costera

Figura 8.4.16 Punta Las Vacas. Batimetría final con la alternativa 1 (Muro de tablestacas, muro de enrocado y celdas experimentales)

Figura 8.4.17 Punta Las Vacas. Batimetría final con la alternativa 2 (Muro de tablestacas y muro de enrocado)

Figura 8.4.18 Punta Las Vacas. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera

Figura 8.4.19 Punta Las Vacas. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Muro de tablestacas, muro de enrocado y celdas experimentales)

Figura 8.4.20 Punta Las Vacas. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Muro de tablestacas y muro de enrocado)

Figura 9.1 Ubicación de las obras en la zona del volcán de lodo, municipio de Arboletes

Figura 9.2 Diseño esquemático del Tómbolo 1 con dimensiones actualizadas

Figura 9.3 Diseño esquemático de la sección vial 1 con dimensiones actualizadas

Figura 9.4 Acanilado en la región de río Hobo

Figura 9.5 Obras propuestas para combatir la erosión costera en la zona del río Hobo

Figura 9.6 Diseño esquemático del muro de enrocados

Figura 9.7 Diseño del revestimiento para la defensa fluvial en la zona de Zapata

Figura 9.8 Ejemplo de un terreno abatido cerca de la zona de Arboletes

Figura 9.9 Ubicación de las obras en la zona de Zapata

Figura 9.10 Localización de las dunas en el corregimiento de Uveros

Figura 9.11 Esquema de diseño de una duna artificial compuesta por sacos de arena

Figura 9.12 Espolón en la zona de Uveros

Figura 9.13 Estimación media de la dimensión del espolón

Figura 9.14 Localización aproximada del muro de enrocados en la zona de Damaquiel

Figura 9.15 Antiguo espolón con una longitud de 92.2 m

Figura 9.16 Diseño esquemático del espolón a reconstruir

Figura 9.17 Diseño del muro de rocas para distintos ángulos de talud del terreno

Figura 9.18 Diseño del muro de enrocados

Figura 9.19 Ubicación de las obras en la zona de punta Las Vacas

Figura 9.20 Esquema de diseño del muro de tablestaca con el muro de

enrocados en una profundidad de fondo de 1.8 m

Figura 9.21 Esquema tridimensional de la tablestaca y el muro de usando GEO5

Figura 9.22 Variación de la profundidad en la localización del muro de tablestaca

Figura 9.23 Variación en profundidad de la presión lateral, presión total, momento, fuerza, rotación y la desviación de la tablestaca

Figura 9.24 Esquema del diseño de la celda experimental

Figura 10.1 Área de estudio de muestreo para evaluar el proceso erosivo, región de Urabá. Nótese que los sitios muestreados representan el borde oriental del golfo de Urabá, Antioquia

Figura 10.2 Aspecto interno, externo y modificaciones electrónicas y físicas en la boya oceanográfica

Figura 10.3 Sensor de presión en la columna de agua. A) Instrumento instalado en el agua a 7 m de profundidad, B) Vista general del instrumento bajo configuración

Figura 10.4 A) Valores registrados de altura de la ola y B) temperatura en sitios de la región de Urabá.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Marco de estimación de beneficios para golfo de Urabá antioqueño. Uveros: Residentes y turistas

Tabla 3.2 Marco de estimación de beneficios para golfo de Urabá antioqueño. Damaquiel - Zapata

Tabla 3.3 Marco de estimación de beneficios para el golfo de Urabá antioqueño. Punta Las Vacas – Río Hobo

Tabla 3.4 Marco de estimación de beneficios para golfo de Urabá antioqueño. Volcán de lodo

Tabla 3.5 Población y muestra para estimación de beneficios derivados de las obras de estabilización del proceso erosivo en el golfo de Urabá antioqueño

Tabla 3.6 Valor económico de los beneficios derivados de las obras de estabilización del proceso erosivo en diferentes puntos del golfo de Urabá antioqueño

Tabla 4.1 Valores de retroceso de línea de costa para cada sitio de estudio del proyecto

Tabla 5.1 Descripción de las correcciones aplicadas para cada zona de estudio

Tabla 5.2 Nodos de control seleccionados para cada zona

Tabla 5.3 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector punta Las Vacas

Tabla 5.4 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector Zapata

Tabla 5.5 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector Damaquiel

Tabla 5.6 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector Uveros

Tabla 5.7 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector río Hobo

Tabla 5.8 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topográfico en volcán de lodo

Tabla 6.1 Concentración de metales pesados en los sitios de muestreo establecidos en el litoral antioqueño

Tabla 6.2 Clasificación de las especies identificadas en el análisis de la comunidad fitoplanctónica en las tres temporadas climáticas evaluadas

Tabla 6.3 Especies asociadas al necton en caladeros de pesca del sector de Zapata y punta Las Vacas

Tabla 6.4 Riqueza y abundancia de organismos bentónicos en sedimentos de la línea de costa Antioqueña

Tabla 7.1.1 Resumen de resultados obtenidos en las campañas de medición

Tabla 7.2.1 Criterios que deben cumplir los casos de oleaje simulados

Tabla 7.2.3 Casos seleccionados para prototipo y modelo

Tabla 7.2.4 Valores promedios obtenidos para la atenuación de la altura de ola en función del periodo para la misma profundidad del agua dentro del manglar (0.18 m) y altura de ola incidente

Tabla 7.2.5 Casos de propagación empleados durante las mediciones de velocidad

Tabla 7.2.6 Disipación de la energía del oleaje en función del periodo para la misma profundidad y altura de ola incidente para diferentes calados (he) sobre las estructuras artificiales

Tabla 7.2.7 Valores obtenidos para la disipación de la energía del oleaje en porcentaje para los diferentes casos modelados para los calados evaluados (he) sobre la estructura artificial y las profundidades sobre el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo (hr)

Tabla 8.2.1 Características principales de los puntos con información disponible de oleaje en el golfo de Urabá

Tabla 8.2.2 Especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones a escala oceánica con el modelo WWIII

Tabla 8.2.3 Escenarios definidos y tiempos de modelación con base a las mallas y dominios definidos en la tabla 8.2.2

Tabla 8.2.4 Tiempos de cómputo para los casos presentados en la tabla 8.2.3

Tabla 8.2.5 Valores iniciales de prueba para el proceso de optimización de parámetros

Tabla 8.3.1 Características de las bases de datos utilizadas para la configuración del modelo oceánico de circulación

Tabla 8.3.2 Principales esquemas, parametrizaciones y tipos de fronteras

Tabla 8.3.3 Características de las bases de datos utilizadas para la evaluación de los modelos M1 y M2 en superficie

Tabla 8.3.4 Puntos de medición de perfiles de corrientes por zona

Tabla 8.3.5 Puntos de medición de corrientes

Tabla 8.3.6 Principales características de las corrientes superficiales en cada sitio de estudio: direcciones predominantes (con porcentaje de ocurrencia), velocidad media y velocidad máxima

Tabla 8.3.7 Principales características de las corrientes en la capa del fondo en cada sitio de estudio: direcciones predominantes (con porcentaje de ocurrencia), velocidad media y velocidad máxima

Tabla 9.1 Altura de coronación inicial (AyI), altura de coronación final (UdeA), profundidad media (Z), altura total de la estructura (H) y largo de cada estructura (L)

Tabla 9.2 Pesos específicos y ángulo de fricción utilizados en la determinación de la profundidad de enterramiento

Tabla 9.3 Tabla de frecuencias absolutas de la variación del perfil batimétrico en la obra de tablestacado

Tabla 10.1 Tasas de acreción o erosión medidas en el proyecto de erosión costera, comparando fotografías de diferentes años con las tomadas en el 2018 en el marco del proyecto

Consideraciones

A continuación, se consignan algunas consideraciones importantes sobre los resultados del proyecto, se sugiere se tengan en cuenta al leer este libro.

Expertos nacionales y extranjeros

El manejo y la gestión del desarrollo de los litorales antioqueños, ha sido otro de los temas fundamentales del proyecto, dado que está ampliamente demostrado que, las playas de arena o grava proveen numerosos bienes y servicios ecosistémicos como los son la protección de acantilados y de manglares ante eventos extremos, la formación y almacenamiento de reservas sedimentarias, los usos recreativos y la protección de los hábitats de especies endémicas o en alguna categoría de riesgo. En última instancia, los sistemas de playas y acantilados se asocian a balances sedimentarios resultantes de numerosas interacciones de procesos biofísicos complejos que actúan a varias escalas de tiempo. Estos procesos e interacciones deben identificarse y evaluarse al máximo posible, más aún considerando las nuevas influencias e impactos asociados al cambio climático global. De interés fundamental es el conocer e interpretar las causas y los cambios en factores como los aportes de sedimentos, la extensión presente y futura de las áreas inundables, la salinización de suelos y acuíferos y las zonaciones y migraciones de los diversos ecosistemas. Obviamente, es completamente evidente que el desarrollo desordenado de obras y actividades en el litoral ha afectado y continuaría alterando estos procesos, aumentando la degradación y/o pérdida definitiva de sus bienes y servicios ecosistémicos (SEMARNAT 2013).

Según Silva et al. 2014, la gestión integrada de las zonas marinas y costeras debe ser integral, adaptativa, participativa y fundamentada en la mejor información científica disponible. En este contexto, la caracterización de las costas es necesaria para obtener bases técnicas que sustenten las políticas públicas y los programas específicos para la protección y el manejo sustentable.

El manejo integrado de la zona costera (MIZC) es un proceso continuo y dinámico de participación y de gestión que articula estado y sociedad para contribuir al ordenamiento territorial y al adecuado uso de la costa, en pro de la calidad de vida de las comunidades. Por estas razones, el Proyecto *Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia* no debe considerarse como un evento aislado, sino como el inicio de un programa de investigación y de desarrollo que considera como esenciales los siguientes aspectos MIZC (Silva et al., 2014):

- 1) La reducción de la vulnerabilidad de la zona costera ante sus riesgos naturales (erosión, inundaciones, salinización de acuíferos, áreas y recurrencia de inundaciones).
- 2) La preservación de la biodiversidad costero marina y

de los procesos ecológicos esenciales, incluyendo los flujos de nutrientes y de energía.

- 3) El sostenimiento de los servicios provistos por los ecosistemas costero marinos, incluyendo el mantenimiento de la calidad de la atmósfera, el mejoramiento de la calidad del agua y el control de los ciclos hidrológicos (considerando las inundaciones).
- 4) La preservación y mejora de la calidad de vida de las comunidades litorales, con énfasis en el desarrollo sustentable de las áreas marino costeras.
- 5) La recuperación y rehabilitación de las zonas afectadas y degradadas.
- 6) El aprovechamiento correcto de los recursos costeros sin conflictos entre usos y procesos naturales.

El logro de estos objetivos requiere, necesariamente de los siguientes actividades y compromisos:

- 1) Monitoreos sistemáticos para continuar generando una sólida información de base (datos y mediciones de procesos naturales, sociales y económicos) que permitan la construcción de indicadores y pueda establecer una base sólida para la adecuada toma de decisiones.
- 2) Metas y políticas basadas en procesos participativos.
- 3) Medios legales, institucionales, técnicos, financieros y humanos para alcanzar las metas y las políticas establecidas.

Dada la complejidad de los procesos biofísicos, es muy importante mejorar el entendimiento de las relaciones entre el capital natural y el bienestar humano para adecuar la visión tradicional de la conservación de la naturaleza y del desarrollo como actividades incompatibles. Aunque el concepto “infraestructura verde” no tiene una definición universal porque que depende, principalmente, de las condiciones ecológicas y socioeconómicas de cada lugar (Silva et al., 2017), en el marco del Proyecto y con fundamento en el estado de conocimiento, se priorizaron este tipo de soluciones. Es conveniente destacar que, tanto la infraestructura verde como la infraestructura tradicional tratan de resolver problemas que afectan los intereses humanos. Sin embargo, a diferencia de la infraestructura tradicional (la cual toma en cuenta sólo factores socioeconómicos y políticos), la infraestructura verde tiene principios multifuncionales: En otras palabras, tiene como base los conceptos de conectividad, multifuncionalidad, integración y multi escala (Davies y Laforteza, 2017).

En la zona costera, la infraestructura verde está estrechamente ligada a las actividades de conservación, de restauración y de protección de sus ecosistemas. Para que su implementación funcione, es necesaria una correcta planificación y gestión ambiental que hagan posible desarrollar y obtener resultados benéficos a los niveles ambiental, económico y social (Luque et al., 2018). El concepto de infraestructura verde usado en este Proyecto abarca aspectos tan amplios y contrastantes como: La recuperación del funcio-

namiento de ecosistemas naturales, la creación de ecosistemas artificiales, las obras de ingeniería que dependen del funcionamiento de los ecosistemas circundantes, las obras de ingeniería tradicional con adaptaciones para disminuir el impacto ambiental, y las obras de corrección de estructuras que han causado daño en el medioambiente. En resumen, lo que se busca es integrar la infraestructura a los flujos naturales, teniendo como marco la planificación para reunir a las partes interesadas; utilizar como base de decisión el conocimiento científico y las buenas prácticas, y así crear mecanismos para la toma de decisiones y, establecer fuertes mecanismos de gobernanza; desarrollar una clara misión y visión e incluir voluntad y apoyo político para garantizar la integración de la sociedad a lo largo del proceso.

Según Silva et al., 2017, una vez que una comunidad elige comenzar a planificar y a desarrollar proyectos de infraestructura verde, el procedimiento seguido en el proyecto puede ayudar a garantizar el éxito en el desarrollo, en la preservación de los ecosistemas naturales para permitir una reducción del riesgo en la zona costera.

Componente Social

La relación de las actividades antrópicas y de las decisiones políticas frente al acceso a los servicios y el ordenamiento territorial, se evidencia en la agudización del problema de erosión, a causa, entre otras, de focos de desagüe de aguas residuales, o caños con alto contenido de proteínas, derivado del desecho de actividades humanas; asimismo, la extensión de áreas de hábitat humano, las intervenciones con materiales duros sobre las costas, como muelles, espolones, barreras de roca y cemento como parte de la costa formada por el mar, nos evidencian esta relación de actividades antrópicas y la erosión. Por ende, es importante considerar estrategias, planes, políticas e infraestructura para la regulación de los usos de los recursos disponibles para la población costera. Desde una visión orgánica del flujo de recursos, es pertinente diseñar instrumentos de planeación y de control de las salidas de estos recursos que se originan en el mismo territorio, como agua, tierras, maderas, y, de residuos sólidos inorgánicos. La manera como se administran o se deciden que salgan de nuevo al ecosistema después de usarlos, incide en cómo van almacenándose o transformándose dentro del paisaje.

Para un manejo real a la erosión costera, entendiéndola como una problemática socioambiental y no solo física, se sugiere actualizar el ordenamiento territorial de las áreas rurales de los municipios costeros, contemplando los usos de la población que los habita y reconociendo el contexto social actual, y a quienes ejercen y proyectan actividades económicas relacionadas con el territorio y sus recursos, a mediana y gran escala. Sin olvidar, que debe actualizarse la información predial y catastral, reconociendo lo que se ha llevado el mar y delimitando las zonas de uso para viviendas; evidentemente no es tan fácil como parece,

porque esto carga con el candente problema insoluto de la propiedad de la tierra y de los territorios colectivos, los despojos y la desarticulación de información catastral.

Por otra parte, dentro de las alternativas que se construyeron, es necesario que las compensaciones sean socializadas, validadas nuevamente frente al proceso de implementación con las comunidades y con las personas correspondientes, tal como se detalla en el ítem de propuestas de compensaciones de cada informe de sitio. Estas responden a tres categorías: pérdida de terreno, pérdida de actividad económica y pérdida de vivienda.

Finalmente, las soluciones implican valorar distintos niveles de riesgo frente a criterios políticos y económicos de priorización. Por ende, se recomienda priorizar el orden de implementación de las obras a partir de:

1. Riesgo a la población
2. Impacto en proyectos o actividades económicas de escala más amplia
3. Mayor impacto en su contexto ambiental
4. Mayor impacto en contexto o dinámica geológica próxima
5. Costo de la obra

Componente Valoración Económica

Para el caso de *volcán de lodo*, la estimación de beneficios se realizó utilizando el método de transferencia de beneficios, que considera supuestos fuertes en la estimación, arrojando resultados que pueden variar significativamente de los logrados mediante una estimación directa. El uso del resultado debe hacerse con mucha precaución y siempre teniendo en cuenta las limitaciones del ejercicio.

Para el caso de punta *Las Vacas*, los beneficios obtenidos deben considerar que el 50% de los hogares manifestaron no estar dispuestos a hacer aportes para las obras de estabilización en este sector, por lo que potencialmente estos beneficios podrían ser menores. Las razones por las cuales no se hacían aportes correspondían principalmente a que no se percibían beneficios de estas obras, dada la distancia donde se encontraba el hogar (por ejemplo, las cabeceras municipales de Arboletes, Necoclí y San Juan de Urabá) y porque existían muchas respuestas de protesta que indicaban que “eso era una responsabilidad del gobierno”, por ejemplo.

Para el caso de Damaquiel, el cambio en el bienestar fue abordado, tomando en consideración el avance del proceso erosivo en ausencia de la obra de estabilización propuesta, a una tasa constante de erosión durante la vida útil de la obra. Un análisis más amplio puede considerar la proyección de la tasa de erosión, considerando aspectos biofísicos de la zona, para identificar en 50 años cuántos metros se erosionaría y tener así una aproximación más robusta de los beneficios. De igual forma es importante

señalar que los valores promedio de las viviendas fueron estimados sin tomar en cuenta las características singulares de cada vivienda (por ejemplo, número de habitaciones, metros cuadrados, tiempo de construcción), esto hace que los resultados sean limitados en ese sentido. Se recomienda aplicar un estudio de valoración contingente para mejorar la aproximación de los beneficios de la obra.

Para el caso de *Uveros* es importante tomar en consideración que dentro de los visitantes de la playa puede haber residentes del centro poblado, por ello se debería realizar una estimación anidada para estos visitantes, que considere su reporte de disponibilidad a pagar en un contexto de doble demanda, dado que se benefician simultáneamente de los servicios de protección costera (inundaciones) como del servicio de recreación.

Para todos los sitios de estudio, los datos municipales y de sectores urbanos y rurales se encuentran desactualizados y en muchos casos incompletos, lo cual significó el uso de diversos supuestos para la estimación del número de hogares, de residentes y de turistas en algunos sitios.

De igual forma, en ninguno de los sitios la evaluación económica consideró estimaciones de las partes externas de las obras, dadas las restricciones presupuestales y de tiempo. Al respecto, se recomienda en primera instancia aplicar una evaluación ambiental de los ecosistemas que impactarían las obras, así como un análisis de los servicios ecosistémicos que se afectarían por las mismas. Una vez conocidos los servicios ecosistémicos impactados, se recomienda abordar una estimación del cambio en el bienestar originado por el cambio en la provisión de estos servicios (positiva o negativa) debido a esta obra de estabilización. Estas estimaciones permiten lograr una evaluación más objetiva de las obras. Asimismo, para todos los sitios los escenarios de valoración económica se realizaron sobre el penúltimo diseño aprobado, en razón a que debía avanzarse en el desarrollo de la componente, simultáneamente al diseño de la obra. En este sentido se recomienda considerar una nueva valoración económica con los diseños finales, a fin de que sean más consistentes para la toma de decisiones.

Los resultados de esta evaluación aquí presentados, son un instrumento básico para la toma de decisiones en consideración del criterio económico. Deben incluirse los costos y beneficios de las externalidades de las obras, así como los costos de oportunidad, como criterio económico inequívoco. Asimismo, no debe considerarse como único criterio de decisión, sino como un criterio complementario a los criterios técnicos, sociales y ambientales disponibles.

Componente Geología y Geotecnia

Para los tramos de mayores cambios en la línea de costa, se recomienda un esquema de monitoreo frecuente, si es posible, semanal. Este monitoreo debe incluir fotografías aéreas tomadas con drones y puntos de control refe-

ridos en un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS). Los sobrevuelos con los drones y los puntos de control con el DGPS captan a escala detallada la variación morfológica de las playas y acantilados en los sectores más inestables. Para los tramos con cambios menores se plantea el monitoreo con una frecuencia menor (mensual).

El monitoreo sistemático de los diferentes tramos de costa permitirá acopiar una base de datos para modelar y establecer patrones de variación morfológica y diferenciar la importancia de los controles naturales y antrópicos causantes del retroceso o de la acreción de la línea de costa. Se sugiere implementar el sistema de monitoreo de la línea de costa con la participación de las comunidades; así estas podrán ser parte activa de las soluciones propuestas para prevenir, disminuir o recuperar los tramos litorales afectados por la erosión marina y subaérea.

Se recomienda continuar los estudios sistemáticos sobre las características del diapiroismo de lodos en la zona, incluyendo sus amenazas, los riesgos y los impactos. Adicionalmente, implementar sistemas de protección del suelo en la parte superior de las terrazas, con el fin de disminuir la erosión por aguas de escorrentía y servidas. Para estas últimas, es urgente implementar sistemas de tratamiento, pues aparte de que están contribuyendo con la erosión por escorrentía son una fuente severa de contaminación del suelo y de la calidad del agua de los ríos, playas y del mar.

En el futuro se espera tener fotografías aéreas de la mayor resolución sobre las playas y áreas adyacentes de punta *Las Vacas*. No fue posible tomarlas en este proyecto por inconvenientes para adquirir los permisos, por tratarse de una zona de seguridad militar.

Componente Topografía Batimetría

Los resultados presentados son la base para la toma de decisiones a corto plazo, sobre las alternativas de mitigación de la erosión costera en los lugares de estudio; dada la alta dinámica de los sistemas costeros se recomienda que al momento de construir la obra se haga una verificación de la ubicación de la línea de costa mediante fotografía aérea o GPS Diferencial de cada sitio particular y ajustar los diseños al entorno actual. Por otro lado, se recomienda que cada municipio ejecute acciones de control de taludes y manejo de aguas superficiales en lugares donde se presentan taludes, como *volcán de lodo, río Hobo, Damaquiel y Zapata*, toda vez que el retroceso de la línea de costa se debe tanto a los procesos costeros, como subaéreos en el terreno. Por último, todas las obras de protección costera requieren monitoreo periódico, principalmente en el aspecto topo batimétrico y fotogramétrico para obtener conclusiones certeras respecto al funcionamiento o no, de cada alternativa y así tomar las medidas pertinentes a tiempo. Adicionalmente, en el litoral del departamento de Antioquia hacen falta más puntos geodésicos que permitan, no solo mayor precisión en las mediciones topo batimétricas que se realicen, sino

también un monitoreo en el tiempo sobre los posibles procesos de subsidencia que pueden agudizar el problema de erosión, como puede ser el caso de punta *Las Vacas*.

Componente Mediciones Físicas

Subcomponente

Mediciones en Laboratorio

Es importante considerar que este Proyecto hace parte de un primer esfuerzo departamental, para estudiar procesos físicos en un canal de olas asociados al estudio de los manglares y su papel como estructuras naturales de protección costera. Los resultados son satisfactorios en términos de ilustrar el comportamiento hidrodinámico de las estructuras naturales y la posibilidad de controlar procesos como la erosión en las playas, a partir de la disminución de la energía del oleaje disipada por el ecosistema. Se sugieren nuevos ensayos, incluyendo la retención o el transporte de sedimentos que complementen el entendimiento de los procesos físicos y biológicos, asociados a la presencia de las raíces del mangle. Es importante resaltar que los resultados obtenidos son propios de las características marítimas de las costas del mar de Antioquia, propiamente de la región de Urabá; además, las características morfo métricas del manglar utilizado hacen referencia a las comunidades que se encuentran en dicha región, por ello los resultados obtenidos pueden variar si se cambian estas características físicas y morfológicas del sitio de estudio.

Componente Modelación Numérica

Subcomponente

Modelación Atmosférica

Con el desarrollo del Proyecto se obtuvo un análisis cuidadoso de la dinámica del viento en la región del golfo de Urabá, usando herramientas y técnicas en el estado del arte. Sin embargo, hay aspectos que el alcance y duración del proyecto no permitieron analizar y pueden ser relevantes para el futuro de la zona costera. Particularmente importantes son los impactos potenciales del cambio climático sobre estas zonas (Solomon et al., 2007).

Uno de los principales impactos del cambio climático que se ha venido observando y se espera se intensifique en el futuro, es el aumento del nivel del mar (Nerem et al., 2018). Qué tanto pueda ser ese aumento es incierto, en parte porque no solo depende de fenómenos naturales sino también de decisiones políticas como las que se toman en torno al Acuerdo de París y futuros posibles acuerdos sobre cambio climático. Variaciones en el nivel del mar pueden tener impactos muy importantes sobre, por ejemplo, la infraestructura (e.g. Neumann et al., 2015) y la erosión en zonas costeras (Leatherman et al., 2000).

Otro de los posibles impactos del cambio climático es la intensificación de eventos meteorológicos y climáticos extremos (Meehl et al., 2000; Seneviratne et al., 2012). Por ejemplo, es posible que el cambio climático conduzca a la intensificación de los ciclones tropicales (Knutson et al., 2010) o las fases extremas del ENSO, es decir, El Niño (Cai et al., 2014) y la Niña (Cai et al., 2015). Los eventos extremos asociados con estas dinámicas podrían tener impactos muy importantes sobre la región costera del golfo de Urabá.

Basado en este tipo de consideraciones, el análisis obtenido hasta el momento debe entenderse como un paso (parcial pero importante) hacia adelante (y sin precedentes para la región de Urabá), en la obtención de la evidencia científica necesaria para soportar de una manera cada vez mejor la toma de decisiones sobre el desarrollo de la región costera. En opinión de los autores, continuar con estos estudios es altamente recomendable. En este sentido, los esfuerzos continuados permiten el desarrollo de sistemas de soporte a la toma de decisiones que se vuelven más confiables con el desarrollo de nuevos estudios, en conjunto con la implementación de sistemas de medición y de modelación en el mediano y largo plazo.

Subcomponente

Modelación Circulación Oceánica:

Durante el Proyecto se integró el modelo CROCO para la estimación y para el entendimiento de las corrientes al interior del golfo de Urabá, utilizando información de reanálisis para la definición de las condiciones de frontera. Es importante tener en cuenta que estos datos, al tener una resolución espacial baja, impiden el uso de una mayor resolución en el modelo, por ello no fue posible reproducir procesos de menor escala que podrían influir en la dinámica global del golfo.

Los resultados del modelo fueron evaluados mediante comparación con los datos de corrientes medidos por la componente de mediciones en campo, en las zonas de interés y aunque estas comparaciones fueron satisfactorias debe tenerse en cuenta que estas mediciones fueron tomadas en puntos muy cercanos a la costa y por lo tanto a muy poca profundidad y los periodos de registro son muy cortos (24 horas), por lo que no es preciso afirmar que representan la variabilidad temporal y espacial de las corrientes en cada zona.

Los resultados también fueron evaluados con datos de corrientes medidos en puntos ubicados al interior del golfo, que cuentan con un mayor registro de información. Sin embargo, esta evaluación no fue tan acertada como la realizada en los puntos de interés, lo que confirmó que la dinámica oceánica al interior del golfo es bastante compleja y que es necesario incluir otros procesos que tienen influencia, pero que aún no se comprenden muy bien. Se requiere entonces continuar con el estudio de dichos pro-

cesos para avanzar en el entendimiento de la dinámica de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá.

Subcomponente Modelación Oleaje

Las condiciones de frontera para el modelo de oleaje representan uno de los aspectos más importantes. Para el caso del golfo de Urabá se determinaron las condiciones de frontera, al modelo de oleaje local SWAN, a partir del modelo de tercera generación WAVEWATCH III previamente calibrado y validado, considerando diferentes condiciones de dominios, pasos de tiempo, y a un sistema de mallas anidadas que permite garantizar una mejor representatividad de la variabilidad espacial del oleaje, en zonas de aguas intermedias cercanas a los puntos de interés. Esto permite garantizar que la energía proveniente del Caribe en aguas profundas está correctamente caracterizada.

Las parametrizaciones empleadas en el Proyecto han sido validadas para otras zonas del Caribe por diferentes autores y presentan resultados adecuados para el presente estudio; sin embargo, se recomienda para futuros proyectos en la región, la implementación de pruebas numéricas en las cuales se incluyan las nuevas parametrizaciones, según la evolución de los modelos de tercera generación tipo WWIII y SWAN. Para la zona interior del golfo se recomienda una vigilancia respecto a nueva documentación relacionada con la modelación del oleaje en regiones especiales como golfos, estuarios, bahías, entre otros.

A partir de los vientos empleados para la modelación correspondientes a los vientos de la base de datos CFSR, los modelos de oleaje no logran reproducir de manera adecuada la alta variabilidad presente en los datos *in situ* para las zonas localizadas al interior del golfo donde se cuenta con información medida de oleaje; esto debido a las características suavizadas de dichas fuentes de datos y su aún baja resolución espacial. Esto es de vital importancia para futuros estudios, dado que al interior del golfo diferentes autores y los resultados obtenidos muestran la importancia de los vientos locales para la generación de oleaje. Para mejorar esto se recomienda entonces la implementación futura de modelos atmosféricos tipo WRF para periodos continuos de largo plazo y alta resolución temporal (cada 30 minutos y 30 años como mínimo) en la región, de manera que se consideren adecuadamente en la física del fenómeno las condiciones topográficas, de usos del suelo entre otras, para las regiones de alta interacción océano costa.

Para las zonas de estudio localizadas en la parte externa del golfo donde los vientos locales no tienen tanta influencia, los vientos de CFSR logran reproducir adecuadamente las condiciones del oleaje. Esto claramente está asociado a la influencia de la energía entrante de las zonas de aguas profundas del Caribe hacia la zona de influencia de la parte externa del golfo de Urabá, donde los vientos de CFSR representan de forma más adecuada la variabilidad espacial y temporal de los vientos.

Los resultados de los parámetros integrales del oleaje presentados para todos los puntos se encuentran definidos para aguas intermedias.

Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos

Para cada uno de los seis sitios de estudio se analizaron las implicaciones de las alternativas de solución propuestas, con base en salidas de modelos numéricos de transporte de sedimentos. Se emplearon varios modelos numéricos con el objetivo de eliminar posibles errores sistemáticos en las implementaciones y comparar y validar su desempeño. Estos modelos contaron con información validada como condiciones de frontera y se efectuaron comparaciones preliminares con datos medidos.

Los resultados sugieren, que en general los modelos logran una buena representación de los cambios morfológicos de las zonas de estudio. Es de notar, que el transporte de sedimentos costeros es un proceso físico que numéricamente tiene varias aproximaciones. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta que esos resultados tienen un porcentaje de incertidumbre.

Capítulo 1º

Antecedentes

Autores

Iván Darío Correa Arango

(PhD en Geología Marina)

Rodolfo Silva Casarín

(PhD en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos)

Javier Alcántara Carrió

(PhD en Ciencias del Mar)

1.1 Contexto físico general de los problemas de erosión de playas y de acantilados del litoral antioqueño

Como se consigna en los capítulos siguientes, el diseño y la construcción de defensas ingenieriles para detener o mitigar la erosión de las playas y acantilados debe basarse en el análisis de los factores naturales y antrópicos causantes. Para cada sector en particular, estos análisis aportan los conocimientos necesarios sobre:

- Las principales características geológicas, oceanográficas y climáticas, incluyendo los tipos de rocas y sedimentos, las direcciones, velocidades y estacionalidad de los vientos, los oleajes y sus corrientes asociadas, las direcciones de transporte de sedimentos, etc.
- La ubicación y las características de las intervenciones humanas, y la evaluación de sus efectos en cuanto generan o aceleran los problemas de erosión preexistentes.
- La evaluación del balance hidrosedimentario en cada sector particular.
- La valoración del estado de conservación de los ecosistemas costeros.

La información disponible sobre la erosión histórica del litoral antioqueño evidencia que el retroceso de su línea de costa ha sido de dimensiones importantes (decenas-cientos de metros) y que todas las áreas críticas evaluadas en el Proyecto tienen en común problemas de erosión de playas y acantilados generados por combinaciones de factores naturales y antrópicos. En este capítulo se presenta una descripción breve de la geología y fisiografía del litoral antioqueño y de las magnitudes de sus cambios históricos. Se consignan también algunos conceptos básicos de interés para entender la evolución costera.

En aras de la brevedad, se citan algunos de los estudios más representativos asumidos en el área de estudio; las publicaciones más relevantes sobre las zonas de inter-

vención del Proyecto se citan debidamente en los próximos capítulos. Para profundizar sobre la geomorfología de las costas, su manejo sostenible, y métodos de estudio utilizados, se remite al lector a los trabajos de Silva et al. (2014, 2017), Alcántara-Carrió et al., (2012), Correa (2006) y Correa et al. (2007). Las publicaciones -textos y mapas geomorfológicos- de la *Expedición Antioquia 2013* presentan descripciones detalladas de la morfología costera, la oceanografía y los manglares de la región del Urabá Darién. Estos estudios son de la máxima utilidad para el proyecto, especialmente los publicados por Prussmann (2012), Correa y Prussmann (2016) y Blanco-Libreros y Londoño (2016).

1.1.1 Contexto físico general de la región del Urabá-Darién (Costas antioqueña y chocoana)

El límite tierra mar actual de la costa antioqueña con el mar Caribe tiene una longitud aproximada de 512 km, definidos entre Arboletes (límites entre Antioquia y Córdoba) y boca Tarena en el distrito de Turbo (límites entre Antioquia y Chocó) (Figura 1.1).

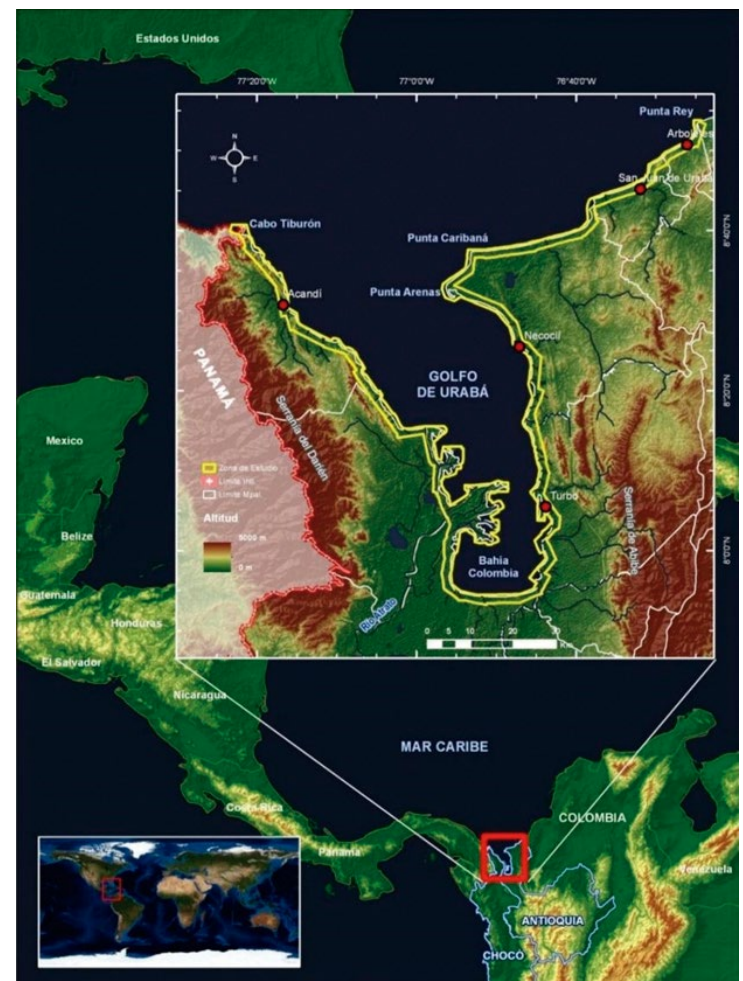


Figura 1.1 Localización geográfica del Urabá Darién y de la línea de costa de Antioquia. La región del Urabá Darién queda marcada en el recuadro superior. (Fuente: Prussmann, 2012).

Antioquia se ubica como el segundo departamento del país con mayor longitud de línea de costa sobre el Caribe, después de la Guajira con 705 km. Son 512 km caracterizados por una naturaleza física altamente variable y las riquezas ecosistémicas excepcionales de la región del Urabá Darién. Lo primero por considerar es su ubicación en la zona de convergencia entre las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Suramérica, una zona con interacciones geológicas, climáticas y oceanográficas complejas y activas por más de 280 millones de años (Figura 1.2).

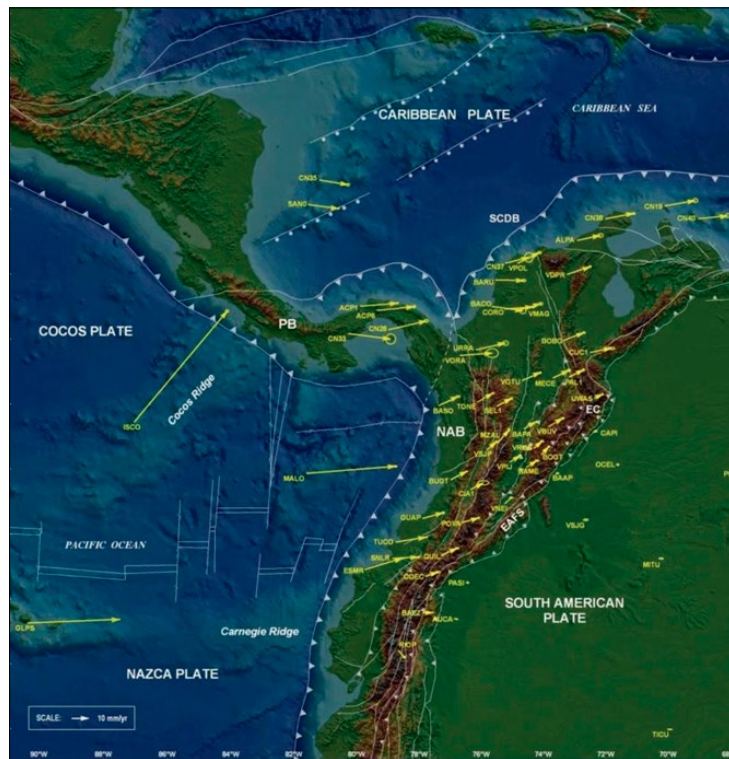


Figura 1.2 Mapa tectónico del Urabá Darién y movimiento relativo de las placas suponiendo que Sur América está inmóvil. Nótese que las velocidades de subducción de las placas de Nazca y Caribe alcanzan valores de más de 20 mm/año, consideradas altas, a nivel mundial. La escala de los vectores de movimiento a la izquierda, abajo. (Fuente: Mora et al., 2019).

Para todos los efectos, el Urabá Darién puede tomarse como un mosaico o “rompecabezas” de rocas y de estructuras de muy diferentes tipos y edades (Figuras 1.3 y 1.4). Los esfuerzos tectónicos - compresiones y distensiones- producidos por el choque de estas placas han fracturado intensamente las unidades rocosas y han causado numerosas zonas de fallas que permiten movimientos relativos entre bloques adyacentes, incluyendo desplazamientos horizontales y verticales que van desde los centímetros hasta los cientos de metros. Estos esfuerzos originan también una actividad sísmica importante en la región, hoy clasificada como de riesgo sísmico alto, a intermedio; el terremoto de Murindó en 1992 y los deslizamientos y hundimientos de terrenos asociados, es uno de los últimos eventos naturales que recuerda los fuertes impactos que han tenido y pueden tener los sismos en la zona.

De importancia especial para interpretar las causas de erosión litoral en la zona es el hecho que las rocas del litoral antioqueño están en muchos lugares afectadas por el diapirismo de lodos, un fenómeno geológico activo actualmente

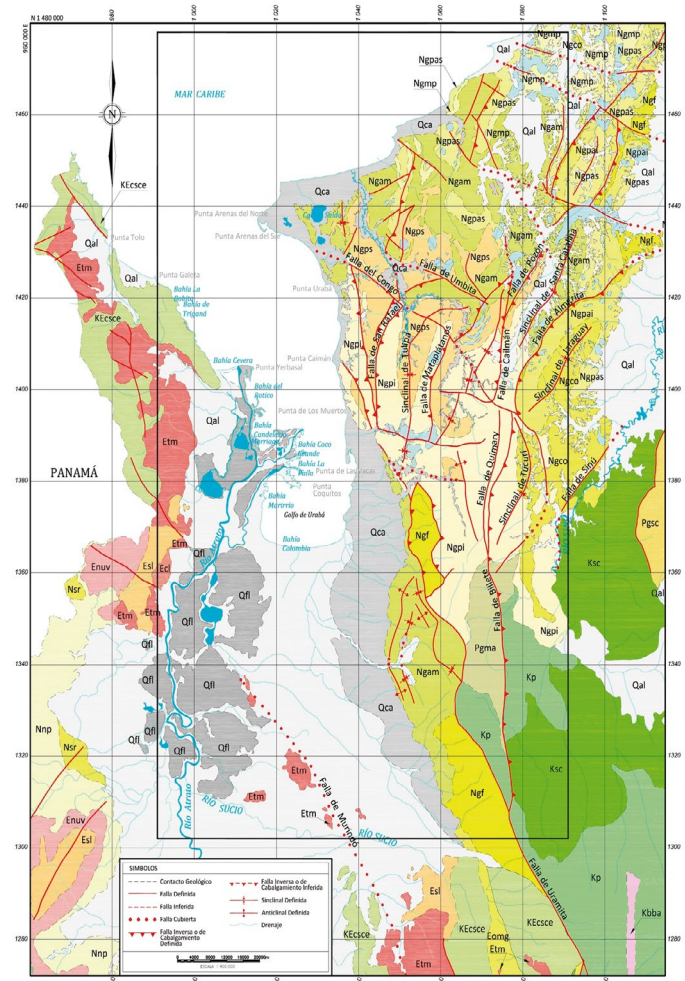


Figura 1.3 A) Mapa geológico del Urabá-Darién. Hacia el este del sistema de fallas de Uramita se encuentran principalmente rocas sedimentarias (N) del Mioceno y sedimentos marinos y fluviales depositados en el Cuaternario (Q). Nótese la gran cantidad de fallas y fracturas que cortan y limitan entre sí las diferentes unidades geológicas. B) Convenciones. (Fuente: INGEOMINAS, 1999 y 2015).

Entre el golfo de Urabá y el delta del río Magdalena (ver, por ej., Vernet et al. 1992). Este fenómeno consiste en el ascenso lento hacia la superficie de grandes volúmenes (diapiros) de mezclas heterogéneas de lodos, agua y gases. En el proceso, las presiones asociadas fracturan las rocas, modifican las características físicas del subsuelo y generan levantamientos y hundimientos diferenciales de terrenos (Figura 1.5). Los lodos expulsados forman a menudo colinas circulares que pueden alcanzar decenas de metros de altura, conocidas como domos diapíricos, generalmente con volcanes y flujos de lodo en sus cimas y flancos. Ejemplos bien conocidos se dan en el domo y volcán de lodo de Arboletes, en Damaquiel, Necoclí y muchos otros sitios que están siendo estudiados por CORPOURABÁ y por el Servicio Geológico colombiano -SGC-.

En síntesis, el diapirismo de lodos es un factor destabilizador de la superficie terrestre y de los fondos marinos y, aunque en muchos casos sus efectos son imperceptibles, en muchos otros representa serias amenazas para la infraestructura y los moradores de los terrenos afectados (Vernet 1992 y 2010). Uno de los ejemplos históricos más relevantes fue la erupción violenta del volcán de lodo Cahual en 1992, en las cercanías de San Pedro de Urabá. Esta erupción incluyó explosiones e incendios de gases y fue “detonada” por el terremoto de Murindó. Extruyó a la

	CUENCA DEL ATRATO	CUENCA SINÚ - SAN JACINTO	
CUATERNARIOS	Qal Depósitos aluviales	Qfl Depósitos fluvioalacustres Qca Depósitos coluviales y abanicos	
PLIOCENO		Ngco Unidad Corpa Arenitas, arenitas conglomeráticas y conglomerados arenosos polimicticos.	
	Nsr Formación Sierra Areniscas finas con concreciones calcáreas, lodolitas y areniscas conglomeráticas, limolitas con lentes de arenisca fina y restos de fósiles de peces y conchas.		
NEOGENO	MIOCENO	Nnp Formación Napipi Lodolitas localmente calcáreas, con niveles de nódulos calcáreos intercalados con lentes de caliza y capas de arenisca de grano fino a muy fino, arcillolitas y limolitas.	Ngam Unidad Arenas Monas Conglomerados arenosos que varían a arenitas, con intercalaciones de lutitas.
			Ngmp Unidad Morrocoy - El Pantano Arenitas líticas que gradan a lutitas, con algunas intercalaciones de conglomerados arenosos bioclasticos.
			Ngpas Unidad Paujil Superior Lutitas con intercalaciones de limolitas y arenitas fragmentares.
			Ngpai Unidad Paujil Inferior Arenitas calcáreas intercaladas con lutitas y limolitas.
			Ngf Unidad Floresanto Lutitas intercaladas con limolitas calcáreas y arenitas líticas.
			Ngps Unidad Pavo Superior Lutitas con algunas intercalaciones de arenitas con ostras.
			Ngpi Unidad Pavo Inferior Arenitas líticas intercaladas con lutitas y ocasionales capas de turba.
MIOCENO OLIGOCENO	Enuv Formación Uva Calizas, lodolitas calcáreas y areniscas calcáreas, margas, limolitas y areniscas de grano medio a fino. Localmente conglomerados basales.		
PALÉOGENO	EOCENO	Esl Formación Salagú Areniscas calcáreas de grano medio a fino, con algunas intercalaciones de conglomerados, con lentes de chert negro y capas de margas; localmente conglomerados basales.	
		Ecl Formación Clavo Shales silíceos intercalados con limolitas calcáreas y areniscas calcáreas de grano medio a fino. Hacia el techo predominan areniscas y lodolitas silíceas.	Etm Botolito de Mandé Cuerpo de composición tonalítica con variación a granodiorita, cuarzoalbita y facies de borde diorítica a gabroide. Facies tardía de borde con estructura porfídica.
PALEOCENO		Pgfc Formación San Cayetano Secuencia rítmica de arenitas y lutitas con intercalaciones de olistostomas arenosos o conglomeráticas.	
PALEOCENO CRETACICO		Eomg Formación Guineales Areniscas, conglomerados y margas fosilíferas.	
CRETACICO	Kbd Basaltos del Bauzó Basaltos y diabasas localmente con estructura columnar y almohadilla, en menor proporción gabros, tobas, aglomerados y chert.	KEcsce Complejo Santa Cecilia La Equis Basaltos piroxénicos amigdaloides, andesitas porfídicas, aglomerados y tobas de composición basáltica con intercalaciones de limolitas, lodolitas calcáreas y calizas; localmente flujos de lavas almohadillas y brechas.	Ksc Formación Cansona Secuencia de cherts y limolitas silíceas, intercaladas con lutitas y ocasionales capas de micritas y arenitas. También con diques y sillós máficos.
			Kp Formación Penderisco Miembro Urrao: Limolitas, areniscas, areniscas tobáceas y algunos horizontes de conglomerado. Miembro Nutibara: Chert negro con intercalaciones de calizas y diabasas.
		Kbba Formación Barroso Lavas básicas y diabasas con intercalaciones de chert y caliza.	

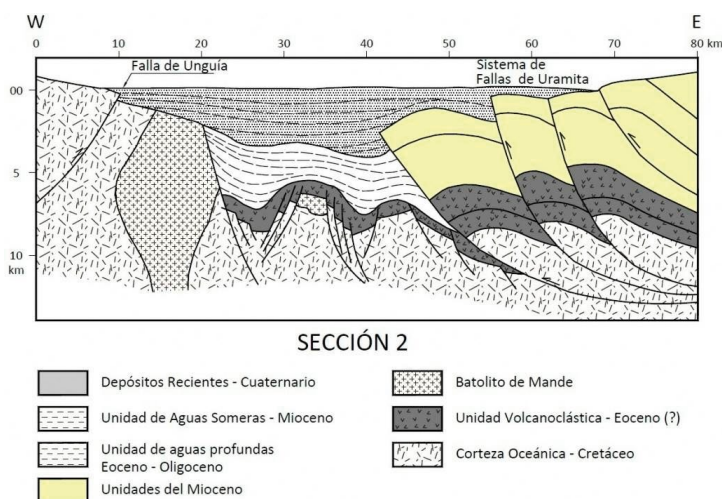


Figura 1.4 Corte esquemático de la estructura geológica general del Urabá-Darién ubicado unos 100 km al sur del límite sur actual del golfo (sección 2 en la figura anterior). Nótese la presencia del sistema de fallas de Uramita a lo largo del límite este del golfo, ubicado sobre una depresión tectónica colmatada por rocas del Mioceno y por depósitos recientes del Cuaternario. Al oeste de la zona de fallas, la mayoría de las rocas son de naturaleza ígnea, mientras que al este son principalmente rocas sedimentarias con bloques fallados. (Fuente: Garzón, 2012).

superficie más de 50.000 m³ de lodos y causó la muerte de nueve habitantes de la zona (Martínez et al., 1994) Figura 1.6). Otros antecedentes de explosiones violentas de volcanes de lodo en el Caribe han reportado cambios de 4 – 5 m en la topografía de los fondos marinos y en la formación de islotes de lodos y rocas en zonas como Damaquiel y Galerazamba (Bolívar), (Figura 1.6A).

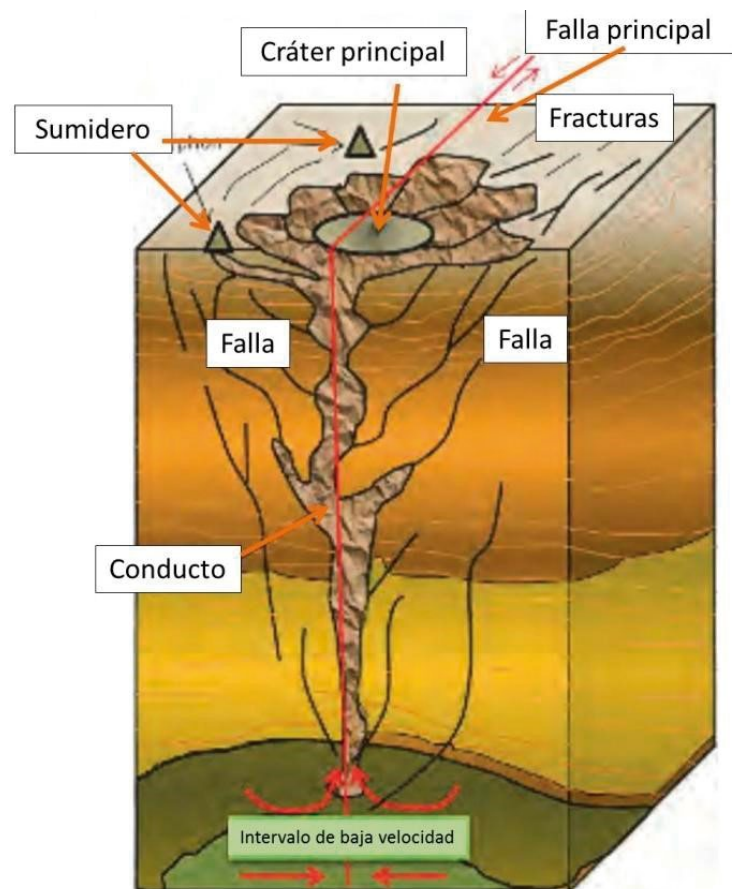


Figura 1.5 Esquema general del diapirismo de lodos. Los lodos ascienden desde profundidades de la corteza, aprovechando fallas geológicas pre-existentes y/o generando con sus presiones nuevas fallas y fracturas. El ascenso de los diapiros se posibilita porque la densidad de los lodos es menor que la densidad de las rocas superiores, y es también impulsado por las compresiones entre las placas tectónicas. (Fuente: Quintero, 2012).

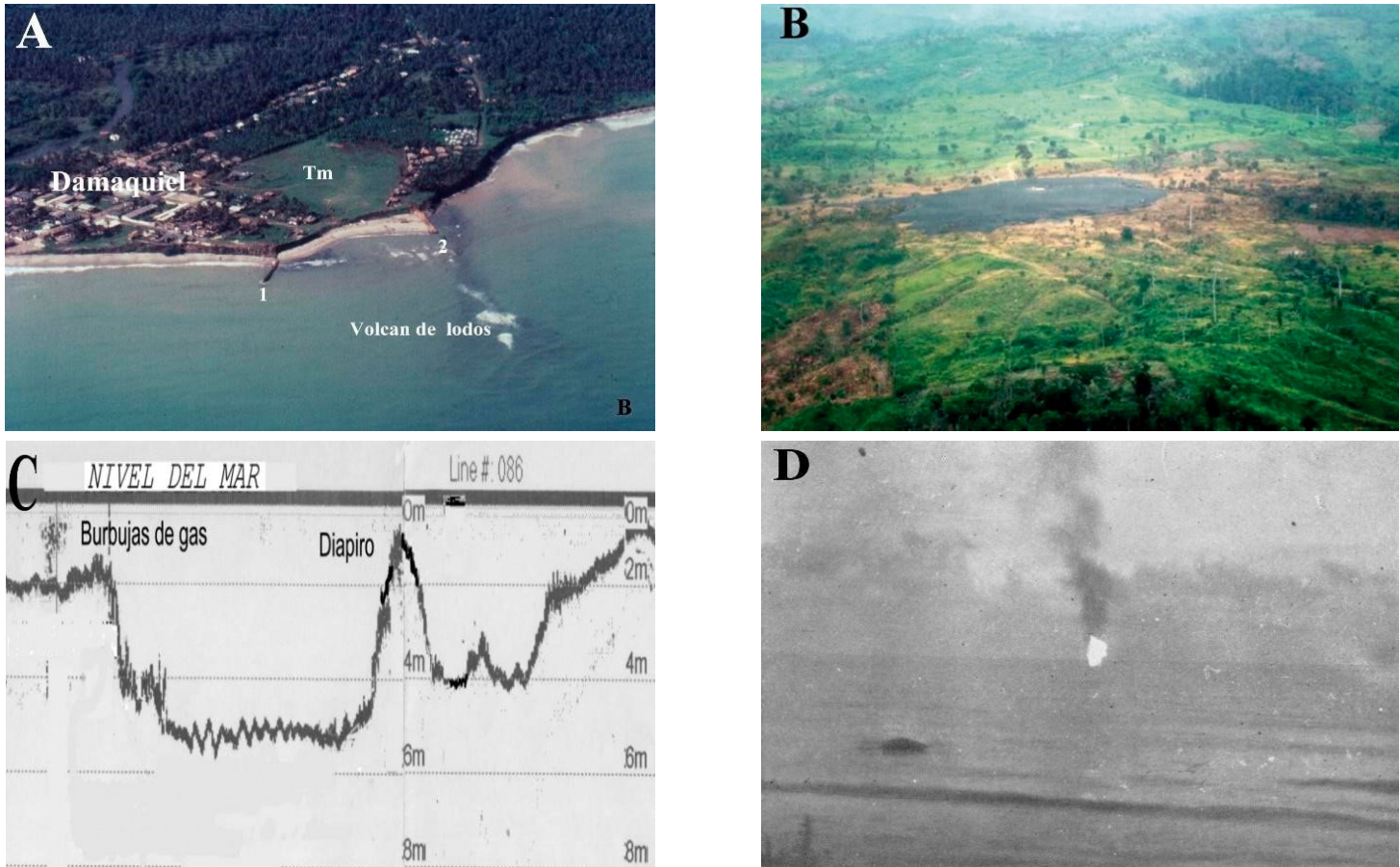


Figura 1.6 Ejemplos de manifestaciones diapíricas modernas. A) Volcán de lodo de Damaquiel, ubicado a 100 m de las playas actuales y con registro de varias erupciones en los últimos 30 años (Fuente: Foto cortesía de Robert A. Morton). B) Depósitos de lodo de la explosión del volcán Cacahual en 1992. C) Volcán de lodo submarino y emisión desde el fondo de burbujas de gas frente de la desembocadura del río Damaquiel. D) Erupción violenta del volcán de lodo al frente de Galerazamba (Atlántico) en junio de 1958; se estima que la llamarada fue de al menos 200 m de altura. (Fuente: Foto cortesía del Padre Jesús E. Ramírez).

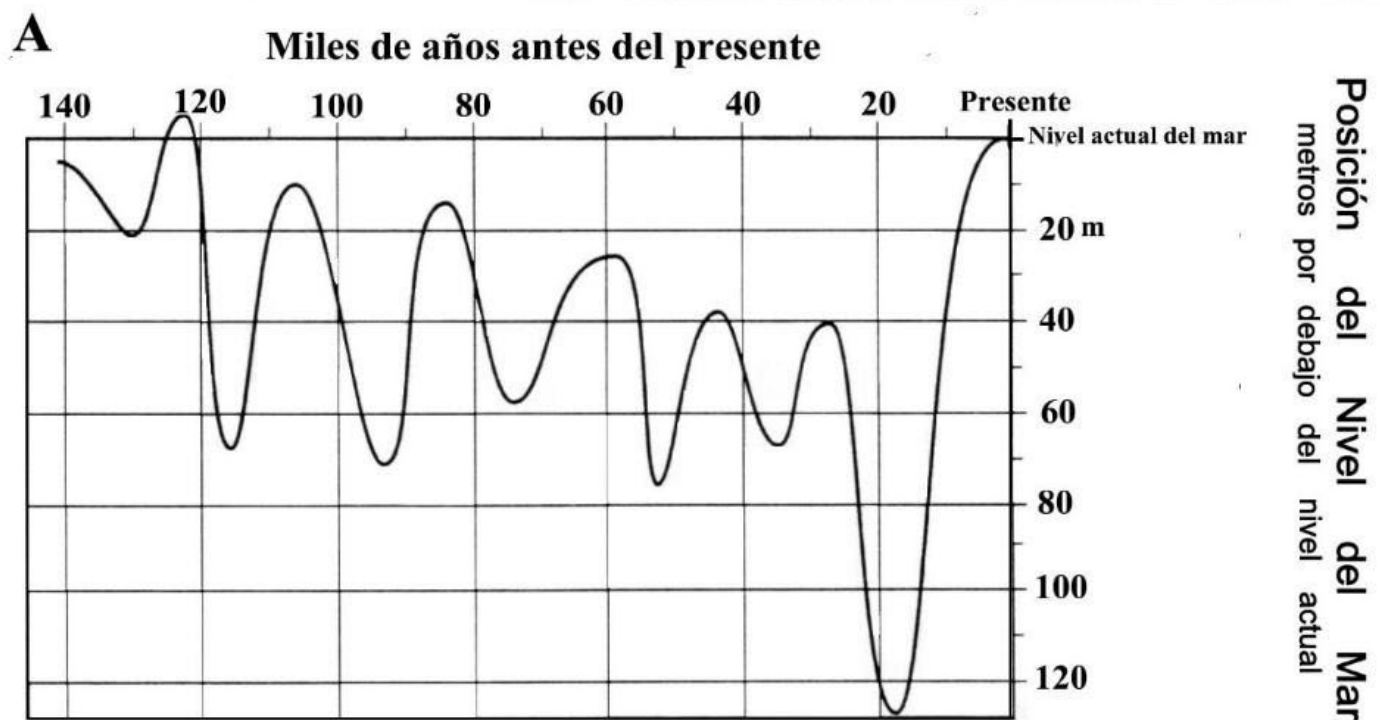


Figura 1.7 Cambios eustáticos (globales) del nivel del mar en los últimos 140.000 años. La última vez que el nivel del mar estuvo a la altura del actual fue hace aprox. 120.000 años, desde entonces han ocurrido seis descensos y ascensos sucesivos de diferentes amplitudes. El último máximo glacial, hace unos 18.000 años, coincidió con un nivel del mar 120 m más bajo que el actual; desde entonces, el nivel del mar ha ascendido hasta hoy, inundando las plataformas marinas costeras. Nótese, por ejemplo, que el golfo de Urabá, hoy con profundidades máximas de 60 m, empezó a inundarse hace tan sólo unos 10.000 años; anteriormente los hoy fondos del golfo fueron llanuras costeras emergidas, con la posición de las franjas litorales muy lejos de la actual. En la realidad, los ascensos y descensos del nivel del mar se combinan con los movimientos verticales de las zonas costeras y complican mucho las interpretaciones. Para efectos prácticos, lo importante es conocer lo mejor posible los niveles relativos mar tierra para cada sector particular (ver, por ej., Vernet et al., 2002). (Fuente: Pinter, 1996).

1.1.2 Fisiografía y geomorfología actuales del litoral antioqueño

Las características físicas del Urabá-Darién han evolucionado controladas en parte por los factores geológicos mencionados, pero también por otro hecho fundamental en la evolución de las costas del planeta: las variaciones del nivel del mar producidas por los numerosos cambios climáticos en la historia de la Tierra. Es bien sabido que durante los períodos climáticos fríos (períodos glaciales) una proporción importante del agua del planeta se almacena como hielo en los continentes, originando descensos en el nivel de los océanos; por el contrario, durante los períodos cálidos (interglaciares) los hielos se funden parcialmente, el agua se almacena en los océanos y se producen ascensos muy importantes del nivel del mar. Como resultado, la posición y la geografía de los bordes costeros han cambiado continuamente durante la historia geológica, muy notablemente durante el período Cuaternario (últimos dos millones de años) en el cual, numerosos ascensos y descensos rápidos (hasta 3,5 mm/año) de los niveles marinos han ocasionado inundaciones y emergencias sucesivas de las áreas costeras y de las plataformas continentales (Figura 1.7).

Debido a la complicada geología y a los ascensos y descensos del nivel del mar, la región del Urabá Darién tiene una fisiografía variada y contrastante, desde relieves montañosos abruptos y sistemas de colinas bajas, hasta extensas planicies costeras y áreas deltaicas actuales formadas con los aportes de sedimentos erosionados de los relieves adyacentes (Figura 1.8). Esta variedad se refleja, además, por la ocurrencia de prácticamente todas las geoformas y ecosistemas que pueden presentarse en ambientes tropicales tectónicamente activos, incluyendo arrecifes coralinos (costado noroeste del golfo), planos intermareales vegetados (pantanos de manglares) y terrazas marinas ubicadas tanto por encima, como por debajo del nivel del mar actual.

En cuanto al borde costero actual entre Arboletes y Turbo, lo primero por destacar es que no es un sector homogéneo, sino que está conformado por combinaciones muy variadas e inestables de geoformas -flechas litorales y playas, lagunas costeras, pantanos de manglares, colinas y acantilados, volcanes de lodo etc. En esencia, pueden definirse varios tipos de franjas litorales, por lo demás fuertemente intervenidas desde inicios del siglo pasado (Figuras 1.9 y 1.10).

De interés particular es el hecho que los movimientos relativos entre los niveles del mar y de la tierra en la zona indujeron la erosión de las colinas rocosas y la formación de las superficies planas ligeramente inclinadas hacia el mar (terrazas marinas), evidentes entre la punta Caribana y Arboletes. Estas terrazas emergidas se generaron al nivel del mar durante los últimos miles de años y hoy se ubican a alturas entre 1-2 y 19 m, reflejando movimientos relativos tierra mar muy recientes en el litoral antioqueño.



Figura 1.8 Fisiografía general de la región del Darién. (Fuente: Prussmann, 2012).

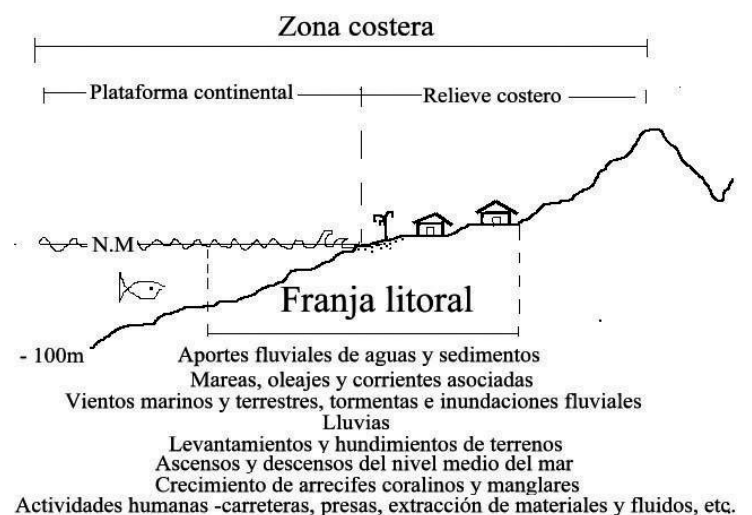


Figura 1.9 Esquema general de la ubicación y procesos geológicos, climáticos y oceanográficos activos sobre una franja litoral, definida como la parte de la costa en la cual interactúan más directamente los agentes y procesos geológicos, climáticos y oceanográficos. (Fuente: Correa, 2006).

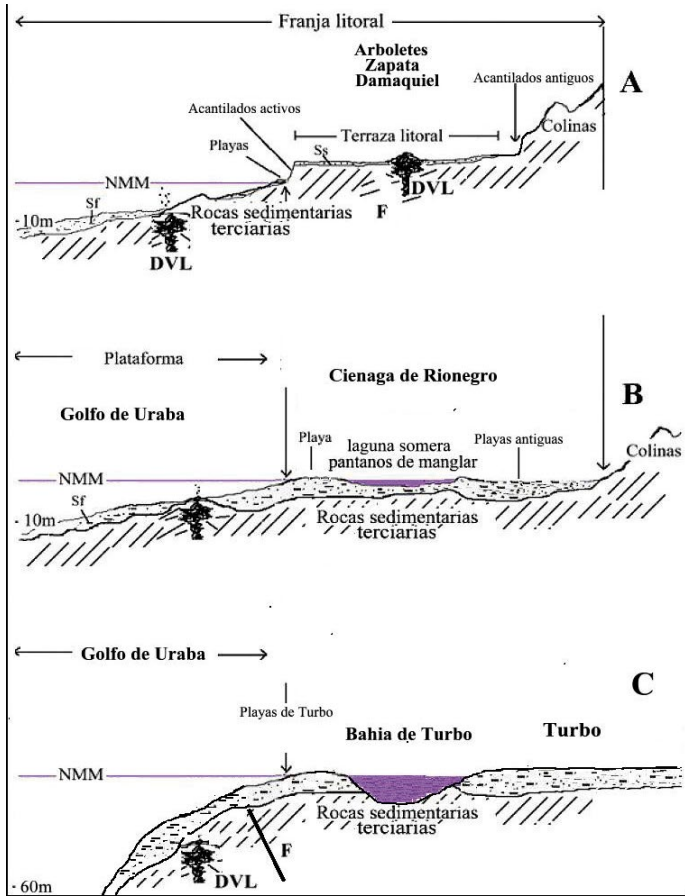


Figura 1.10 Esquema de tres tipos básicos de franjas litorales en el borde costero antioqueño: A) Caracterizada por fondos marinos de muy baja pendiente, domos y volcanes de lodo en el mar y en tierra, en playas y en acantilados activos sobre la línea de costa, terrazas marinas emergidas y relieves costeros limitados hacia tierra por escarpes formados en el pasado (acantilados inactivos o paleo acantilados). Este diagrama puede aplicarse a los sectores de Arboletes, Zapata y Damaquiel; en algunos sectores la terraza marina ha sido completamente erosionada y está ausente, B) Caracterizada por una plataforma marina de pendiente media, playa(s) aislando una laguna costera interior con pantanos de manglares limitada hacia tierra por planicies de playas que se extienden hasta las colinas costeras; este diagrama puede aplicarse a la zona de la ciénaga de Rionegro; C) Franja caracterizada por una plataforma marina de inclinación alta (borde este del golfo) un conjunto de playas (punta *Las Vacas*), una bahía interna (bahía de Turbo) y una planicie de sedimentos formada por acciones marinas y fluviales. Según la información disponible, los sectores de Arboletes, Damaquiel y la bahía de Turbo pueden estar afectados por fallas geológicas (F) y por diapirismo de lodos (DVL). (Fuente: Elaboración propia).

1.1.3 Introducción a las magnitudes y a las causas de la erosión litoral entre Turbo y Arboletes

El conocimiento sobre las magnitudes históricas de la erosión de playas y de acantilados entre Turbo y Arboletes se inicia basados en comparaciones históricas de los contornos de la línea de costa representados en documentos cartográficos (Figura 1.11) y materiales de sensores remotos (imágenes de radar, satelitales y aerofotografías). Comparando documentos cartográficos y aerofotografías se han realizado aproximaciones semi cuantitativas a las magnitudes y velocidades de los cambios de la línea de costa, un insumo inicial que ha permitido el planteamiento de hipótesis sobre las causas naturales y los efectos de las intervenciones humanas (Figura 1.12). El uso de nuevas tecnologías como los SIG y los drones facilitará cuantificar precisamente las magnitudes de las modificaciones

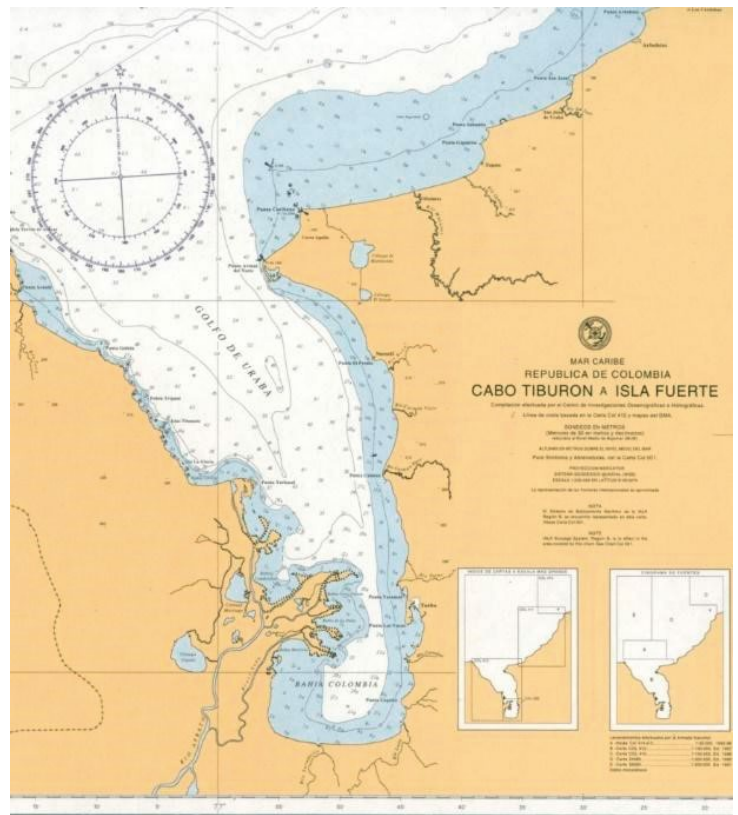
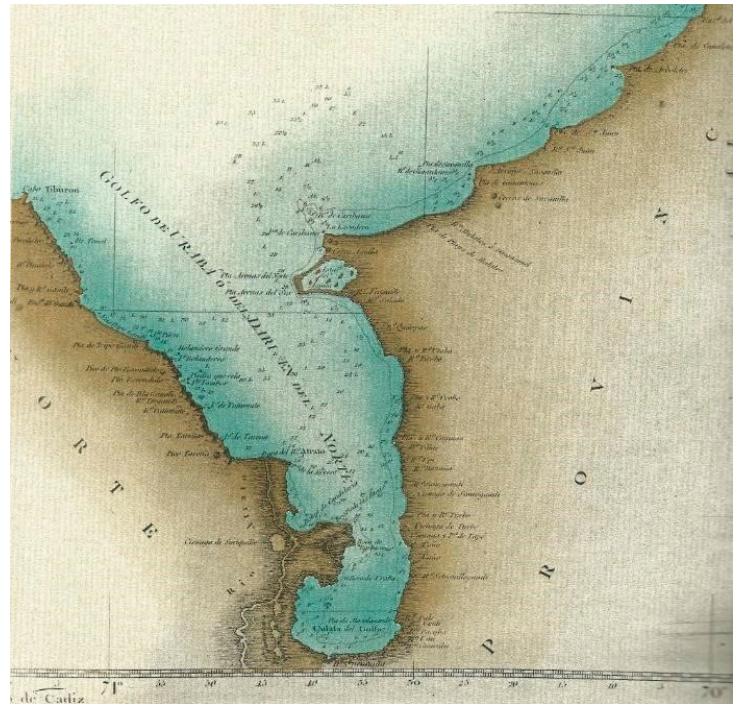


Figura 1.11 A) Fragmento de la cartografía de las costas de Colombia realizada por la expedición del Brigadier español Francisco Fidalgo en el período 1792-1810; este mapa es uno de los documentos históricos más precisos disponibles para estudiar los cambios históricos de los litorales del país. B) Carta de Navegación DIMAR: *Cabo Tiburón a Isla Fuerte*, publicada en 2005. La comparación de estos dos tipos de documentos permite identificar “a primera vista” las zonas de mayores cambios en el contorno costero, ubicadas en el delta del río Atrato, la desembocadura del río Turbo punta *Las Vacas*, la ciénaga de Rionegro y el sector punta Rey Arboletes río Hobo. En estas zonas los eventos de erosión y acreción litoral se han reflejado por cambios de hasta cientos de metros en los contornos litorales. Los resultados de un primer inventario general sobre las velocidades de los cambios litorales en Antioquia entre los años 1950 y 2004 (utilizando aerofotografías IGAC y métodos ópticos para las comparaciones) se muestran en la figura 1.12. (Fuente: A) Domínguez et al., 2011 – B) DIMAR, 2005).

recientes del contorno litoral (Ménanteau, 2007).

El esquema de tasas de velocidad de cambio de la línea de

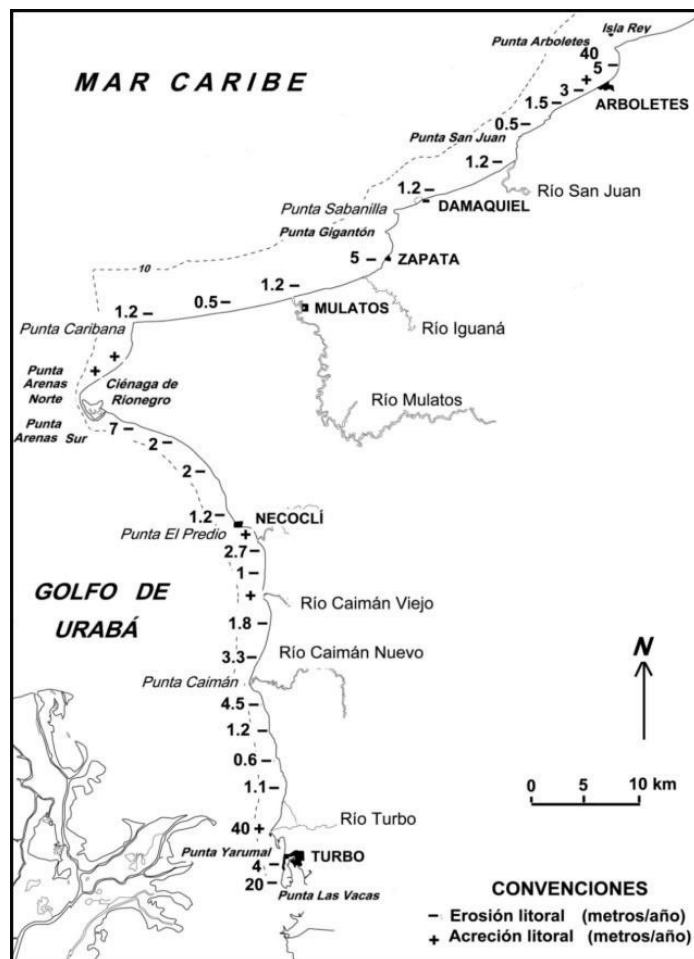


Figura 1.12. A) Características generales de la franja litoral entre Turbo y Arboletes (izquierda). B) Tasas de erosión (-) y acreción (+) en m/año basadas en comparaciones de aerofotografías IGAC del período 1950 - 2004. (Fuente: Correa y Vermette, 2004).

costa muestra que en el período examinado la mayor parte del litoral antioqueño retrocedió a velocidades máximas de hasta 40 m/año en el sector de Arboletes punta Rey, y a velocidades menores (entre 5 y 1 m/año) a lo largo del costado este del golfo y entre las puntas San Juan y Caribana. La acreción litoral se manifestó por crecimientos menores de las playas entre las puntas Caribana y Arenas del Sur, y por el avance hacia el mar (40 m) de los depósitos arenosos de la desembocadura del río Turbo. Los sectores críticos del proyecto presentaron todos retrocesos de la línea de costa, estimados entre 5 y 20 m/año (playas y acantilados de Arboletes y Zapata respectivamente), mientras que para el sector Uveros-Damaquiel la tasa de retroceso de sus playas se estimó en 1.2 m/año.

Más que las anteriores cifras, que son solo aproximaciones y pueden variar en cualquier momento, inventarios de este tipo permiten delimitar los diferentes sectores (erosionales, estables y acrecionarios), y para el caso evidencian que la erosión de playas y acantilados en Antioquia es la tendencia histórica dominante, crónica y ausente, solamente en la desembocadura del río Turbo donde los aportes de sedimentos han sido suficientes para depositar extensos bajos arenolodosos y playones. El estudio detallado de los casos extremos de erosión en los sectores de Arboletes y de la desembocadura del río Turbo punta Las Vacas y punta Rey Arboletes y los resultados de estudios posteriores (incluyendo los de este Proyecto) han confirmado estas tendencias y evidenciado mucho mejor las características geomorfológicas del litoral antioqueño, especificando e interpretando en detalle los cambios ocurridos y los factores naturales y antrópicos causantes.

En todos los sectores críticos del litoral antioqueño, los testimonios y los análisis han demostrado que factores como la extracción de arenas de playa, la construcción indiscriminada de espolones (“sálvese quien pueda”) y el no manejo (o manejo inadecuado) de las aguas lluvias y residuales han detonado los problemas y/o han acelerado los ya existentes. De hecho, la integración de los datos disponibles (incluyendo perfilamientos batimétricos de la plataforma continental) sugiere fuertemente que las tendencias erosionales del litoral antioqueño se remontan probablemente a los últimos miles de años (nivel del mar ascendiendo desde hace aprox. 14000 años) y que se han intensificado a medida que el territorio es ocupado, especialmente en los cascos urbanos y sectores aledaños (Correa y Vermette, 2004; Paniagua, 2013).

Ejemplos de estudios recientes sobre los sectores más críticos (Arboletes y Turbo) en los cuales los procesos naturales y las intervenciones antrópicas han sido determinantes se resumen en las figuras 1.13 y 1.14.

En relación con los contextos geológicos y geomorfológicos del costado este del golfo y litoral adyacente hacia el este, las figuras 1.15, 1.16 y 1.17 documentan síntesis de los resultados de estudios geofísicos recientes realizados por CORPOURABÁ - Universidad EAFIT (2015) con

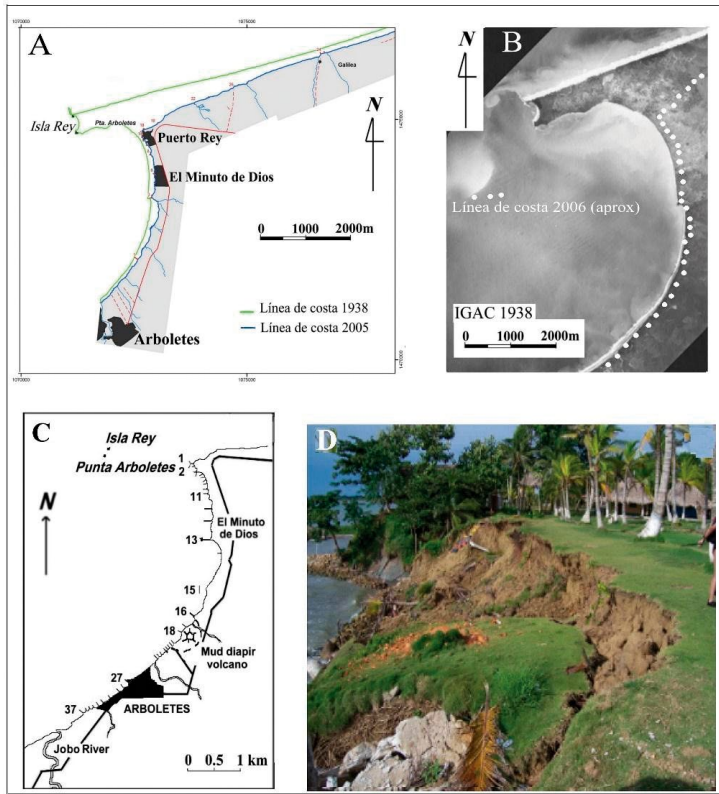


Figura 1.13 Aspectos básicos de la erosión litoral en el sector punta Rey-Arboletes-río Hobo. A) Inventario de cambios de la línea de costa entre 1938 y el 2005. Se evidencia la desaparición total de la península de punta Rey y la erosión consecuente de las playas y acantilados hacia el sur. B) Configuración del sector en 1938; los puntos blancos indican la posición de la línea de costa en 2006. C) Diagrama de la ubicación y efectos erosionales de 37 espolones construidos desorganizadamente para enfrentar el problema. Debido a que la erosión está relacionada en parte con un déficit generalizado de sedimento, estas defensas fueron efectivas al frente de Arboletes y más bien aceleraron la erosión hacia el Norte y Sur del casco urbano. D) El retroceso de los acantilados en el sector ocurre por movimientos de masa en los bordes de la terraza litoral, especialmente frecuentes por la saturación de los suelos en los primeros 15 días de la transición verano invierno, originado por factores como las lluvias y el no manejo (o manejo inadecuado) de las aguas lluvias y residuales. (Fuente: A) Correa et al., 2007 – B) IGAC, 1938 – C) Correa y Vernet, 2004 – D) Fotografía Iván Correa, 2019).

el fin de evaluar a nivel general la estructura del subsuelo. Estos resultados evidencian claramente la naturaleza complicada de los fondos y subfondos marinos del área, en los cuales se identifican diapiros de lodo, abombamientos y fallamientos numerosos de dirección N-NO asociados a la zona de fallas de Uramita. En su conjunto, estas características demuestran la actividad tectónica activa en la zona y deberán ser objeto de estudios de detalle en vista de las potenciales amenazas que podrían representar para los proyectos portuarios y demás desarrollos considerados para el futuro próximo.

1.2 Referencias

Alcántara-Carrió, J., Caicedo, A., Hernández, J.C., Jaramillo-Vélez, A. Manzolli, R.P. (2018). *Sediment Bypassing from the New Human-Induced Lobe to the Ancient Lobe of the Turbo Delta (Gulf of Urabá, Southern Caribbean Sea. J. of Coastal Research 35(1), 196-209.*

Alcántara-Carrió, J., Montoya, I., Correa, I.D. (eds) (2012). *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral (2a edición).* Programa Ibe-

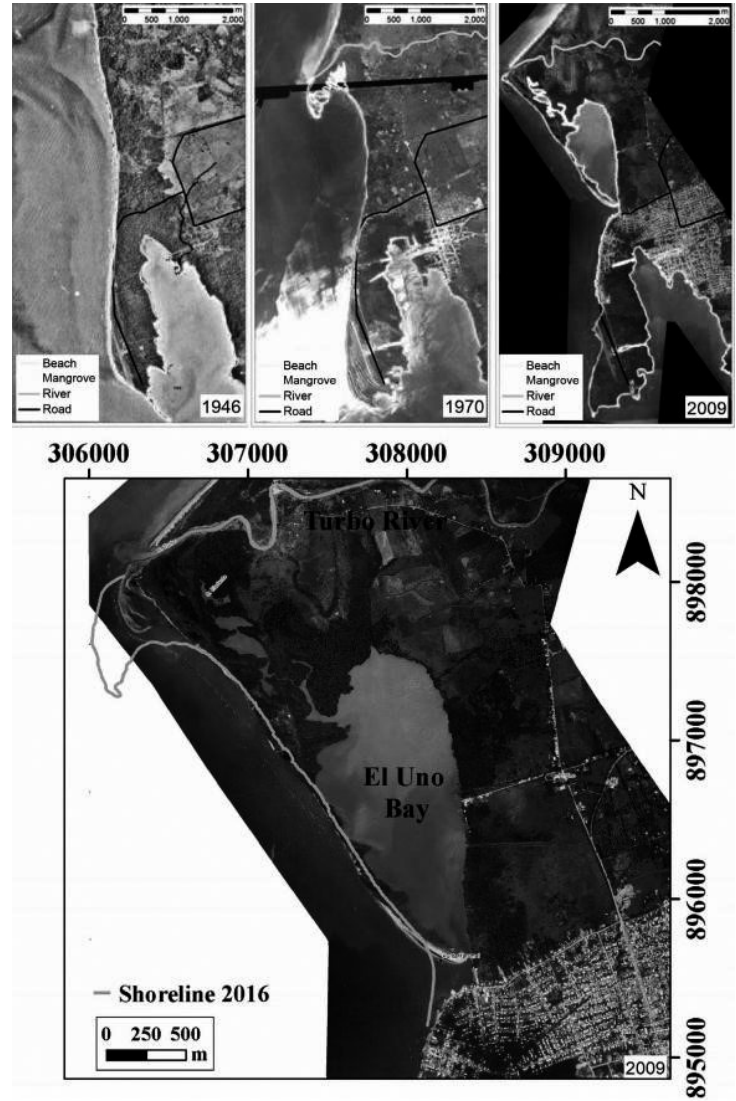


Figura 1.14 Evolución morfológica del sector desembocadura del río Turbopunta Las Vacas entre 1946 y 2009. Las modificaciones recientes del contorno litoral se aceleran a partir de la formación del delta del río Turbo (entre 1946 y 1970) inducida artificialmente y la consecuente definición de la bahía El Uno. El retroceso de las playas turísticas de Turbo refleja déficits de sedimentos hacia el sur del delta y de la bahía El Uno intensificados por la construcción de espolones (tres fotografías de arriba) en sectores carentes de arena. En el 2016 la bahía El Uno queda prácticamente aislada de mar abierto (fotografía inferior). (Fuente: Alcántara-Carrió et al., 2018).



Figura 1.15 Ubicación de abombamientos y emanaderos de gases asociados a la actividad diapírica en el costado este del golfo y costa abierta hasta la desembocadura del río Mulatos. (Fuente: Correa y Sánchez, 2014).



Figura 1.16 Ubicación de fallamientos normales e inversos (probablemente activos) en el subsuelo del costado este del golfo de Urabá. (Fuente: Correa y Sánchez, 2014).

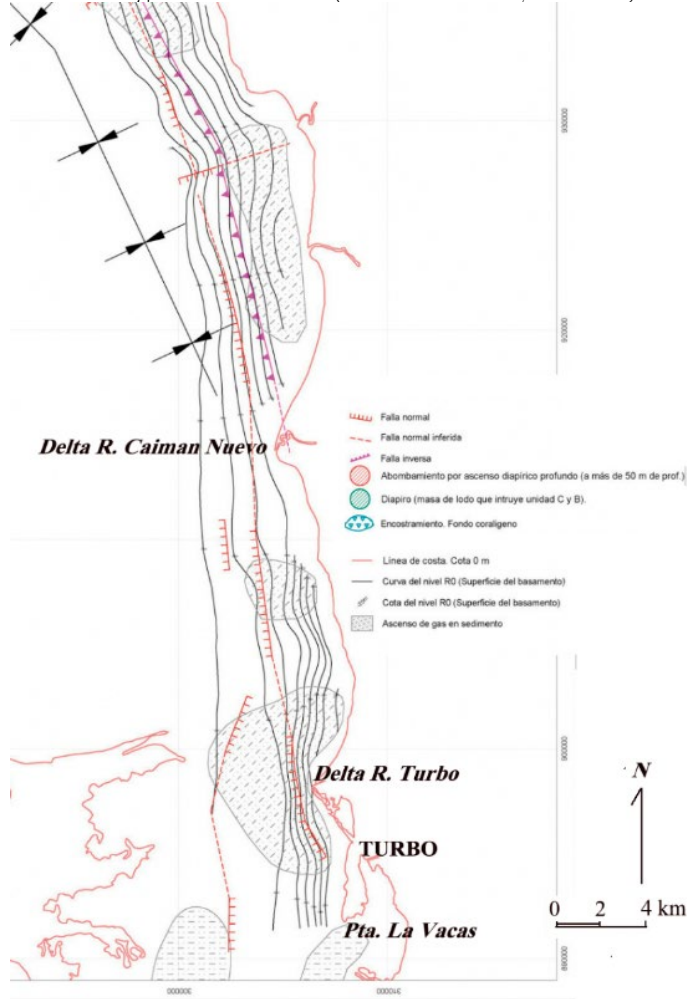


Figura 1.17 Detalle del contexto tectónico del subsuelo del golfo entre el delta del río Caimán Nuevo y la punta Las Vacas. Nótese las numerosas fallas normales con trazas aproximadamente paralelas a la línea de costa actual y las zonas de ascenso de gases al frente del delta actual del río Turbo y al sur de la punta Las Vacas. La dirección de la línea de costa entre los deltas de los ríos Caimán Nuevo y Turbo coincide con la proyección hacia el sur de una falla inversa con buzamiento hacia el SO que se identificó hasta el delta del Caimán Nuevo. Tomada de Correa y Sánchez, 2014.

roamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Valencia, 438 pp.

Blanco-Libreros J.F. & Mario H. Londoño Mesa (eds), (2016). Expedición Caribe Sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría General de la Comisión Colombiana del Océano, Bogotá. 323pp.

Correa, I.D. y Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes-Turbo). Bolet. Invest. Mar. Cost. Invemar. 33. 5-25pp.

Correa, I.D. (2006). El Litoral Antioqueño. En Michel Hermelin (ed): Geografía de Antioquia. Fondo Editorial Universidad Eafit-Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-Capítulo Antioquia. Pp 137-149.

Correa, I.D. y Sánchez, D. (2014). Resumen Ejecutivo Componente Geofísica Contrato CORPOURABA-UNIV. EAFIT Prestación de Servicios Científicos y Tecnológicos No. 14333. Pp 1-15.

Correa, I.D. y Prussmann, J. Garrido, A. (2016). Geomorfología del Contorno litoral Urabá-Darién, Departamentos de Antioquia y Chocó, Litoral Caribe colombiano: En: Blanco-Libreros J.F. & Mario H. Londoño Mesa (eds) (2016). Expedición Caribe Sur: Antioquia y Chocó costeros. Secretaría General de la Comisión Colombiana del Océano, Bogotá. 323pp.

Correa, I.D., Acosta, S. y Bedoya, G. (2007). Análisis y Monitoreo de la Erosión Litoral en el Departamento de Córdoba.

Davies, C., & Laforteza, R. (2017). Urban green infrastructure in Europe: Is greenspace planning and policy compliant?. Land use policy, 69, 93-101.

Davis, R.A. (1985). Beach and nearshore zone. In: R.A. Davis y R.L. Ethington (Editors), Beach and nearshore sedimentation. Soc. of Econ. Paleon. and Min. Sp. Publ. 24, Tulsa, Oklahoma, U.S.A., pp. 379-449.

Domínguez, C., Salcedo, H., Martín-Merás, L. (eds) (2012). Derrotero y Cartografía de la Expedición Fidalgo por el Caribe Neogranadino (1792-1810). El Ancora Editores, Bogotá. 429 pp.

Garzón Varón, F. (2012). Modelamiento estructural de la zona límite entre la microplaca de Panamá y el bloque Norandino a partir de la interpretación de imágenes de radar, cartografía geológica, anomalías de campos potenciales y líneas sísmicas. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia.

Guillén, J. y Díaz, J.I. (1990). Elementos morfológicos de la zona litoral: Ejemplos en el Delta del Ebro. Scientia Marina, 54(4): 359-373.

Luque, A., Hueso González, P., & Martínez-Murillo, J.F. (2018). Gobernanza y planificación de la infraestructura verde en España. Universidad de Málaga, España.

Martínez, J.M., Parra, E., Paris, G., Forero, C.A., Bus-

tamante, M., Cardona, O.D., Jaramillo, J.D. (1994). Los sismos del Atrato Medio 17 y 18 de octubre de 1992 Noroccidente de Colombia. *Revista Ingeominas* No. 4. 35-66.

Ménanteau, L. (2007). Capítulo II: Geohistoria del Golfo (pp 24-73). En: *Atlas del Golfo de Urabá, una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó*. Invemar, Serie Publicaciones Especiales No. 12, Santa Marta.

Molina-Flórez, L.G., Osorio Arias, A.F. y Otero Diaz, L.J. (2014). Capacidad de transporte longitudinal de sedimentos a escala intra-anual en Punta Yarumal, Delta del Río Turbo, Golfo de Urabá, a partir de la simulación de clima marítimo. *Bol. Invest Mar Cost Invemar*, 43 (2), 213-248.

Mora, H., Kellogg J.M., Diederix, H., Peláez, J.R. (2019). Crustal deformation in the northern Andes – A new velocity field. *Journal of South American Earth Sciences* 89. 76-91pp.

Paniagua-Arroyave, J.P. (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. MSc. Tesis en Ciencias de La Tierra, Departamento de Geología Universidad Eafit Medellín. 88 pp.

Pinter, N. (1996). *Exercises in Active Tectonics*. Prentice Hall. PP- 75-87

Prussmann, J. (2012). Nuevos elementos para el Manejo Integrado de la Región de Urabá, Costa Caribe colombiana: base de datos geoespacial geomorfológica de la Franja litoral de los Departamentos de Antioquia y Chocó. Maestría en Ciencias de La Tierra, Departamento de Geología Universidad Eafit, Medellín. 108 pp. 5 anexos.

Quintero J.D. (2012). Interpretación sísmica de volcanes de lodo en el abanico del Magdalena. Tesis pregrado en Geología, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Eafit Medellín. 61 pp.

SEMARNAT. (2013). *Manejo de Ecosistemas de Dunas Costeras, Criterios Ecológicos y Estrategias*. Autores: Pedroza, D., Cid, A., García, O., Silva, R., Villatoro, M., Delgadillo, M., Mendoza, E., Espejel, I., Moreno, P., Martínez, M. e Infante, D. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 99 pp. México. ISBN: 978-607-8246-59-5.

Silva, R., Lithgow, D., Esteves, L. S., Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Martell, R., Pereira, P., Mendoza, E., Campos-Cascaredo, A., Winckler, P. & Osorio, A. (2017). Coastal risk mitigation by green infrastructure in Latin America. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering* (Vol. 170, No. 2, pp. 39-54). Bournemouth University, Fern Barrow, Poole, Dorset, BH12 5BB, UK.

Silva, R., Martínez, M.L., Moreno-Casasola, P., Mendoza, E., López-Portillo, J., Lithgow, D., Vásquez, G., Martínez-Martínez, R.E., Monroy-Ibarra, R., Cáceres-Puig, J.L., Ramírez-Hernández, A., Boy-Tamborell, M. (2017). *Aspectos Generales de la Zona Costera*. UNAM; INECOL. 54 pp. Disponible en: <http://www.inecol.mx/inecol/libros>

Silva, R., Villatoro, M., Ramos, F., Pedroza, D., Ortiz, M., Mendoza, E., Delgadillo, M., Escudero, M., Félix, A. y Cid, A. (2014). Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable. UNAM/SEMARNAT, México, 125 pp. ISBN: 978-607-02-6287-6.

Vernette, G., Correa, I.D. y Bernal, G. (2010). *Introducción a los cambios del nivel del mar y a sus consecuencias sobre la zona costera*. Universidad Nacional, Medellín; Colección Facultad de Minas. 171 pp.

Vernette, G., Mauffret, A., Bobier C., Briceño, L., Gayet, J. (1992). Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics* 202: 335-349.



Capítulo 2º

**EROSIÓN
COSTERA**

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 2º

Componente Social

Autoras

Yina Villamil Velásquez

(MSc en Estudios Socioambientales)

Laura Milena Guerrero Cardozo

(MSc en Sociología Política)

2.1 Introducción

La erosión costera es un fenómeno complejo en el cual intervienen diversas variables mecánicas, químicas, biológicas, sociales y económicas. El análisis y la comprensión de los espacios costeros y de fenómenos como la erosión costera implican articulaciones y lecturas amplias desde diversas perspectivas como la construcción histórica del territorio, las dinámicas económicas regionales y los proyectos multi globales que se planean sobre el territorio, pero también reconociendo que las costas tienen gente, de tal manera que estos análisis permitan proponer soluciones más integrales. Desde esta premisa, la *“Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”*, desarrollada por la Universidad de Antioquia, consideró la incorporación de la perspectiva social en todo el proyecto, vinculando, como se ha hecho en otros análisis, las acciones o factores antrópicos como una de las causas del fenómeno, pero también identificando los usos que los habitantes han hecho del litoral, la forma en que han sufrido y enfrentado el problema de erosión costera, inclusive frente a decisiones políticas de gobierno, analizando las expectativas que las comunidades tienen sobre las intervenciones y permitiendo la incorporación de sus sugerencias y recomendaciones sobre las acciones por desarrollarse para estabilizar el problema, desde su experiencia de la erosión costera en la zona.

En ese sentido, desde la componente social del proyecto se trazaron cuatro objetivos principales:

- Crear una línea base de la población impactada por la erosión costera.
- Analizar la forma como la erosión costera ha afectado los territorios y comunidades de las zonas estudiadas.
- Identificar y concertar con la comunidad las propuestas planteadas para la solución del problema erosivo, así como las posibles acciones planteadas para la estabilización de sitios con procesos erosivos en la costa Caribe antioqueña.
- Mantener y facilitar la interlocución entre el equipo y las comunidades.

En el presente documento se describe primero la metodología utilizada para el desarrollo de los objetivos trazados desde la Componente Social, luego se presenta el contexto social de los lugares estudiados, abordando factores como las dinámicas poblacionales, actividades económicas principales y el contexto de conflicto armado que, aún hoy, continúa afectando a la población de la costa en el departamento de Antioquia.

Posteriormente, se presenta el problema de erosión en las costas de Antioquia considerando la dinámica de apropiación social del litoral, los usos y las prácticas que establecieron las comunidades asentadas en las zonas analizadas y la forma como la erosión costera ha afectado e impactado las dinámicas socioculturales de dichas poblaciones, dando cuenta de los primeros resultados del trabajo de la Componente Social.

Finalmente, para concluir, a partir de los resultados obtenidos, se presentan algunas problemáticas y tensiones existentes en la actualidad en el uso del litoral del golfo de Urabá, las cuales se hacen explícitas, o al menos más acentuadas, con la erosión costera. Estas problemáticas están relacionadas con las nuevas proyecciones para el desarrollo empresarial del Urabá, articuladas al desarrollo portuario, al crecimiento urbano, la conectividad vial y al desarrollo turístico.

2.1.2 Metodología

Para el desarrollo de los objetivos del Proyecto, la Componente Social desarrollaron las siguientes actividades:

- Levantamiento de información oficial en alcaldías, gobernaciones y otras instituciones públicas oficiales relacionada con: Servicios públicos domiciliarios, censo de población, características educativas, laborales, culturales y organizativas en las zonas de estudio. Revisión de fuentes secundarias sobre las características de las comunidades y la documentación existente sobre el problema de erosión costera.
- Desarrollo de dos talleres con actores estratégicos comunitarios en cada uno de los lugares donde se desarrolló el Proyecto. El primero, incluyendo una línea del tiempo y cartografía social del problema de erosión costera. El segundo, un grupo focal de análisis de las alternativas propuestas por la Universidad de Antioquia para estabilizar el problema de erosión, considerando factores como: acceso, estética y seguridad.
- Desarrollo de entrevistas semiestructuradas para ampliar temas específicos de la erosión costera sus impactos en la vida de las personas que habitan y que usan el litoral con actores estratégicos como: Representantes de organizaciones de pescadores, de agricultores, artesanos, familias afectadas por la erosión, propietarios de predios y establecimientos afectados, miembros de Juntas de Acción social.

- Elaboración de entrevistas estructuradas o cuestionarios con propietarios de predios u ocupantes de predios ubicados en la línea de costa del sector de río Hobo en el municipio de Arboletes y en el sector de Peñangué, corregimiento de Zapata, municipio de Necoclí, Antioquia.
- Visitas y recorridos en zonas afectadas por la erosión costera y donde se desarrollarían las acciones de estabilización de la problemática.
- Análisis de la información y la socialización de resultados parciales con los actores estratégicos de las comunidades donde se desarrolló el proyecto.

Además, una de las actividades centrales de la Componente ha sido la de acompañar, de contextualizar y de servir de interlocutora entre las demás componentes e integrantes del equipo de la Universidad de Antioquia y los líderes comunitarios de los lugares de intervención del Proyecto. Esto con el objetivo de posibilitar por parte del equipo de la Universidad de Antioquia un entendimiento y respeto por las condiciones socioculturales y organizativas de las comunidades, así como la inclusión de la perspectiva de las comunidades como parte de las intervenciones propuestas para la estabilización de la erosión costera. Y en el otro sentido, para apoyar a las comunidades en la comprensión y divulgación de las acciones ejecutadas por el equipo técnico de la Universidad.

2.2 Resultados

A continuación, se describen los principales resultados obtenidos a partir del trabajo de la Componente Social del proyecto, según los objetivos y la metodología desarrollada.

2.2.1 Establecimiento de un primer orden de ocupación y uso del litoral afectado por la erosión costera

Según las líneas del tiempo construidas mediante los datos recogidos en campo y con información secundaria, con posterioridad a la ocupación ancestral de las comunidades indígenas, los procesos iniciales de ocupación moderna de gran parte de los territorios analizados ocurrieron en la primera mitad del siglo XX por colonizadores que

buscaban materia prima (madera, raicilla, caucho, tagua, etc.), zonas para cultivo (coco, arroz, plátano) o animales para caza (como las tortugas carey)¹. En la mayoría de los casos, la llegada de los nuevos pobladores se realizó por vía marítima, y los poblados se establecieron alrededor de pequeños puertos con una importante conexión con el Caribe continental, en especial con Cartagena.

Los movimientos migratorios nacionales y el aumento de la comunicación y movilidad entre los puertos, con centro en Cartagena, llevaron al crecimiento poblacional y al incremento de las actividades agrícolas entre los años 30 y 70 en el caso Uveros y Damaquiel (San Juan de Urabá) y Zapata (Necoclí). Así se fueron estableciendo en estas zonas del litoral pequeños poblados habitados por familias de zonas como Barú, Cartagena y otras zonas del entonces departamento de Bolívar (que incluía los actuales departamentos de Sucre y Córdoba), dedicados a la agricultura de pancoger, a la pesca para el autoconsumo y al comercio marítimo de productos como la madera, la raicilla y de algunos productos agrícolas como el coco, el maíz y el arroz².

La pesca se estableció como una actividad esencial para la conformación territorial del litoral desde los primeros momentos de ocupación. Hasta la mitad de la década del 70 la pesca se practicó casi que exclusivamente de forma tradicional con línea de mano, y aunque luego se incluyeron otras artes, el recurso pesquero fue muy abundante en toda la zona hasta comienzos de los años ochenta, momento cuando grandes barcos pesqueros industriales, conocidos como “barcos vikingos” hicieron pesca a gran escala en todo el golfo de Urabá lo que disminuyó drásticamente el recurso hidrobiológico y con este, la actividad pesquera tradicional.

La presencia del Estado Nacional y sus instituciones en los municipios se fortaleció poco a poco, desde la década de los cincuenta. Con el fortalecimiento estatal a nivel municipal y en conjunto con la acción organizada de los pobladores locales las áreas analizadas del litoral, experimentaron un crecimiento en la construcción de vías terrestres, zonas residenciales, capillas, plantas eléctricas y zonas de uso común³. Como se analiza más adelante, fue también a partir de los años 50-60 que se incrementó la extracción de

1 UDEA. Línea del tiempo. Corregimiento de Zapata, Necoclí, Antioquia. Septiembre 2 de 2018; UDEA. Línea de tiempo de Uveros, San Juan de Urabá, Antioquia. UDEA-PEC, 18, agosto, 2018; UDEA. Línea de tiempo de Damaquiel, San Juan de Urabá, Antioquia. UDEA-PEC, 02, septiembre, 2018.

2 UDEA. Línea del tiempo. Corregimiento de Zapata, Necoclí, Antioquia. Septiembre 2 de 2018; UDEA. Línea de tiempo de Uveros, San Juan de Urabá, Antioquia. UDEA-PEC, 18, agosto, 2018; UDEA. Línea de tiempo de Damaquiel, San Juan de Urabá, Antioquia. UDEA-PEC, 02, septiembre, 2018.

3 UDEA. Taller de caracterización de población base del corregimiento de Damaquiel. UDEA-PEC. septiembre 2 de 2018; UDEA. Taller de caracterización de población base de Uveros, San Juan, Antioquia. UDEA-PEC, 18, agosto, 2018; UDEA. Taller de caracterización de pobla-

material de las playas para la construcción, actividad que tiene una relación importante con la erosión costera.

Desde la década del setenta, el uso y el imaginario social sobre el litoral, en especial de las playas, empiezan a cambiar lentamente en todas las sociedades modernas occidentales. Antes vista como espacio exclusivo para actividades productivas o domésticas relacionadas con el ámbito privado, las playas van ganando un nuevo significado vinculado con el ocio y el entretenimiento. Debido ese proceso de resignificación del litoral, de sus identidades y de usos, la actividad turística en los territorios aquí analizados, sobre todo en el caso del volcán de lodo y de río Hobo en el municipio de Arboletes, se incrementó desde los años 80, donde el turismo se volvió una de las principales actividades económicas. Acompañando esas transformaciones, en los últimos 30 años, muchos de los pobladores locales cambiaron sus actividades productivas o incrementaron sus fuentes de ingresos con la venta de comida, de hospedaje, de servicios turísticos o de artesanías. En este sentido, el litoral con sus playas, bañaderos y atractivos turísticos naturales se tornaron una de las más importantes actividades económicas del municipio de Arboletes⁴.

Con excepción del caso de Arboletes, las zonas del litoral estudiadas se configuraron desde su poblamiento hasta mediados de la década de los ochenta como poblados dedicados a la agricultura, la pesca y la ganadería (en menor escala), con unos procesos de conexión comercial, en principio marítima y luego terrestre, de productos agrícolas, como el coco, el maíz y posteriormente el plátano que se fue posicionando como uno de los principales productos comerciales. Zapata y Damaquiel se establecieron hasta comienzos de la década de los setenta como puertos marítimos de importancia en la zona, desde donde se dinamizaba el comercio de poblados cercanos y permitía una conexión comercial, social y cultural con ciudades como Cartagena y localidades del golfo de Morrosquillo⁵.

Asímismo, los análisis de la línea del tiempo y de los talleres compartidos con las comunidades evidencian un importante crecimiento poblacional sobre la línea de costa, en especial en los corregimientos de Uveros, Damaquiel y Zapata que desde los años sesenta comienzan a reportar graves daños ocasionados por la erosión costera en la infraestructura comunitaria, los centros poblados y en pre-

dios individuales.

En el corregimiento de Zapata, según la línea del tiempo construida con sus pobladores⁶, en los años cincuenta surgieron los primeros problemas relacionados con la erosión costera. Toda la línea de costa estaba sembrada de coco y los primeros plantíos fueron afectados por la erosión en 1951, sin embargo, fue entre los años setenta y ochenta cuando hubo mayores afectaciones.

Esta temporalidad es similar a la del corregimiento de Uveros, según los datos aportados por la comunidad, en el año 1960 los pobladores empiezan a sentir las acciones de la erosión costera y más o menos en esa fecha el mar se llevó algunas casas y calles del poblado. Pero fue entre 1960 y 1980 cuando ocurrieron las mayores afectaciones, en ese tiempo se perdió el cementerio, la cancha y lo que era el pueblo antiguo, donde llegaron los primeros pobladores, el mar en ese momento se llevó unos 200 metros del litoral y unas 50 casas⁷.

Entre 1973 y 1977, en el corregimiento de Damaquiel ocurrió la mayor afectación por erosión costera en el caserío, en ese momento, dicen los habitantes⁸, una corriente

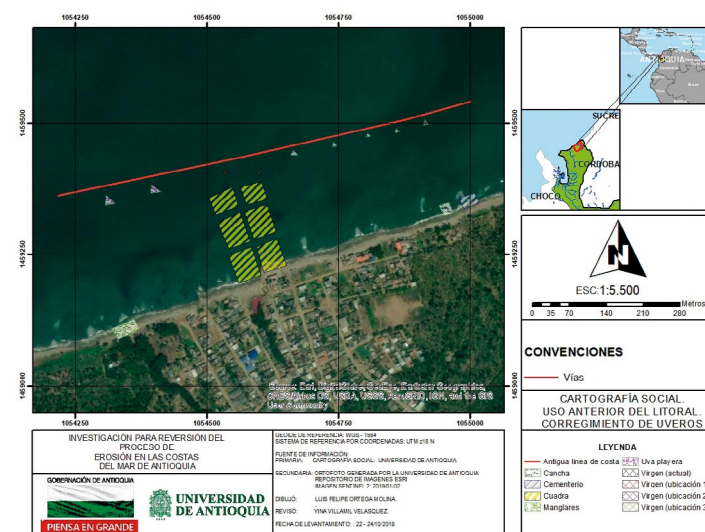


Figura 2.1 Línea de costa anterior y poblamiento costero. Cartografía social Uveros, transcrita. (Fuente: Gobernación de Antioquia-UDEA. Dibujó: Luis Felipe Ortega Molina).

fuerte se llevó dos calles del poblado y afectó unas 20 casas

4 UDEA. Taller de caracterización de población base de río Hobo. UDEA-PEC. Agosto 16 de 2018.

5 UDEA. Taller de caracterización de población base del corregimiento de Damaquiel. UDEA-PEC. septiembre 2 de 2018; UDEA. Taller de caracterización de población base de Uveros, San Juan, Antioquia. UDEA-PEC, 18, agosto, 2018; UDEA. Taller de caracterización de población base de río Hobo. UDEA-PEC. Agosto 16 de 2018. UDEA. Taller de caracterización de población base del corregimiento de Zapata. UDEA-PEC. Septiembre 2 de 2018.

6 UDEA. Taller de caracterización de población base del corregimiento de Zapata. UDEA-PEC. Septiembre 2 de 2018.

7 UDEA. Taller de caracterización de población base de Uveros, San Juan, Antioquia. UDEA-PEC, 18, agosto, 2018.

8 UDEA. Taller de caracterización de población base del corregimiento de Damaquiel. UDEA-PEC. septiembre 2 de 2018.

que estaban ubicadas en la línea de costa.

En el sector de río Hobo el problema de la erosión costera la sintieron los habitantes desde 1970 cuando resultó damnificada la primera casa de las familias de la zona, pero los daños más graves a las propiedades, infraestructura comunitaria y casas se presentaron en años recientes⁹.

Así, durante veinte años, 1960-1980 aproximadamente, la erosión costera ocasionó graves problemáticas en los corregimientos y lugares analizados. En el caso de San Juan de Urabá (corregimientos de Uveros y Damaquiel) debido a la erosión se dieron grandes cambios en la forma de ocupación del litoral y se trazó un antes y un después: el pueblo antiguo, “que el mar se llevó” y el que se erigió con posterioridad. En esta primera ola de afectaciones causadas por la erosión costera no hubo apoyo o compensación por parte del gobierno nacional o local para las familias afectadas. Según la información recopilada, los bienes y mejoras individuales fueron asumidos por cada una de las familias afectadas, por su propia iniciativa volvieron a construir sus casas en otros lugares y compraron u ocuparon terrenos en los mismos corregimientos o en otras localidades. La infraestructura comunitaria, como escuelas, centros de salud, canchas de fútbol, parques y otros escenarios de este tipo fueron reconstruidos o reubicados de forma colectiva por la comunidad desde de las Juntas de Acción Comunal, por iniciativa propia sin el apoyo de ninguna entidad pública o privada.

Por otro lado, resulta importante destacar, que existe una estrecha cercanía temporal entre los picos de afectaciones causadas por la erosión costera de este primer momento y la extracción de arena y otro material de playa en todos los lugares analizados. Entre 1965 y 1985 hubo un auge en la extracción de estos materiales en todo el litoral antioqueño destinado a la construcción de casas y otras infraestructuras importante de los municipios (iglesias, centros de salud, escuelas). Además, esta actividad fue una fuente de ingresos para familias que vivían en estas zonas, así como objeto de empresas transportadoras, con caballos, burros o volquetas como en el caso de río Hobo:

La extracción de material aquí era normal en Arboletes del noventa y pico para allá la mayoría de las casas aquí fueron hechas con arena del mar, por ejemplo, el punto de la Playeta era de donde se sacaba la arena eran cinco volquetas diarias, aquí sacaban quince volquetas de arena aquí cerquita frente a la finca diagonal a Matilde. La sacada de materiales

antes del sesenta, del cincuenta y hasta el 2000. Se dejó de sacar arena porque se prohibió. Se sacaban diario unas 20 volquetas, usted sacaba una y el mar el colocaba más, había caracucha y caracol¹⁰.

En el caso de río Hobo, si bien la extracción de caracuchas y arena de mar se hacía de forma constante, era realizada de forma independiente por las personas de la localidad, no había una cooperativa o una empresa que se encargaba de la tarea. Los dueños o conductores de volquetas recogían el material y le pagaban a la gente que la ayudaba a cargar, así resultaba ser una labor lucrativa para quienes se dedicaban a llenar las volquetas:

La arena se sacaba del mar y no, todo eso era independiente allí no había ninguna clase de cooperativa, el conductor era dueño de su volqueta, muchas veces se adelantaban para aprovechar y coger todos los viajes para ellos solos, ellos cuadraban con los que llenaban y se empezaba, era plata de por medio. Yo llenaba una volqueta con 80 latas y por eso me pagaban 1000 pesos y con eso compraba de todo, compraba la comida para la casa y ya hoy se ve que con 1000 pesos no se compra nada. Cada lata la llenaba con 5 paladas, en ese entonces sacaba 200 latas en el día, a veces sacaba 100 y quedaba listo que no me podía ni parar, era un trabajo muy matador¹¹.

2.2.2 Nuevas dinámicas de organización y de ocupación del litoral generados por el conflicto armado y nuevos intereses económicos

Desde finales de los años sesenta las FARC y el EPL hacían presencia en la región del Urabá. Las FARC llegaron a la región en su primera expansión, luego de su surgimiento, mientras el EPL tenía la región como cuna de su nacimiento¹². La creciente agroindustria del banano en el centro de Urabá y los sindicatos asociados fueron el centro de interés de las guerrillas en ese momento y su disputa originó una importante ola de violencia, sobre todo en los años ochenta¹³. Sin embargo, en la década de los noventa la confrontación entre la guerrilla que subía de la región central del Urabá, y los grupos paramilitares —primero organizados como Autodefensas Campesinas de Córdoba y Urabá ACCU y luego en las Autodefensas Unidas de Colombia AUC— que bajaban desde Córdoba generaron en

9 UDEA. Línea del tiempo de río Hobo, Arboletes Antioquia. UDEA-PEC, agosto 16 de 2018.

10 UDEA. Taller de caracterización de población base de río Hobo. UDEA-PEC. Agosto 16 de 2018.

11 Ibidem.

12 GARCÍA, Clara Inés. Urabá: políticas de paz y dinámica de guerra En: Estudios Políticos, no. 10 (1997): p. 140.

13 LAS DOS ORILLAS. La trágica historia del EPL en Urabá. Disponible en: <https://www.las2orillas.co/la-tragica-historia-del-epl-en-uraba/> [citado en 02, septiembre, 2017].

los corregimientos de Zapata en Necoclí y Uveros y Damaquiel en San Juan de Urabá una ola de violencia y el desplazamiento forzado de buena parte de la población rural.

En ese periodo se incrementaron los homicidios en todos los municipios analizados, según los datos de la Unidad para las Víctimas, la mayor tasa de homicidios se encuentra entre los años 1993 y 1997, periodo durante el cual se consolidó la presencia de las AUC en el Urabá¹⁴.

El desplazamiento forzado ha sido el principal hecho victimizante en los municipios de Necoclí, San Juan de Urabá, Turbo y Arboletes, lo cual ha causado miles de víctimas entre 1985 y 2018. Asimismo en los corregimientos de Zapata, Uveros y Damaquiel la población se vio obligada a desplazarse colectiva e individualmente en especial entre 1991 y el año 2002 con la entrada de los paramilitares abandonando sus fincas, predios y propiedades¹⁵.

Como resultado de esta problemática en la década de los noventa y comienzos del milenio, se propició un cambio significativo en la ocupación y en el uso del suelo, que tuvo implicaciones particulares en el litoral antioqueño. Un caso insignia es el del municipio de Necoclí, donde durante este periodo se establecieron grandes fincas ganaderas en casi todo el territorio que, en la actualidad está dedicado en un 89% a la actividad pecuaria¹⁶.

Si bien en el desarrollo del trabajo en la Componente Social no se detallaron o analizaron estos cambios en el uso del suelo, ni la forma como estos se relacionan con los problemas de erosión costera en la región, los pobladores de las comunidades manifestaron que hubo una disminución en los cauces de los ríos principales como el río San Juan (en el municipio de San Juan de Urabá) y los ríos Mulatos, La Iguana y Zapata (en el municipio de Necoclí) después de la década de los ochenta, y en muchos casos los asociaron con la deforestación del bosque ripario para el establecimiento de fincas ganaderas, pero también con el establecimiento de sistemas de riego y de canales para el cultivo de plátano y del banano, situación que ha sido reportada por las autoridades municipales¹⁷.

Así, es importante resaltar la importancia de ahondar en este tipo de análisis que permitan comprender la forma cómo estos cambios ocurrieron para tomar decisiones de ordenamiento territorial, incluyendo el proceso de ordenamiento de cuencas, como parte de las estrategias de solu-

ción del problema erosivo en la zona.

Como se observa en la línea del tiempo (Figura 2.1) construida con información aportada por los diferentes actores estratégicos de las áreas estudiadas, el problema de erosión costera que ocasionó los primeros impactos entre la década de 1960 y 1980 comenzó a ser atendido con el desarrollo de obras de protección. Las primeras obras, sobre todo espolones, se cumplieron en el corregimiento de Uveros entre 1984 y 1987¹⁸ y luego en el corregimiento de Zapata entre 1987 y 1994¹⁹. Sin embargo, el problema de erosión costera continuó ocasionando daños y afectaciones en las comunidades lo cual llevó a la construcción de más obras de protección en todos los sectores estudiados en las cuales han intervenido diversos actores como las alcaldías municipales, la corporación ambiental y las Universidades. Las comunidades locales también han tenido un papel central en este proceso, tanto porque han realizado acciones de forma comunitaria para intentar proteger las playas, como porque se han posicionado o manifestado para que las obras incluyan sus consideraciones y lecturas sobre el problema.

En Damaquiel, en 1991, la Gobernación de Antioquia financió la construcción de un espolón para proteger la playa de la erosión. Sin embargo, los líderes y lideresas de Damaquiel expresaron que la comunidad consideró, desde antes del inicio de esa obra, que el lugar definido para la construcción del espolón no era la apropiada y ello se evidenció porque este no ha servido para detener el problema erosivo o para ampliar la playa en el sector este.

En los años 1993 y 1994 la erosión costera afectó varias casas ubicadas sobre la línea de costa. Eso llevó a la Alcaldía y a la corporación ambiental CORPOURABÁ a la construcción de un segundo espolón para proteger a la población. Según afirmaron los líderes y lideresas de Damaquiel, ese espolón estaba planeado para ser construido frente al cementerio, en el sector donde había mayor pérdida de playa. No obstante, aunque se inició su construcción en ese lugar, la población de Damaquiel protestó contra la Alcaldía y CORPOURABÁ, al considerar que ese lugar no era el más adecuado para ese tipo de obra. Después de varias negociaciones la comunidad logró convencer a las entidades y el espolón terminó de construirse en la punta de Damaquiel proyectando la formación natural que antes existía. En la actualidad se encuentra sumergido el resto del

14 UARIV (2018). Víctimas de desplazamiento por año de ocurrencia. Necoclí, Antioquia. Bogotá: Red Nacional de Información [revisado el 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://cifras.unidadvictimas.gov.co/>

15 UARIV (2018). Abandono o despojo de tierras por año de ocurrencia, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes, Antioquia. Red Nacional de Información [revisado el 10 de octubre de 2018] Disponible en: <https://cifras.unidadvictimas.gov.co/>

16 PEREZ, Javier. El Caribe antioqueño: entre los retos de la geografía y el espíritu paisa. Documentos de trabajo sobre economía regional. Banco de la República. Centro de Estudios Económicos regionales CEER, No 88, abril 2007, p.10.

17 ALCALDÍA MUNICIPAL DE NECOCLÍ. Plan de Desarrollo Municipal 2012-2015. Necoclí, 2012, p.151.

18 UDEA. Línea de tiempo de Uveros, San Juan, Antioquia. UDEA-PEC, 18, agosto, 2018.

19 UDEA. Línea del tiempo. Corregimiento de Zapata, Necoclí, Antioquia. Septiembre 2 de 2018.

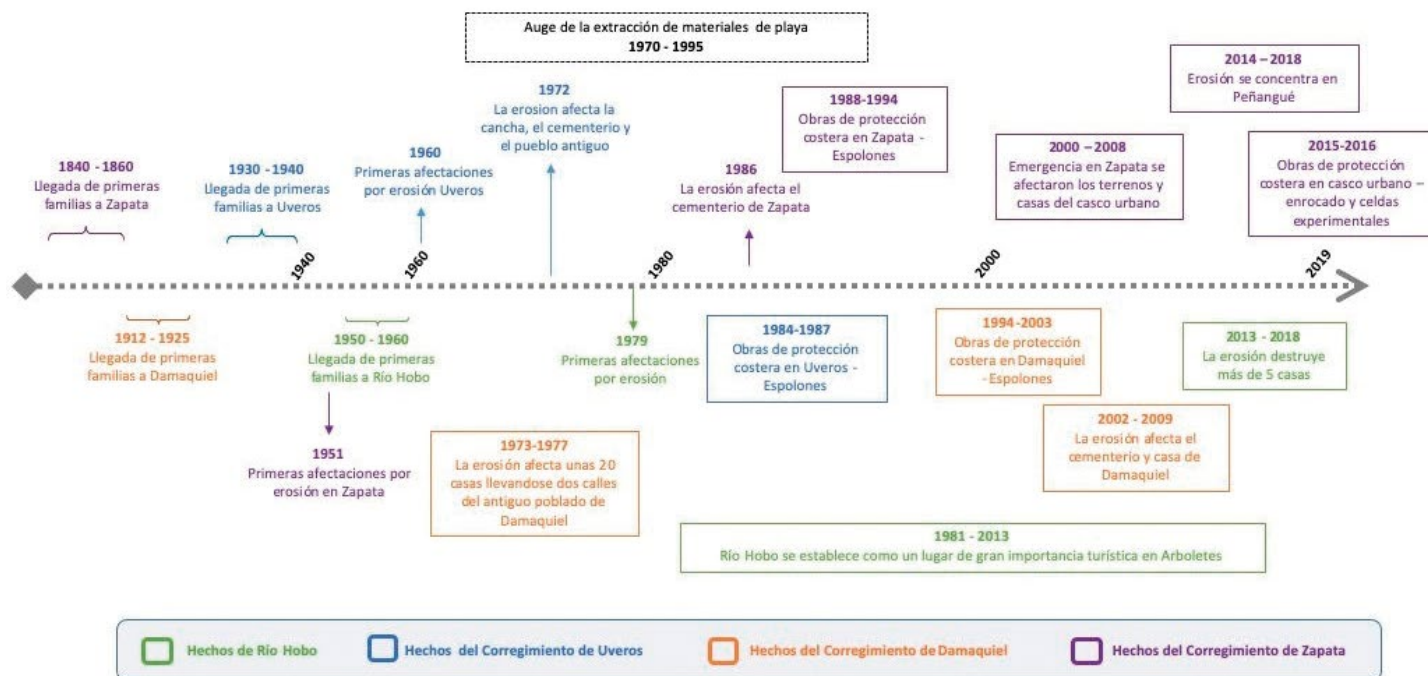


Figura 2.2 Línea de tiempo construida con información aportada por los diferentes actores estratégicos de las áreas estudiadas. (Fuente: Elaboración propia – Componente Social).

espolón frente al cementerio.

Según la percepción de la comunidad de Damaquiel el segundo espolón, ubicado en la punta, es el que ha protegido la playa frente al caserío, y compensa parte de los problemas causados por el primer espolón construido en 1991.

Entre el año 2001 y el 2003 con la administración municipal de Miguel Ángel Zuluaga se reconstruyeron dos espolones en el corregimiento de Damaquiel con bolsacretos. En principio, los espolones que iban a alargarse y ensancharse eran los primeros que habían sido construidos sobre la playa en la zona este y el que había quedado a la mitad frente al cementerio, pero de la misma forma que había ocurrido una década antes, la comunidad organizó una gran protesta, impidiendo a la entidad que estaba trabajando que se siguieran las obras hasta que se cambiara el trabajo del frente del cementerio hacia el espolón de la punta.

Además de las obras realizadas y financiadas por entidades locales y nacionales, los habitantes del corregimiento han organizado varias actividades para intentar proteger la playa y los terrenos de la erosión costera. A través de convites, que son llamados colectivos para trabajar conjuntamente por un propósito común, se han hecho jornadas de mantenimiento de los espolones existentes, poniendo piedras o cambiando las que existen en espolones que están sumergidos hacia otros.

En el caso de Uveros el primer espolón se construyó en 1987. Este primer espolón y el segundo son, según la percepción de la comunidad, los que estabilizaron la grave situación que se vivía en ese momento. La administración local les hizo mantenimiento y mejoras a esas obras en el 2006 y en el 2011. Además, algunos dueños de locales frente a la playa han pagado viajes de piedra que han

arrojado frente a sus terrenos para intentar protegerlos del avance del mar, en especial en época de verano. Con la construcción y mantenimiento de los espolones la comunidad también ha visto que la erosión ha llegado a la zona de manglares.

En el caso de Zapata, la Alcaldía municipal construyó los primeros espolones en 1988 y en 1994 se construyó uno nuevo. A pesar de esto, el problema continuó, sobre todo desde el año 2000 cuando se estaba perdiendo casi todo el terreno del caserío. En el 2003 el DAPARD, actualmente DAGRAN, sugiere reubicar el pueblo y en el 2004 se refuerzan los espolones existentes, no obstante, el problema se intensifica y en el 2008 se declaró la emergencia que llevo a la reubicación de 15 familias que estaban en alto riesgo.

La situación tuvo una cierta estabilización frente al caserío de Zapata con la construcción del enrocado y de las celdas experimentales en el 2016, sin embargo, la erosión se concentra en el sector de Peñangué donde persiste el problema hasta la actualidad.

Este auge de las obras de infraestructura evidencia la magnitud del problema. Como lo describieron estudios sobre la erosión en la región, en las últimas cuatro décadas se dieron retrocesos de la línea de costa de los 50 - 100m en varios sectores. Puede afirmarse con seguridad que las altas tasas de erosión de las terrazas y acantilados se facilitan en función de las características geotécnicas muy pobres de sus rocas y sedimentos. Especialmente en las cercanías de las intrusiones diapíricas (Arboletes Damaquiel) y en las zonas de fracturas y posibles fallas, los acantilados están conformados por un nivel basal de arcillolitas y lodolitas buzando hacia el mar, y fuertemente fracturadas y meteorizadas. La erosión litoral ha afectado indiscriminadamente a playas y a acantilados, pero los sectores en donde se han

presentado los impactos erosivos más fuertes son las zonas de Zapata, Damaquiel y punta Arboletes Arboletes, en donde se constataron tasas de erosión desde siete hasta 40 m/año. Correa Arango y Vernette (2014) afirman que las posibles causas de esta problemática son “problemas geológicos y físicos (re equilibrio isostático por basculamiento y movimientos asociados a diapirismo) e intervenciones antrópicas que van desde modificaciones a los sistemas fluviales (construcción de presas, desviación de cauces, tomas de agua para irrigación), extracción histórica de material de playa para construcción, ausencia del sistema de control de aguas de escorrentía, de filtraciones de tanques y de tuberías de casas”²⁰.

2.2.3 La población impactada por la erosión costera en la actualidad

La erosión costera en los lugares analizados ha afectado cientos de familias que habitan o trabajan en el litoral de Damaquiel, Zapata, río Hobo, volcán de lodo y Uveros. Si bien se han visto perjudicados los propietarios y administradores de fincas ganaderas, casas fincas dedicadas al turismo o establecimientos comerciales, han sido familias dedicadas a la agricultura y a la pesca las que se han visto más afectadas por la erosión costera. Se trata de familias de bajos recursos, la mayoría víctimas de la violencia, cuya subsistencia depende de la agricultura o de la ganadería, a menor escala que desarrollan en los predios del litoral, y cuyos únicos lugares de habitación y mejoras se encuentran en la línea de costa.

En el caso de Damaquiel, la población impactada por la erosión costera está ubicada principalmente al sur occidente del casco urbano del corregimiento en cercanías a la vereda “*Entra si puedes?*”. Allí, donde la tasa de erosión ha sido de 1,8 metros anuales aproximadamente, a partir de las revisiones y de los análisis hechos por la Componente de Geología desde las fotografías aéreas comparadas, se han visto afectadas algunos terrenos donde las familias siembran pancoger o donde tienen algunos animales, así como dos fincas una destinada al cultivo de coco y otra al turismo.

Según se logró identificar con participación de líderes y lideresas de la comunidad de Damaquiel, hay unos 18 terrenos ubicados en la línea de costa en el sector que están siendo afectados por la erosión costera en los últimos tiempos, la mayoría de los cuales han sufrido la pérdida de áreas destinadas a cultivos de pancoger y a solares.

— En Uveros, al revisar los impactos o afectaciones más

20 CORREA-ARANGO, Iván D & VERNETTE, Georges. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa caribe colombiana. En: Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, Santa Marta, v. 33, n. 1, Dec. 2004, pp 07-28. (2004).

21 LA VANGUARDIA. La erosión y los sedimentos afectan cada vez más las playas de Urabá. 10 de agosto del 2014, Disponible en: <https://www.vanguardia.com/colombia/la-erosion-y-los-sedimentos-afectan-cada-vez-mas-las-playas-de-uraba-EGVL273205> [Citado en 08, diciembre, 2018].

22 UDEA. Línea del tiempo de río Hobo. Taller de caracterización de población base de río Hobo, Arboletes Antioquia. UDEA-PEC, agosto 16 de 2018.

recientes y actuales, la población evidencia que, a partir de los espolones construidos y a los que se realizó mantenimiento en 2011, no se han recibido mayores impactos, la playa se mantiene; a excepción de picos altos de oleaje que se presentan en momentos de la temporada de invierno, en donde el mar llega hasta las nuevas construcciones hechas por los estaderos- restaurantes ubicados sobre la calle de la playa de Uveros.

En el caso de río Hobo, las mayores afectaciones se presentaron en el 2014, según el DAPARD, actualmente DAPARD-GRAN, en ese momento las 86 familias que habitaban en río Hobo debían ser reubicadas de inmediato porque “un talud de nueve metros amenaza [ba] sus vidas”²¹. No obstante, según los datos aportados por los líderes y lideresas de río Hobo solo cinco familias fueron reubicadas al año siguiente²², por lo que el resto de familias continuaron en situación de riesgo.

En el caso de Zapata, el problema de erosión actualmente se concentra en el sector de Peñangué, allí sobre la línea de costa se encuentran principalmente terrenos familiares con cultivos de pancoger, cría de animales (aves y cerdos) y casas construidas en madera y techo de zinc o caña flecha. Para las familias que habitan en esta zona, sus terrenos son la principal fuente de recursos ya que viven de la agricultura de subsistencia y de la pesca en cercanías a sus terrenos.

En esta zona costera, se identificaron nueve predios localizados entre el límite urbano del centro poblado de Zapata y de la finca Campanario, la cual cuenta con una obra de financiación privada, a partir del mismo principio del muro enrocado con exitoso resultado. De estos nueve predios, siete están habitados por sus propietarios y sus familias desde hace más de 20 años, habitan 41 personas, mayoritariamente mujeres, la fuente de ingresos principal de estas familias es la agricultura de subsistencia con cultivos de plátano, coco, maíz, frutales y la cría de animales, como gallinas y cerdos, así como la ganadería a pequeña escala sobre todo destinada a la producción de leche.

2.3 Análisis

A partir de estas etapas de cambios de usos del territorio mencionadas en los resultados, se evidencia un nuevo orden ambiental, social y arquitectónico con poca planeación de manejo de las costas.

Esto se ha expuesto en los proyectos planeados para la subregión, desde el Gobierno departamental y nacional, los



Figura 2.3 Peñangué, Corregimiento de Zapata, 2018. (Fuente: Tomada por Equipo Componente Social).

cuales hacen referencia a una amplia infraestructura, que



Figura 2.4 Qué implica la participación social en el ordenamiento territorial. (Fuente: Elaboración propia – Componente Social).

prioriza las vías de conectividad entre el centro del país y la zona de periferia y de frontera, la salida al mar, desde una perspectiva comercial, económica, ligado a los proyectos de interés nacional para aumentar los lugares de embarque para las importaciones, con alrededor de cinco proyectos de puerto un propósito entre los municipios de Apartadó, Necoclí y el distrito de Turbo.

El Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 establece la línea de Competitividad e infraestructura estratégicas, con dos objetivos relevantes que enmarcarían la tendencia propuesta: Objetivo 1. Incrementar la productividad de las empresas colombianas a partir de la sofisticación y diversificación del aparato productivo, y Objetivo 4. Proveer la infraestructura y servicios de logística y transporte para la integración territorial.

Por otra parte, Antioquia ha virado entonces su mirada hacia el mar, como un lugar estratégico para viabilizar estas estrategias. Dentro del Plan regional de Competitividad de Antioquia se genera un plan de trabajo Horizonte 1

(2009-2011) donde se plantean las estrategias y las acciones para desarrollar una serie de inversiones en infraestructura donde se destacan, para la subregión de Urabá: 1. Concesión vial Nueva Independencia (Mar I y Mar II): *Medellín - Santa Fe de Antioquia - Mutatá- Turbo - Necoclí ; y *Santa Fe de Antioquia - Bolombolo; 2. Corredor vial marginal del Caribe (*Puerto Escondido - Arboletes - Necoclí); 3. Vía Panamericana del Darién. A su vez, en el Plan de Trabajo Horizonte 2 (2012-2020) se incluye dentro del transporte multimodal el Puerto de Urabá y el Corredor vial Valle de Aburrá - Golfo de Urabá como una prioridad.

Así mismo, dentro del Plan regional de Competitividad de Antioquia (2011) se establecen algunos objetivos específicos para la región de Urabá en torno a: 1. Desarrollo Empresarial: Estructurar el perfil de las potencialidades de Urabá como región; 2. Infraestructura y conectividad: Plan de gestión de la Promotora del Sistema Portuario de Urabá; 3. Desarrollo del Talento Humano: Construcción de la Sede de Ciencias del Mar en Urabá.

Finalmente, dentro de la visión 2020 de Antioquia construida en 1997, de manera específica se señala como uno de los principales factores de éxito en el área de infraestructura de Antioquia el “desarrollo integral del puerto de Urabá y desarrollo de puertos en el Pacífico” (Corporación consejo de competitividad de Antioquia 1999. “El norte está claro. Prospectiva de Antioquia y formulación de visión al 2020”. Cámara de Comercio de Medellín. p. 74), lo cual vendría anudado de otros factores como una infraestructura vial adecuada, la construcción de túneles y desarrollo de megaproyectos asociados, la construcción del canal interoceánico.

Por otra parte, de los resultados del taller tres, en donde se valoraban las expectativas de las obras o propuestas para frenar la erosión costera en los puntos priorizados, con el fin de identificar y de concertar con la comunidad las propuestas planteadas para la solución del problema erosivo, así como las posibles acciones que se propondrían para la estabilización, principalmente se denota la necesidad de las comunidades participantes, sobre todo de quienes laboran en actividades de pesca, cultivos, artesanías a partir de material de playa y de quienes tienen negocios, como casetas sobre la línea de costa, de mantener el litoral para sus usos activamente y así lograr mantener el acceso todo el año a la costa y a los materiales y elementos que se aprovechan en ella.

Esto mostró que, si bien las necesidades para las autoridades municipales se inclinan hacia la conservación del terreno y su estabilización para las etapas futuras de transformación del uso del territorio con proyectos de grandes dimensiones que se prevén, para la comunidad, esta necesidad no está vigente, porque han observado la dinámica del mar de frente y en cambio, su interés, es conservar los usos de mediana y pequeña escala. Aquí además radica la disputa entre los usos públicos y privados de los lugares importantes para la población, a lo largo del litoral. Sobre un lugar público y común, se planea un uso en beneficios



Figura 2.5 Cartografías sobre la erosión. Recuerdos y propuestas. (Fuente: Elaboración propia Comunidad de Damaquiel – Componente Social).

de solo una parte de la población y en ocasiones de acceso privado.

Esto deja a la erosión costera y por ende a las soluciones propuestas en la necesidad de articular visiones y necesidades para enfocar recursos públicos, recursos humanos de la comunidad local y académica de la región, en acciones y estrategias que conecten e integren las múltiples visiones. Esta articulación no se ha logrado, y, por ende, algunas acciones de mitigación o compensación no han resultado como parte de las soluciones reales a la problemática de erosión, que como bien se ha mencionado anteriormente, se constituye en un problema social y político.

Por ejemplo, en el año 2015 el municipio de Arboletes reubica a cuatro familias de río Hobo para Villa Diana, que es una urbanización de familias damnificadas por varias situaciones como inundaciones, violencia por conflicto armado etc. Asimismo, desde octubre de 2018 el DAPARD, actualmente DAGRAN, adelantó las actividades pertinentes para nuevas reubicaciones de las familias que están en alto riesgo por la erosión costera. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas familias dependen económicamente de actividades en río Hobo, la mayoría de las personas que forman parte de una misma familia, subsisten de vender comidas (arroz de cangrejo, arepas, pescado), y de artesanías que hacen con material que encuentran en la playa, y que no cuentan con una vivienda alterna propia y llegan a la zona por procesos migratorios en la región.

En relación con las expectativas de las obras por construir para estabilizar la erosión costera, los habitantes de río Hobo consideran que el enrocado es la propuesta que más se adecúa a sus necesidades. Consideran que si se construye el enrocado debe tenerse en cuenta la creación de una rampa o una forma de acceso al río y la continuación del enrocado en el costado de la comunidad que da al río, en la medida que este también ha venido ocasionando erosión. Ellos consideran que sobre este enrocado se podrían sembrar algunos árboles como el coco y el manglar, y construir una especie de malecón que permita mantener las actividades económicas, particularmente la venta de comidas y

de artesanías a los turistas. Por otro lado, manifiestan la importancia de considerar un espacio para que los pescadores puedan dejar sus botes, y pensar en la opción de reforestar el manglar en los alrededores del río.

Asimismo, se ejemplifica en el corregimiento de Zapata, donde se construyeron celdas experimentales en 2016, y se planea una obra de mejora a las áreas del casco urbano, para el disfrute de otras actividades como el turismo, y obras de infraestructura con accesos más cómodos para los pescadores a través del enrocado; sin embargo, se evidencia un problema muy grande de erosión en el sector rural en Peñangué, que se enmaraña con asuntos no resueltos con los predios privados que se encuentran sobre la línea de costa en este sector, la población que los ocupa hoy y quienes tendrían la propiedad.

Finalmente, las obras propuestas por las comunidades, muestran una prioridad por modificaciones enfocadas hacia el turismo que, eventualmente podría dinamizarse más fácilmente en el mismo territorio con actividades económicas tradicionales y/o en pequeña escala y de subsistencia, directamente relacionadas con las costas, además de las actividades de tráfico de mercancías, relativa a la posición estratégica de estos poblados y su característica portuaria.

2.4 Conclusiones

La relación de las actividades antrópicas y las decisiones políticas frente al acceso de las poblaciones costeras a los servicios básicos para su uso cotidiano, se evidencia en el problema de erosión, a causa, entre otras, de focos de desagüe de aguas residuales, o de caños con alto contenido de proteínas, derivados del desecho de actividades humanas que van alterando en el tiempo el material y la formación de la línea de costa. Su geografía nos muestra los múltiples afluentes de agua que le alimentan y todos los caseríos, fincas de ganadería y ciénagas que los rodean. Sin embargo, en los planes de desarrollo 2020 a 2023, aún no se terminan de incluir estrategias para el manejo de residuos, los acueductos municipales con cobertura a grandes corregimientos como Damaquiel y Necolí, declaró calamidad pública el pasado 26 de julio de 2021 “por la escasez del agua como consecuencia de la alta demanda del servicio [...]”. Evidentemente, se requiere una planeación y administración pública transversal a los impactos socioambientales que no se han asumido en la historia moderna de los territorios costeros.

La población que habita la mayoría de la costa en el golfo de Urabá antioqueño no participa del ordenamiento territorial, pero si está destinada a migrar los usos del territorio, en tanto se superponen otros proyectos y usos que transforman el lugar poblado y las aguas con las cuales se relacionan al estar en la zona litoral. Esto, sumado a que el contexto del conflicto armado ha tenido entre sus objetivos la desintegración del tejido social, reduciendo así la

posibilidad de asociarse, colectivizar saberes y escenarios de participación, efecto también de los distintos procesos migratorios que han configurado lo que hoy es Urabá.

Parte de las actividades económicas de la población porteña, como se han reconocido históricamente muchas de las puntas o cabos que sobresalen entre las bahías de la costa antioqueña, podrían seguir siendo las relacionadas con el tráfico ilegal de variedad de productos que van desde licores y cigarrillo y la producción de productos agrícolas como banano, plátano, piña y palma, de un comercio administrado desde los centros de la subregión y del país, en tanto las otras actividades como pesca, uso de materiales de playa, cocina o turismo se agotan en el proceso de cambio del territorio, además porque no hay un relevo generacional fuerte. El cambio en las actividades, efectivamente mostrará un cambio en la dinámica ambiental del manglar como ecosistema, del mar y de la zona de bajamar, en tanto no habrá una presión por los recursos pesqueros y posiblemente tampoco haya un impacto alto sobre el material de playa y los concheros, y sí habrá necesidad de transitar con mayor frecuencia los esteros y atravesar el golfo, inclusive con embarcaciones mucho más grandes. Esto llevará por ejemplo a nuevos dragados, a disponer el material de playa en lugares diferentes y a modificar la vegetación que aún existe sobre la costa.

Finalmente, puede concluirse que un problema que enfrenta todo el golfo a raíz de las dinámicas del oleaje, la plataforma continental y la variedad de sedimentos, las formaciones geológicas y la vegetación propia de cada lugar, está directamente relacionado con la manera como se modifica ese lugar, se administran los recursos y materiales disponibles, no solo en el punto inmediato de uso y poblamiento, y está ligado este problema de erosión también a las decisiones políticas para administrar el mismo territorio. Por ende, este proyecto es una evidencia de la necesidad de continuar realizando un análisis y propuesta de soluciones a problemas ambientales y de infraestructura, desde la comprensión social y política de los lugares, esto implica, con la gente y desde la gente, reconociendo la diversidad de actores en lo local y en lo regional, entendiendo por supuesto que las “comunidades” no son una sociedad homogénea, sino que, también hay diversidad de intereses económicos, políticos, sociales, y por ende coexisten distintos conflictos, tipos de actores y territorialidades en una sola comunidad.

Por lo anterior, en el apartado de consideraciones se propuso una valoración multicriterio para la priorización de obras que incidirán en todo el golfo de Urabá, para que la manera de planear desde la administración pública no sea desde la perspectiva económica de los costos de las obras, sino que se combine la decisión desde criterios sociales, que impliquen planear y ejecutar políticas con impacto en los territorios y en el ambiente, desde una visión sistémica, porque Antioquia tiene mar con gente.

2.5 Referencias

Alcaldía de Arboletes (2008) Plan de Desarrollo: Porque el desarrollo es tarea de todos 2008 - 2011.

Alcaldía de San Juan de Urabá: erosión costera un enemigo silencioso (2016). Disponible en <http://www.sanjuandeuraba-antioquia.gov.co/NuestraAlcaldia/SaladePrensa/Paginas/Erosion-costera-un-enemigo-silencioso.aspx>.

Alcaldía Municipal de Arboletes (2016). Plan de desarrollo 2016-2019 “acciones para consolidar la paz”. CARACOL RADIO. Comunidad de Puerto Rey bloquea vía Montería – Arboletes. 08, enero, 2019. Disponible en: http://caracol.com.co/emisora/2019/01/08/monteria/1546955001_447964.html [Citado en 13, enero, 2019].

Alcaldía Municipal de Necoclí (2012). Plan De Desarrollo Municipal 2012-2015. p.151.

Aqua & Terra (2010). Elaboración, ajuste, adecuación, actualización, de los estudios y diseños de la obra “Construcción de obras de protección para la recuperación de una parte del litoral Caribe, municipio de Arboletes”. Aqua & Terra-Conalvías S.A.

Alcaldía de San Juan de Urabá (2016). Plan de Desarrollo 2016 – 2019.

Comisión Tripartita y Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia (2009). Plan regional de competitividad de Antioquia: Un modelo a seguir en materia de ciencia, tecnología e innovación.

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

García, Clara Inés (1997). Urabá: políticas de paz y dinámica de guerra En: Estudios Políticos, no. 10 (1997): p. 140.

Las Dos Orillas. La trágica historia del EPL en Urabá. Disponible en: <https://www.las2orillas.co/la-tragica-historia-del-epl-en-uraba/> [citado en 02, septiembre, 2017].

Paneso, Isabel y Rendón, Esteban (2014). Estudio general de impacto ambiental para alternativas de mitigación contra la erosión costera, en el área de Arboletes - Los Córdoba, municipio de Arboletes (Antioquia).

Pérez, Javier (2007). El Caribe antioqueño: entre los retos de la geografía y el espíritu paisa. Documentos de trabajo sobre economía regional. Banco de la República. Centro de Estudios Económicos Regionales CEER, No 88, abril 2007, p.10.

PNUD (2015). Perfil productivo municipio de Arboletes. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Saldarriaga L., León (2012). Al aeropuerto de Turbo

solo vuela la agonía. Periódico El Colombiano. Antioquia. Disponible en: http://www.elcolombiano.com/historico/al_aeropuerto_de_turbo_solo_vuela_la_agonia-PBEC_173729. Consultado 10 de julio de 2018.

UARIV (2018). Víctimas de desplazamiento por año de ocurrencia. Necoclí, Antioquia. Bogotá: Red Nacional de Información [revisado el 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://cifras.unidadvictimas.gov.co/>

UDEA (2018). Entrevista realizada a Mesa ambiental pro-defensa. Arboletes, Antioquia. UDEA- PEC, 2018.

UDEA (2018). Informe de taller 2. Corregimiento de Zapata. Medellín: UDEA, octubre de 2018.

UDEA. Línea de tiempo de Damaquiel. Damaquiel, San Juan, Antioquia. UDEA- PEC, 02, septiembre, 2018.

UDEA (2018). Línea del tiempo de río Hobo. Taller de caracterización de población base de río Hobo, Arboletes Antioquia. UDEA-PEC, agosto 16 de 2018.

UDEA (2018). Línea del tiempo. Corregimiento de Zapata, Necoclí, Antioquia. Medellín: UDEA- PEC, septiembre 2 de 2018.

UDEA (2018). Taller de caracterización de población base de río Hobo. UDEA-PEC. Agosto 16 de 2018.

Universidad De Antioquia, Gobernación De Antioquia (2012). Diagnóstico Técnico municipio de San Juan de Urabá, Antioquia.

UDEA (2018). Relatoría del taller de caracterización de población base del corregimiento de Uveros. UDEA-PEC. Agosto 18 de 2018.

UDEA (2018) Línea de tiempo de Damaquiel. Damaquiel, San Juan, Antioquia. UDEA- PEC, 02, septiembre, 2018.

UDEA (2018). Taller de caracterización de población base del corregimiento de Damaquiel. UDEA-PEC. Septiembre 2 de 2018.

Capítulo 3°

EROSIÓN
COSTERA

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 3º

Componente

Valoración

Económica

Autora

Myriam Elizabeth Vargas Morales
(MSc en Economía del Medio Ambiente
y de los Recursos Naturales)

3.1 Introducción

Las zonas costeras experimentan crecientes tasas de erosión debido a causas naturales y antropogénicas, dentro de las que se cuentan el ascenso del nivel de mar, la reducción en la cantidad de sedimentos traídos a las costas y la transformación de las áreas costeras naturales para urbanización (Alvest et al. 2009). El impacto de este proceso está concentrado en las áreas costeras, y tiene gran relevancia dado que estas áreas sostienen el 40% de la población mundial y una gran variedad de servicios ecosistémicos (Roebeling et al. 2011).

La erosión costera puede ser mitigada mediante la implementación de obras de protección costera (como estructuras adherentes y rompeolas, alimentación de playas o reconstrucción de dunas artificiales), sin embargo, estas necesitan ser evaluadas antes de establecerse, a fin de conocer si el beneficio que aportan a la sociedad justifica los costos de su implementación. Esto no solo por las restricciones presupuestales gubernamentales, sino porque los efectos de estas obras no se reducen al control de la erosión, pues al representar una interferencia con el medio ambiente costero, pueden conducir a múltiples y a diferentes impactos sobre la línea costera.

En este sentido, el establecimiento de obras de protección costera implica, tanto beneficios derivados por el mantenimiento de la infraestructura urbanística asociada y los valores de los ecosistemas costeros sostenidos, como inversiones y costos de mantenimiento de las obras. Por lo tanto, los gerentes de las zonas costeras deberían, entre otros, contar con un análisis costo-beneficio que les permita definir estrategias de protección, adaptación y/ o retirada (Nicholls y Tol, 2006; Alves et al. 2009).

Antioquia es uno de los departamentos destacados por los procesos erosivos en Colombia. Sus tasas de erosión pueden alcanzar los 40 metros m/ año en algunos lugares. Con el fin de contar con un criterio complementario a la viabilidad técnica de las obras, la viabilidad social (aceptabilidad de la obra por parte de la comunidad) y la viabilidad ambiental (impacto ambiental), para asegurar que se seleccione una respuesta de gestión óptima, a continuación, se

presenta un análisis costo beneficio de las obras de estabilización propuestas para el golfo de Urabá antioqueño.

El análisis ofrece *grasso modo* una mirada costo eficiente de las obras de estabilización, con un alcance básico en la estimación de beneficios y costos monetarios de las obras, dado que no incluye los beneficios asociados a la obra, ni los costos externos de la misma, en tanto existían restricciones presupuestales para ejecutar estas temáticas. Sin embargo, muestran que las obras sí representan un cambio en el bienestar de los agentes que son beneficiarios de ellos, en todo el golfo de Urabá.

3.2 Métodos

El marco de estimación de los beneficios derivados de las obras de estabilización del proceso erosivo, a lo largo del golfo de Urabá antioqueño consideró tres métodos: la valoración contingente, los costos evitados y la transferencia de beneficios. Las características de aplicación de cada uno de los métodos se presentan en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

La población y la muestra para los diferentes puntos es presentada en la Tabla 3.5.

La estimación del valor presente neto (VPN) está dada por:

$$VPN = \sum_{t=1}^N \left[\frac{BN_t}{(1+r)^t} \right]$$

Donde N es la vida útil de la obra; BN corresponde a los beneficios netos en el periodo t, los cuales consideraron los beneficios estimados mediante los diferentes métodos de valoración económica y los costos de inversión y mantenimiento generados por la Componente de Diseño Estructural de las Obras del proyecto de investigación; y r es una tasa de descuento nominal, que para este caso se ha regido por 12% en coincidencia con las tasas de descuento que utilizan las entidades financieras multilaterales como el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo para evaluar proyectos de inversión social. Adicionalmente se consideraron la tasa de interés de los depósitos a término fijo (DTF) (4.54%) y una tasa de descuento similar a la que considera proyectos ambientales (3%).

Sitio	Población	Muestra		
		Muestra	% Confianza	% Error
Río Hobo	28,926	353	94.1	5
Volcán de Iodo	28,926	353	94.1	5
Uveros	334	153	95	6
	3,508	157	93	7
Damaquiel	262	154	94.5	5
Zapata	359	186	95	5
Punta Las Vacas	23,300	204	91.5	6

Tabla 3.5 Población y muestra para estimación de beneficios derivados de las obras de estabilización del proceso erosivo en el golfo de Urabá antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

	UVEROS RESIDENTES	UVEROS TURISTAS
Método de valoración económica	<p>Valoración contingente con disponibilidad a pagar consultada en formato abierto.</p> <p>Se utilizaron encuestas cara a cara, aplicadas aleatoriamente en todo el centro poblado de Uveros, entre el 30 de enero y el 1 de febrero de 2019.</p>	<p>Valoración contingente con disponibilidad a pagar consultada en formato abierto.</p> <p>Se utilizaron encuestas cara a cara, aplicadas aleatoriamente en la playa de Uveros, entre el 28 de enero y el 29 de enero de 2019.</p>
Bien o servicio a valorar	<p>Protección contra derrumbamiento y/o inundación de infraestructura residencial a través de una disminución en la tasa de erosión costera.</p>	<p>Recreación en playas.</p>
Status quo y nivel de cambio.	<p>Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (0.5- 1 m/año) para el sector de Uveros (Tasa tomada de este Proyecto), que se traducía en un riesgo crítico de atención no inmediata (Posada y Henao, 2008) sobre el nivel de protección costera contra inundaciones de infraestructura residencial.</p> <p>Dada la implementación de la obra de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/año, traducida en un riesgo bajo de inundación de la infraestructura residencial. Se especifica que el mantenimiento de esta tasa de erosión sería durante 20 años aproximadamente, que corresponde a la vida útil de la obra.</p>	<p>Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (0.5- 1 m/año) para el sector de Uveros (Tasa tomada de este Proyecto).</p> <p>Dada la implementación de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/ año, traducida en el mantenimiento actual de la extensión de la playa: 25.41 m con longitud de 11.78 m, durante 20 años aproximadamente, que corresponde a la vida útil de la obra.</p>
Beneficiarios	<p>Se estimó un total de 334 hogares beneficiarios en el centro poblado de Uveros.</p>	<p>Se estimó un total de 3,508 visitantes beneficiarios de las playas de Uveros.</p>
Medio de pago	<p>El vehículo de pago propuesto fue horas a la semana trabajadas de forma gratuita en actividades de mantenimiento y monitoreo de las obras de protección. Las actividades de mantenimiento y monitoreo, así como los momentos en que deberían realizarse estas actividades, se coordinarían entre la comunidad local y las entidades gubernamentales.</p>	<p>El vehículo de pago propuesto fue un aporte monetario voluntario para acceder a la playa de Uveros con el cual la comunidad, con apoyo de las entidades gubernamentales, realizarían actividades de mantenimiento y monitoreo de las dunas de arena artificiales que permitirían detener el proceso erosivo de la playa y la pérdida de esta área para recreación. Estas actividades estarían a cargo de la comunidad local y las entidades gubernamentales.</p>
Muestra	<p>Se estimó tomando en cuenta el reporte de hogares en el centro poblado de Uveros del Censo General 2005 (251 hogares) y proyectando con una tasa de crecimiento del 36% (calculada con base en las proyecciones de hogares entre 2005 y 2018 para el departamento de Antioquia), que a 2018 representa un total de 334 hogares. La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 153 hogares, siendo representativa de los hogares de Uveros con un margen de error del 6% y un nivel de confianza del 95%.</p>	<p>Se estimó tomando en cuenta el reporte de habitantes en el centro poblado de Uveros en el Censo General 2005 (1168 habitantes) y proyectando anualmente el crecimiento con una tasa del 36%, que a 2018 representa un total de 1508 habitantes. Además, se incluyó el reporte de visitantes de Uveros en 2018, que ascendió a 2000 visitantes. La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 157 visitantes, siendo representativa de los visitantes de Uveros con un margen de error del 7% y un nivel de confianza del 93%.</p>

Tabla 3.1 Marco de estimación de beneficios para golfo de Urabá antioqueño (Uveros: Residentes y turistas). (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

	DAMAQUIEL	ZAPATA
Método de valoración económica	<p>Costos evitados</p> <p>Se utilizaron encuestas cara a cara, aplicadas aleatoriamente en todo el centro poblado de Damaquiel, entre el 3 y 4 de febrero de 2019.</p>	<p>Valoración contingente con disponibilidad a pagar consultada en formato abierto para la Alternativa 2</p> <p>Se utilizaron encuestas cara a cara, aplicadas aleatoriamente en todo el centro poblado de Zapata, del 5 al 7 de febrero de 2019.</p>
Bien o servicio a valorar	<p>Protección contra derrumbamiento de infraestructura residencial a través de una disminución en la tasa de erosión costera.</p>	<p>Protección contra derrumbamiento de infraestructura residencial a través de una disminución en la tasa de erosión costera.</p>
Status quo y nivel de cambio.	<p>Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (1.2 m/año) para el sector de Damaquiel (Tasa tomada de este Proyecto), que se traducía en un riesgo crítico de atención no inmediata (Posada y Henao, 2008) sobre el nivel de protección costera contra derrumbamiento de infraestructura residencial.</p> <p>Dada la implementación de la obra de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/año, traducida en un riesgo bajo de derrumbamiento de la infraestructura residencial. Se especifica que el mantenimiento de esta tasa de erosión sería durante 50 años aproximadamente, que corresponde a la vida útil de la obra.</p>	<p>Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (4.5 m/año) para el sector de Zapata (Tasa tomada de este Proyecto), que se traducía en un riesgo crítico de atención inmediata (Posada y Henao, 2008) sobre el nivel de protección costera contra derrumbamiento de infraestructura residencial.</p> <p>Dada la implementación de la obra de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/año, traducida en un riesgo bajo de derrumbamiento de la infraestructura residencial. Se especifica que el mantenimiento de esta tasa de erosión sería durante 30 años aproximadamente, que corresponde a la vida útil de la obra.</p>
Beneficiarios	<p>Se estimó un total de 262 hogares beneficiarios en el centro poblado de Damaquiel.</p>	<p>Se estimó un total de 359 hogares beneficiarios en el centro poblado de Zapata.</p>
Medio de pago	<p>Se explora la disponibilidad a aceptar por la vivienda, dado que no fue posible acceder a los valores catastrales del corregimiento.</p>	<p>El vehículo de pago propuesto fue horas a la semana trabajadas de forma gratuita en actividades de mantenimiento y monitoreo de las obras de protección. Las actividades de mantenimiento y monitoreo, así como los momentos en que deberían realizarse estas actividades, se coordinarían entre la comunidad local y las entidades gubernamentales.</p>
Muestra	<p>Se estimó tomando en cuenta el reporte de hogares en el centro poblado de Damaquiel en el Censo General 2005 (197 hogares) y proyectando con una tasa de crecimiento del 36% (calculada con base en las proyecciones de hogares entre 2005 y 2018 para el departamento de Antioquia), que a 2018 representa un total de 262 hogares. La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 154 hogares, siendo representativa de los hogares de Damaquiel con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 94.5%.</p>	<p>Se estimó tomando en cuenta el reporte de hogares en el centro poblado de Zapata en el Censo General 2005 (270 hogares) y proyectando con una tasa de crecimiento del 36% (calculada con base en las proyecciones de hogares entre 2005 y 2018 para el departamento de Antioquia), que a 2018 representa un total de 359 hogares. La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 186 hogares, siendo representativa de los hogares de Zapata con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%.</p>

Tabla 3.2 Marco de estimación de beneficios para el golfo de Urabá antioqueño (Damaquiel - Zapata). (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

	PUNTA LAS VACAS	RÍO HOBO
Método de valoración económica	<p>Valoración contingente con disponibilidad a pagar consultada en formato abierto para la Alternativa 2.</p> <p>Se utilizaron encuestas cara a cara, aplicadas aleatoriamente en las cabeceras municipales de Arboletes, San Juan de Urabá, Necoclí y Turbo, entre el 22 de febrero y el 27 de febrero de 2019.</p>	<p>Valoración contingente con disponibilidad a pagar consultada en formato abierto.</p> <p>Se utilizaron encuestas cara a cara, aplicadas aleatoriamente en los lugares más concurridos de la cabecera municipal de Arboletes, del 26 al 28 de enero y del 1 de marzo al 4 de marzo de 2019.</p>
Bien o servicio a valorar	<p>Protección de las instalaciones de la Armada Nacional, la pista del aeropuerto y 99 viviendas en Turbo.</p>	<p>Recreación.</p>
Status quo y nivel de cambio.	<p>Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (0.5- 2 m/año) para el sector de punta Las Vacas (Correa y Vernet, 2004), que se traducía en un riesgo crítico de atención inmediata (Posada y Henao, 2008) sobre el nivel de protección costera contra derrumbamiento y/o inundación de infraestructura pública y residencial.</p> <p>Dada la implementación de la obra de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/año, traducida en un riesgo bajo de derrumbamiento de la infraestructura. Se especifica que el mantenimiento de esta tasa de erosión sería durante 10 años aproximadamente, que corresponde al periodo promedio que informaron los hogares, en encuesta piloto, que harían aportes.</p>	<p>Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (5.5 m/año) para el sector de río Hobo (Correa y Vernet, 2004).</p> <p>Dada la implementación de la obra de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/año, ofreciendo protección a la desembocadura de río Hobo por un periodo de 50 años aproximadamente, que corresponde a la vida útil de la obra, permitiendo su rehabilitación para uso recreacional.</p>
Beneficiarios	<p>Se estimó un total de 23,300 hogares beneficiarios en las cabeceras municipales de Arboletes, San Juan de Urabá, Necoclí y Turbo.</p>	<p>Se estimó un total de 10,515 visitantes potenciales anuales a río Hobo, considerando turistas y residentes.</p>
Medio de pago	<p>Se propusieron dos vehículos de pago: i) horas a la semana trabajadas de forma gratuita en actividades de mantenimiento y monitoreo de las obras de protección; ii) aporte monetario voluntario. Las actividades de mantenimiento y monitoreo, así como los momentos en que deberían realizarse estas actividades, se coordinarían entre la comunidad local y las entidades gubernamentales.</p>	<p>El vehículo de pago propuesto fue un aporte monetario voluntario para acceder a río Hobo con el cual la comunidad, con apoyo de las entidades gubernamentales, realizarían actividades de mantenimiento y monitoreo a las obras de protección (tómbolos y espolón) que permitirían detener el proceso erosivo en la desembocadura de río Hobo y rehabilitar esta área para recreación. Estas actividades estarían a cargo de la comunidad local y las entidades gubernamentales.</p>
Muestra	<p>Se estimó tomando en cuenta el reporte de hogares en las cabeceras municipales del Arboletes, San Juan de Urabá, Necoclí y Turbo disponibles en Censo General 2005 (17,530 hogares) y proyectando con una tasa de crecimiento del 36% (calculada con base en las proyecciones de hogares entre 2005 y 2018 para el departamento de Antioquia), que a 2018 representa un total de 23,300 hogares. La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 204 hogares, siendo representativa de los hogares de las cabeceras municipales del golfo de Urabá, con un margen de error del 6% y un nivel de confianza del 91.5%.</p>	<p>Se estimó tomando en cuenta el reporte de habitantes en la cabecera municipal de Arboletes de las proyecciones de población del DANE (18,411 habitantes). Además, se incluyó el reporte de visitantes de Arboletes en 2018, que ascendió a 10,515 visitantes.</p> <p>La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 353 visitantes potenciales, siendo representativa de los visitantes residentes y turistas de Arboletes con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 94.1%.</p>

Tabla 3.3 Marco de estimación de beneficios para el golfo de Urabá antioqueño (Punta Las Vacas – Río Hobo). (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

VOLCÁN DE LODO	
Método de valoración económica	Transferencia de beneficios por función de demanda. Para el ajuste de esta función de demanda se utilizaron los valores promedio obtenidos en la encuesta de valoración económica aplicada para río Hobo en 2019 (Componente Valoración Económica, 2019), considerando únicamente los visitantes que manifestaron como principal atractivo turístico de Arboletes al volcán de lodo.
Bien o servicio a valorar	Recreación.
Status quo y nivel de cambio.	Se definió como punto de partida la tasa de erosión costera más reciente disponible (1.9 m/año) para el sector de volcán de lodo (Componente Geología y Geotecnia, 2018). Dada la implementación de la obra de estabilización del proceso erosivo, la tasa de erosión sería de 0 m/año, ofreciendo protección al volcán de lodo por un periodo de 50 años, que corresponde a la vida útil de la obra (Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019), permitiendo su conservación para uso recreacional.
Beneficiarios	Se estimó un total de 3,875 visitantes anuales a volcán de lodo, considerando turistas y residentes.
Medio de pago	No aplica
Muestra	La muestra se estimó tomando en cuenta el reporte de habitantes en la cabecera municipal de Arboletes de las proyecciones de población del DANE (18,411 habitantes). Además se incluyó el reporte de visitantes de Arboletes en 2018, que ascendió a 10,515 visitantes. La muestra calculada a través de muestreo aleatorio simple fue de 353 visitantes potenciales, siendo representativa de los visitantes con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 94.1%.

Tabla 3.4 Marco de estimación de beneficios para golfo de Urabá antioqueño (Volcán de lodo). (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

3.3 Resultados

La figura 3.1 muestra cual es el principal problema que los beneficiarios de las obras de estabilización del proceso de erosión, consideran que hay en el golfo de Urabá antioqueño. Se resalta en verde el problema de erosión, el cuál es percibido como el principal problema para las poblaciones de Zapata y Damaquiel, en contraste con otros problemas como la contaminación, que hace alusión a la presencia de restos de madera y de basuras en la playa, así como descarga de aguas residuales en los caños y en el mar.

Respecto a los beneficios recibidos por las obras de estabilización del problema erosivo, la tabla 3.6 muestra que el beneficio recibido por los visitantes de los puntos turísticos del golfo de Urabá antioqueño afectados por el proceso erosivo puede valorarse entre 6 mil y 12 mil pesos por visita, mientras que el de los hogares residentes se encuentra entre los 9 mil y los 103 mil pesos mensuales por hogar.

Conforme con los costos de inversión y del mantenimiento, el valor presente neto para las diferentes pro-

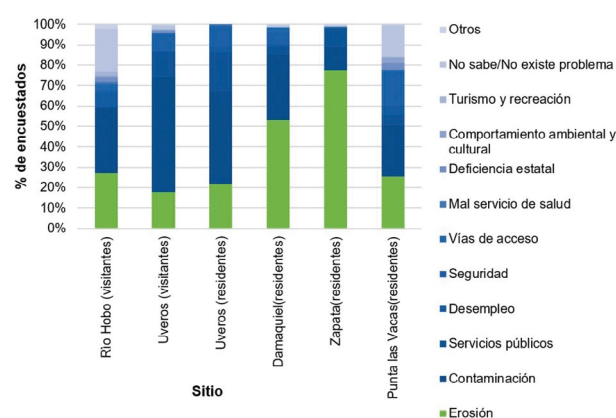


Figura 3.1 Principal problema que afecta a río Hobo, Uveros, Damaquiel, Zapata y punta Las Vacas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

Nota: Otros: Pérdida del volcán, hacinamiento escolar, falta de puerto, el irrespeto, los precios de consumo, el cementerio, los perros callejeros.

puestas de obras de estabilización del proceso erosivo se presenta en las figuras 3.2, figura 3.3 y figura 3.4.

Sitio	Tipo de agente	Valor \$persona o \$hogar
Río Hobo	Visitantes	11.952/persona/visita
Volcán de lodo	Visitantes	9.826/persona/visita
Uveros	Residentes	87.060/hogar/mes
	Visitantes	6.159/persona/visita
Damaquiel	Residentes	9.492/hogar/mes
Zapata	Residentes	103.500/hogar/mes
Punta Las Vacas	Residentes	81.058/hogar/mes

Tabla 3.6 Valor económico de los beneficios derivados de las obras de estabilización del proceso erosivo en diferentes puntos del golfo de Urabá antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

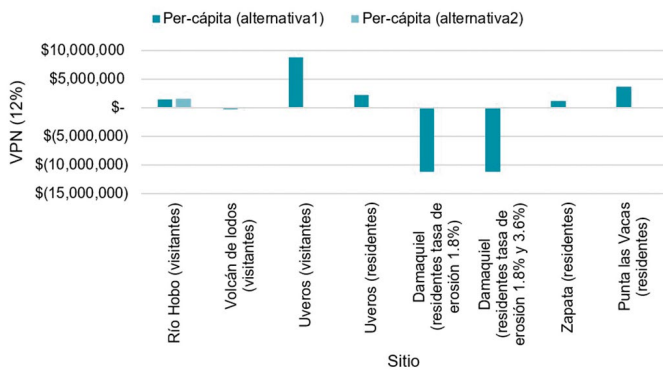


Figura 3.2 Valor Presente Neto per-cápita 1 – VPN (12%) de las obras de estabilización del problema erosivo en el golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

Notas: 1 VPN Per cápita hace referencia al valor presente neto por la población considerada en cada lugar de acuerdo con la Tabla 2.2 la estimación para Zapata se realiza con costos de mantenimiento del paseo peatonal del 30%.

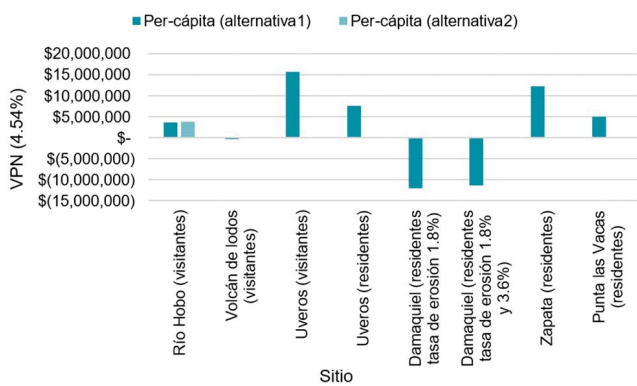


Figura 3.3 Valor Presente Neto per-cápita 1 – VPN (4.54%) de las obras de estabilización del problema erosivo en el golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

Notas: 1 VPN Per-cápita hace referencia al valor presente neto por la población considerada en cada lugar de acuerdo con la Tabla 2.2 la estimación para Zapata se realiza con costos de mantenimiento del paseo peatonal del 30%.

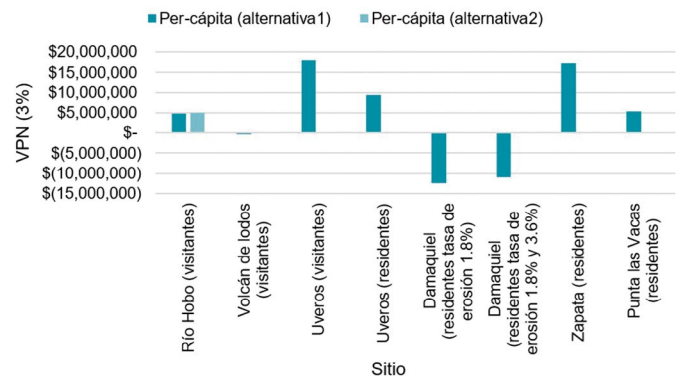


Figura 3.4 Valor Presente Neto per-cápita 1 – VPN (3%) de las obras de estabilización del problema erosivo en el golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia - Componente Valoración Económica).

Notas: 1 VPN Per-cápita hace referencia al valor presente neto por la población considerada en cada lugar según la Tabla 2.2 la estimación para Zapata se realiza con costos de mantenimiento del paseo peatonal del 30%.

Estos resultados muestran entonces que la obra de estabilización costera en casi todo el golfo de Urabá antioqueño, con excepción de las localidades de Damaquiel y volcán de lodo, es viable desde el punto de vista económico. La figura 3.2, figura 3.3 y figura 3.4 muestran que el VPN es positivo para diferentes tasas de descuento y, aun cuando se toman en consideración los beneficios más bajos de la obra de estabilización que corresponde a los beneficiarios, las obras propuestas muestran rentabilidad.

En particular, se muestra que esta rentabilidad es positiva para diferentes tasas de descuento. Por ejemplo, si el proyecto se considerara con una tasa de descuento del 4.54%, la rentabilidad más baja estaría dada por cerca de los \$5 millones de pesos (exceptuando los casos de volcán de lodo y Damaquiel), justificando así su desarrollo.

3.4 Conclusiones

Los resultados muestran que existe un cambio en el bienestar producto de las obras de estabilización del proceso erosivo en el golfo del Urabá antioqueño. Este cambio en el bienestar puede representar hasta el 41% del ingreso monetario diario de un visitante o el 70% del ingreso monetario diario en el caso de un hogar, significando un cambio en el bienestar importante.

Sin embargo, el bienestar neto no es positivo para el caso de volcán de lodo y para Damaquiel, cuando se contrasta con los costos de las obras, indicando que económicamente, bajo el marco de valoración económica utilizado, no es viable realizar las obras de estabilización en estos puntos, sugiriendo que deberían considerarse otras opciones de manejo del problema erosivo.

3.5 Referencias

Alvest, F., P. Roebeling, P. Pinto y P. Batista (2009). Valuing ecosystem service losses from coastal erosion using a benefits transfer approach: a case study for the Central Portuguese coast. *Journal of Coastal Research*. SI 56. Pág. 1169- 11763.

Roebeling, P., C. Coelho y E. Reis (2011). Coastal erosion and coastal defense interventions: a cost-benefit analysis. ProQuest. Pág. 1-8.

Nicholls, R. J. y R. Tol. (2006). Impacts and responses to sea-level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364, 1073-1095.

Capítulo 4º

Componente Geología Y Geotecnia

Autora

Alba Cecilia Bustamante Caro
(MSc en Geomorfología y Suelos)

4.1. Geología regional

El área de estudio pertenece a la región que es cartografiada como la Cuenca Caribe, cuyo eje principal probablemente se encuentra costa afuera, desarrollado en un campo de esfuerzos tangenciales a la orientación de las fallas de rumbo, el mismo que también parece haber rotado del NW al N, produciendo convergencia y divergencia de las fallas de rumbo, y provocando el consiguiente basculamiento de otros bloques que delimitan la cuenca. Particularmente, el límite NW de la cuenca estaría controlado por la zona del choque o convergencia oblicua entre la placa Caribe y el fragmento de esta, parcialmente cratonizado y que hoy constituye el basamento de la Cuenca del Caribe (GEOTEC, 2003). El ambiente tectónico descrito, desarrollado simultáneamente con una subsidencia rápida, explicaría los frecuentes cambios laterales de facies presentes.

Según la Memoria de las planchas geológicas de los Cinturones Sinú - San Jacinto (GEOTEC, 2003), la litología del litoral del Caribe (enmarcada en la Cuenca Caribe), está compuesta por terrenos que han surgido a causa de interacciones complejas entre la placa del Pacífico, Sur América y Caribe. Esta interacción comienza a finales del Mesozoico en el Cretáceo tardío (90 a 72 m.a.) cuando desde el costado este de la placa Caribe, se da la acreción de terrenos que luego serán la cordillera occidental de Colombia; hacia el Norte entre la placa Caribe y Sur América se desarrolla un margen pasivo, permitiendo la acumulación de sedimentos que serán los terrenos Sinú - San Jacinto, allí se forma una cuenca oceánica precursora de la cuenca Caribe (Figura 4.1).

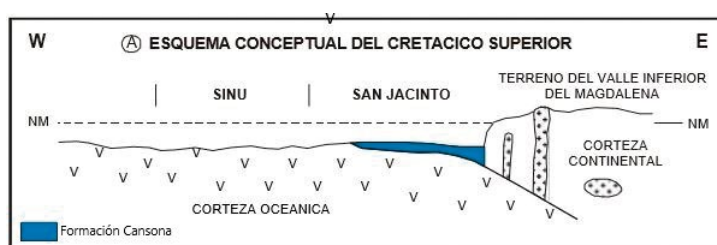


Figura 4.1 Esquema conceptual de la evolución de la cuenca del Caribe durante el cretáceo tardío. (Fuente: GEOTEC, 2003).

La Cuenca Caribe comienza a desarrollarse con depósitos de sedimentos finos sobre rocas de afinidad oceánica, en el Coniaciano (90 m.a) - Maastrichtiano (72 m.a.); hacia el Paleoceno (66 a 59 m.a) se depositan turbiditas conformadas por sedimentitas finas con microfósiles de origen batial y arenitas y conglomerados para formar la que se conoce como la "Formación San Cayetano". En el Eoceno temprano (56 m.a) hay un hiato que sugiere un tectonismo regional seguido de vulcanismo, evidenciado por sedimentos silíceos de aguas profundas y tobas; la cuenca se estabiliza hacia el Eoceno Medio (Luteciano, 47 m.a) cuando entra a un período inactivo, que se evidencia en parte, por la presencia de sedimentos marinos someros compuestos por lutitas, margas y calizas de la Formación Chalán/la Risa.

Hacia el Eoceno medio - superior (42 m.a – 35 m.a), existe una discordancia sobre la cual se encuentran sedimentitas con registro irregular (base de la Formación El Floral/Areniscas de Manantial) y en el Oligoceno (33 m.a), la cuenca vuelve a entrar en un periodo de calma permitiendo depósitos de sedimentos finos de afinidad marina: Formación Maralú y parte superior de Floral (GEOTEC 2003) (Figura 4.2).

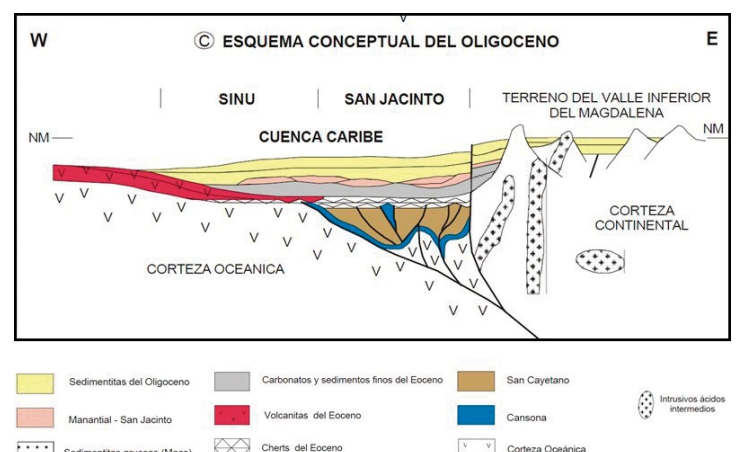


Figura 4.2 Esquema conceptual de la evolución de la Cuenca del Caribe hace 33 m.a. (Fuente: GEOTEC, 2003).

En este orden de ideas, la Cuenca Caribe colombiana es una cuenca de margen de placa, formada desde hace menos de 65 m.a, compuesta por dos cinturones de rocas sedimentarias adyacentes, que además han sido plegados (Cinturones Plegados Sinú - San Jacinto). Particularmente, el Cinturón Plegado San Jacinto está localizado al Norte de Colombia, limita al Oeste con el lineamiento del Sinú y al Este con el lineamiento de Romeral (Duque-Caro, 1979, citado por SGC 2017); por otro lado, el Cinturón Plegado del Sinú, se sitúa al Oeste del cinturón San Jacinto, extendiéndose desde el golfo de Urabá hasta la ciudad de Barranquilla, lo que implica que incluya zonas continentales y submarinas (plataforma y talud continental), con edades que varían desde el Oligoceno hasta el Plioceno (33 m.a - 5 m.a), (Duque- Caro 1979, citado por SGC, 2017) (Figura 4.3).

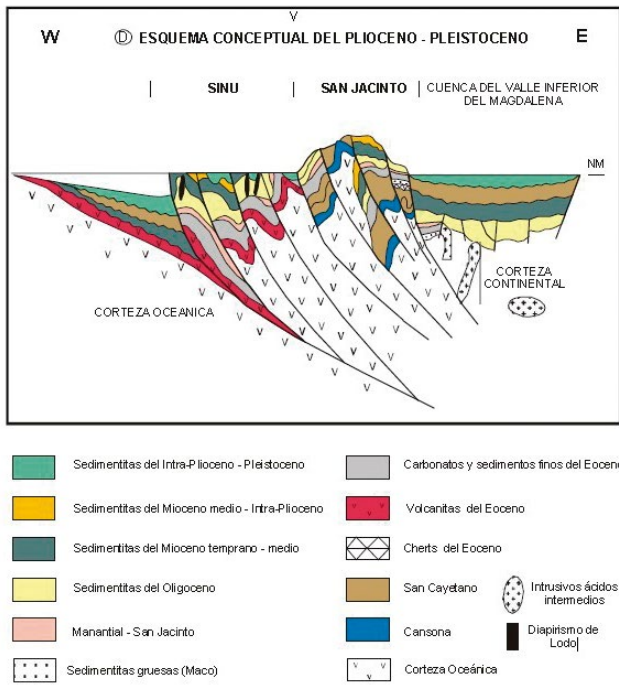


Figura 4.3 Esquema conceptual de la evolución desde el Oligoceno al Plioceno. (Fuente: GEOTEC, 2003).

El área definida se halla a continuación de la terminación septentrional de la cordillera Occidental (Figura 4.4), y al Occidente del Lineamiento del Sinú y San Jacinto, cuyo basamento, en el marco regional, está constituido por rocas cretácicas pertenecientes a un complejo ofiolítico o a depósitos sedimentario volcánicos (máficos) y adosado a la Placa Continental Suramericana a lo largo de la “Sutura” de Romeral.

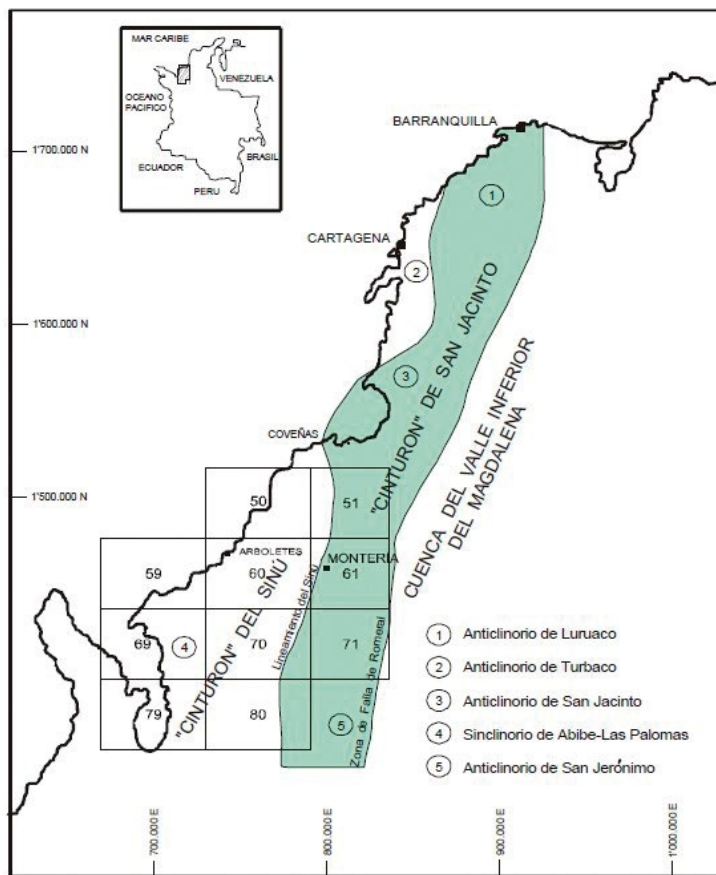


Figura 4.4 “Localización de los cinturones plegados de Sinú, San Jacinto y las provincias geomorfológicas. (Fuente: GEOTEC, 2003).

El basamento cretácico que bordea la Cuenca Caribe se halla principalmente en la cubierta Paleógena que constituye las partes bajas de la cordillera Occidental, al sur de la cuenca y en los complejos ultramáficos de Planeta Rica Montelíbano al oriente de esta. El basamento cretácico del Cinturón de San Jacinto es comparable lito estratigráficamente con la placa Caribe (GEOTEC, 2003).

4.1.1 Estructuras de la geología regional

Dentro de los grandes bloques se desarrollan amplios sinclinales, aparentemente simétricos, delimitados en sus flancos por fallas longitudinales, principalmente cabalgamientos, para la zona de estudio se reconocen las fallas *Canalete, El Ébano, La Mesa, San Juan, El Congo y Turbo* como principales, la figura 4.5 muestra los elementos estructurales mayores de los Cinturones Plegados Sinú – San Jacinto.

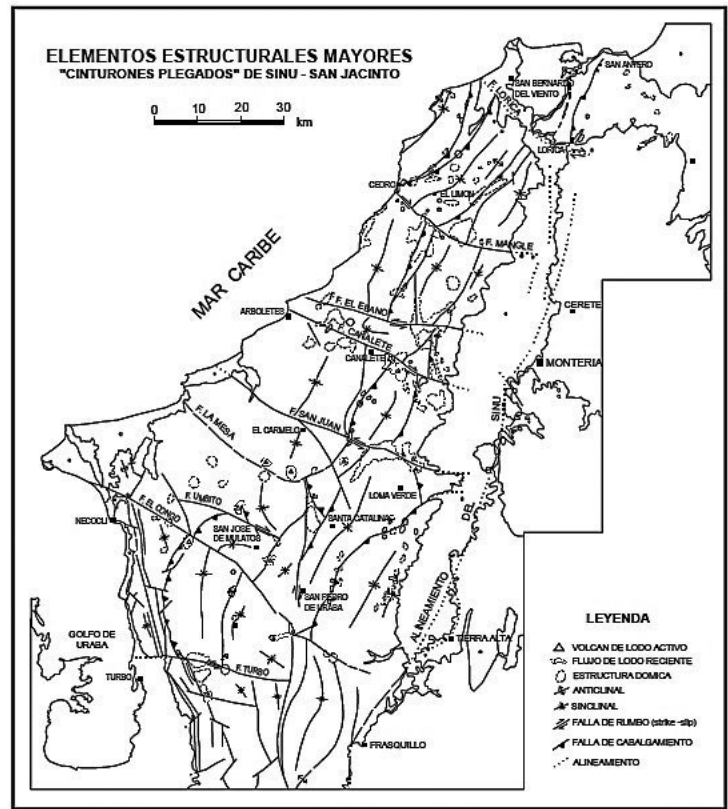


Figura 4.5 Elementos Estructurales Mayores de los cinturones Plegados Sinú-San Jacinto. (Fuente: GEOTEC, 2003).

Adicionalmente, el área se caracteriza por tener numerosos volcanes de lodo y estructuras dómicas, asociados al diapirismo de lodo, fenómeno común desde la bahía de Santa Marta hasta el golfo de Urabá y que se presenta tanto en zona continental como en la plataforma continental cercana (Briceño y Vernet, 1992; Echavarría, 2002; Hoyos, 2008; Carvajal, 2017).

El diapirismo de lodo consiste en masas de lodos saturados con agua y gases a alta presión que se intruyen a través de las rocas sedimentarias de la región, se movilizan lateralmente hacia la superficie a través de fracturas o zonas de debilidad, generando levantamientos y fracturas en el

terreno, así como expulsión de lodo y gases por cráteres de formas y tamaños variables (Echavarría, 2002; Hoyos 2008; Carvajal, 2017). El diapirismo de lodo está asociado a zonas deltaicas, zonas hemipelágicas, márgenes continentales y arcos de islas (Echavarría, 2002; Hoyos, 2008). En el litoral Caribe colombiano, los materiales que forman los diapiros de lodo son sedimentos pelágicos y hemipelágicos, que constituyen la parte basal de una secuencia de sedimentos de piso oceánico, enterrados por episodios rápidos de sedimentación de turbiditas (Echavarría, 2002). Al episodio de enterramiento rápido, sucedió una deformación de los sedimentos basales (visible en los anticlinales) con menor deformación en los estratos superiores de las turbiditas, esta deformación disminuye hacia los sinclinales que son amplios y suaves (Echavarría, 2002).

4.1.2 Estratigrafía local

Según la cartografía geológica a escala 1:100.000 de las planchas 60 Canalete, 59 Mulatos, 69 Necoclí y 79 Turbo, (GEOTEC, 2003; IGAC, 2007; ANH, 2009), los sitios objeto del proyecto están dentro del Cinturón plegado del Sinú y las unidades lito estratigráficas son:

- Depósitos aluviales (Qal): Ocupan principalmente la parte central y sur de la cuenca del cinturón del Sinú, son depósitos de gravas y guijarros con lentes de arenas y limos de ambientes transicionales.
- Depósitos marino costeros (Qmc): Ubicados principalmente en la costa nororiental del golfo, compuestos de arenas, escombros de playa, clastos de rocas sedimentarias, arenas y lodos calcáreos, son extensos y se relacionan con los diferentes niveles de terrazas que van desde Turbo hasta Arboletes. Las terrazas están compuestas por arenas líticas de grano fino a medio (ANH, 2009), con un nivel de bioclastos que se observa desde Arboletes hasta Zapata (observación de campo del proyecto).
- Unidad Arenas monas (Ngam): Consiste en secuencias rítmicas grano decrecientes, con un conglomerado arenoso hacia la base que varía a arenitas conglomeráticas, arenitas y lutitas
- Unidad Morrococoy- El Pantano (Ngmp): Arenitas líticas friables a localmente calcáreas que gradan a limolitas, lodolitas y arcillolitas. En la mayoría de los casos las arenitas calcáreas tienen fósiles bien conservados de gasterópodos, bivalvos, ostrácodos, corales y otros.
- Unidad Paujil Loma Verde (Ngpas): Secuencia con predominancia de lutitas, con capas delgadas de limolitas

calcáreas intercaladas con capas de lutitas.

- Unidad Paujil Cerro Verdinal (Ngpai): Arenitas calcáreas intercaladas o que varían a arenitas friables, interestratificadas con lutitas y limolitas.

En la franja costera son predominantes los depósitos marino costeros en superficie y las unidades del Neógeno afloran en los escarpes de los acantilados, los materiales de estas unidades están muy meteorizados, fracturados y afectados por las fallas regionales, presentando baja competencia litológica a los agentes erosivos del oleaje, a las aguas de escorrentía y a las acciones antrópicas (Ingeominas, 1982; Correa y Vernette, 2004; Posada y Henao, 2007; Paniagua, 2013).

4.2 Geomorfología

Según Correa y Vernette (2004), la morfología del litoral antioqueño en general se puede diferenciar en dos sectores, uno de costa abierta, desde Arboletes a punta Arenas, con bahías amplias resguardadas por puntas de mayor resistencia a la erosión y otro de costa semi protegida, desde punta Arenas a Turbo.

Para el primer sector, predomina la geoforma de costas altas o relieve costero representada por terrazas marinas (Correa y Vernette, 2004; Posada y Henao, 2007) desde Arboletes a la desembocadura del río San Juan y desde Damaquiel hasta la desembocadura del río Mulatos.

Las terrazas son superficies formadas por debajo del nivel del mar y actualmente emergidas por cambios en el nivel del mar y levantamientos tectónicos; con amplitudes de hasta seis km hacia el continente, presentan un cambio abrupto de pendiente para dar paso al relieve colinado de la serranía de Abibe. Con alturas variables desde 1 m en Arboletes a 35 m, en San Juan de Urabá, están conformadas en materiales arcillo-limosos con lentes de arenas y gravas, con baja litificación, alto grado de diaclasamiento y muy meteorizados, forman acantilados blandos con estratos de mayor resistencia hacia la base (Correa y Vernette, 2004; Posada y Henao 2007; Paniagua, 2013). Adicionalmente, las terrazas en algunos sitios presentan deformaciones del terreno debido al diapirismo de lodo (Volcán de lodo, Arboletes).

Desde la desembocadura del río San Juan, a punta Damaquiel y desde la desembocadura del río Mulatos, a punta Caribana predominan las costas bajas, representadas en extensas playas de arena, cordones de playa, dunas, ciénagas, y terrenos inundables (Figura 28). Desde punta Caribana a punta *Las Vacas* se alternan las terrazas marinas de baja altura (2 m en promedio) con playas, cordones de playas, espigas litorales y deltas de ríos (Correa y Vernette, 2004).

La figura 4.6 muestra a nivel regional la geomorfología del litoral antioqueño entre el municipio de Arboletes y el distrito de Turbo, en círculos rojos los sitios de estudio del proyecto.

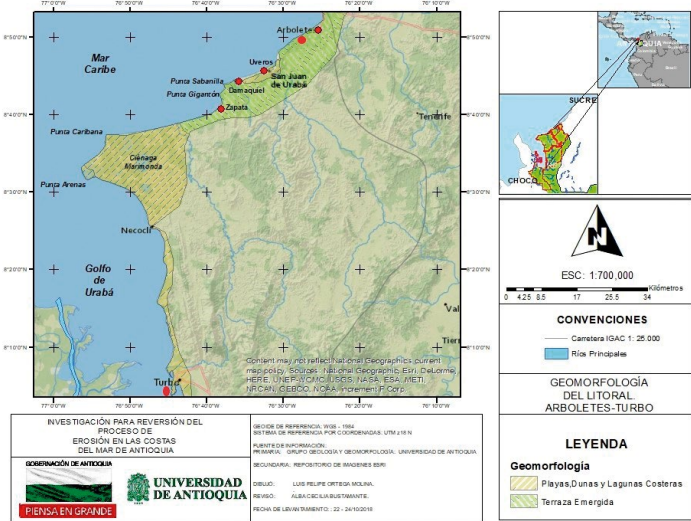


Figura 4.6 Geomorfología del litoral Arboletes-Turbo. (Fuente: Cartografía del Proyecto, 2019; Repositorio de imágenes ESRI, 2019).

Los sitios muestreados están sobre las siguientes morfologías:

- **Volcán de lodo:** Se encuentra sobre la terraza marina que tiene una altura de 5 m, pero por deformación del terreno y acumulación de lodo debido a las erupciones de lodo, se eleva hasta una altura de 22 m sobre el nivel del mar.
- **Sector de río Hobo:** La terraza marina aumenta de altura desde Puerto Rey hasta la margen derecha del río Hobo, donde alcanza una altura promedio de 10 m, en la desembocadura del río Hobo hay un desnivel y la margen izquierda tiene un sector de costa baja con playas y ecosistema de manglar. La terraza vuelve a aparecer 500 m hacia el suroeste de la desembocadura del río Hobo y aumenta de altura hasta la desembocadura del río San Juan.
- **Sector de Uveros:** Se ubica sobre una extensa playa que comienza en la margen izquierda de la desembocadura del río San Juan y se extiende por 11 km hasta la margen derecha de la desembocadura del río Damaquié. La playa está atravesada por varios drenajes que desembocan en el mar en época húmeda. En época seca, por disminución del caudal y por aumento del oleaje, se forman barras de arena en las desembocaduras de los drenajes.
- **Damaquié:** Ubicado sobre la terraza que vuelve a aparecer a partir de la margen izquierda del río Damaquié con una altura promedio de 8 m. En la parte central de Damaquié disminuye de altura hasta la desembocadura del río Sabanilla.
- **Zapata:** Se ubica sobre la terraza marina con altura promedio de 8 m y continúa con esta altura hasta el río Iguaña al suroeste de Zapata.

- **Punta Las Vacas:** Es una espiga litoral formada en el lado suroriental del golfo de Urabá, es una geoforma muy dinámica pues en la cartografía de 1796 y 1802 aún no se había formado y para 1876 ya se había formado (García y Sierra, 2007). Entre las décadas de 1940 y 1950 se cambia la desembocadura del río Turbo a la parte norte de la espiga y comienza la formación de la espiga de punta Yarumal y la erosión del extremo Sur de Punta Las Vacas (Aristizábal, 1990; Posada, 2002).

4.3 Procesos Geomorfológicos: Retroceso de línea de costa

Para el litoral antioqueño y cordobés, varios autores reportan retrocesos importantes de línea de costa: Aristizábal et al (1990), González (1992), Franco y Gómez (1996), Posada (2002), Correa y Vernet (2004), Rangel y Posada (2005), Posada y Henao (2007), Rangel (2009), Paniagua (2013), entre otros.

En el marco del proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”, se calcularon las tasas de retroceso comparando imágenes y utilizando el método de tasa de punto final (EPR) en dos años diferentes obteniendo los valores de la tabla 4.1.

SITIO	Longitud de costa (m)	Retroceso de línea de costa (m)	Área perdida o ganada (ha)	Tasa de retroceso o acreción m/año	Años de las imágenes	Tasa de retroceso usando el DSAS
Volcán de lodo	350	8,7	-0,275	-1,9	2014-2018	-3,5
Río Hobo	300	22	-0,638	-5,5	2014-2018	-1,5
Uveros	330	15	+0,57	+1,3	2007-2018	-1,4
Damaquié NE	362	11	+0,69	+1,1	2007-2018	
Damaquié SW	240	20	-0,454	-1,8	2007-2018	-1,5
Zapata	350	50	-1,16	-4,5	2014-2018	-2,9
Punta Las Vacas	1130	16	1,88	4	2014-2018	-1,3 Aeropuerto +6,7 extremo sur

Tabla 4.1 Valores de retroceso de línea de costa para cada sitio de estudio del proyecto. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

Sin embargo, comparando imágenes de varios años y usando el programa DSAS (*Digital Shoreline Analysis System, Version 5.0*), se obtuvieron los valores mostrados en la figura 4.7, en rojo están los valores usando el DSAS y en negro los valores obtenidos por Correa y Vernet (2004).

Las diferencias en valores se deben a la forma de cálculo de los dos métodos, en la comparación con dos imágenes de años diferentes el valor es un promedio entre las imágenes de los dos años seleccionados; con el DSAS se toman varias imágenes y se tienen en cuenta las ganancias y pérdidas entre los diferentes años. Se recomienda hacer un monitoreo de mayor frecuencia y en un período de varios años para poder calcular con más precisión los retrocesos o ganancias de la línea de costa.

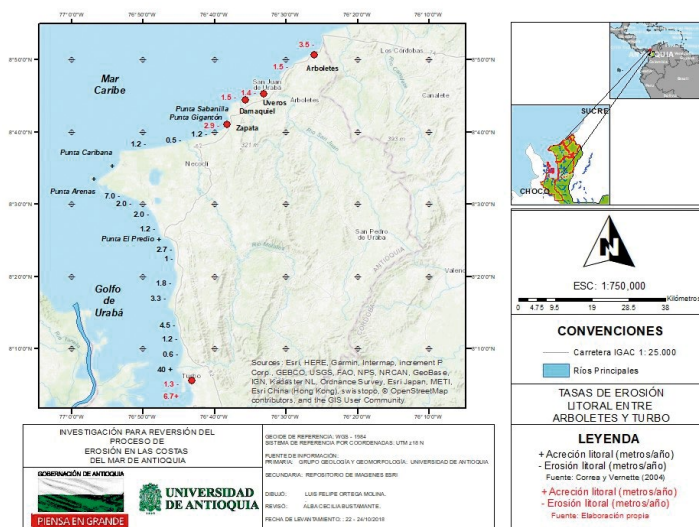


Figura 4.7 Tasas de acreción y erosión para el litoral entre Arboletes y Turbo. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2018; repositorio de imágenes ESRI, 2019; Correa y Vernette, 2004).

Las figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 muestran la evolución morfológica de las líneas de costa comparando imágenes de tres años diferentes para cinco sitios, para el sector de río Hobo; se compararon imágenes de 1938 y 2107.

4.4 Suelos y sedimentos

Se colectaron muestras de suelos y de sedimentos en el escarpe de los acantilados, en la playa subaérea, en la playa submareal y a una profundidad de seis m para análisis de granulometría, contenido de humedad, gravedad específica, límites líquido y plástico, índice de plasticidad, ensayo de resistencia al corte Método Consolidado -Drenado (CD) - con muestras inalteradas. Igualmente se aplicó difracción de rayos x para determinar el tipo de arcilla.

En general las muestras de suelos del escarpe de la terraza se clasificaron como suelos arcillosos de alta plasticidad y de baja plasticidad, con altos contenidos de humedad y de gravedad específica promedio de 2,65. La difracción de rayos x confirma la presencia de arcillas expansivas tipo 2:1 (Montmorillonitas), estas tienen un coeficiente de expansión lineal alto, es decir que en épocas húmedas y secas se expanden y se contraen, determinando condiciones especiales de uso para estos suelos.

La granulometría de las arenas colectadas en la playa subaérea y submareal son arenas medias a finas y muy finas. En la mineralogía predominan los granos de cuarzo y fragmentos líticos.

Los sedimentos colectados a una profundidad de seis m en el lecho marino, resultaron ser lodos, sedimentos muy finos, sin consolidar.

4.5 Riesgo y vulnerabilidad a la erosión costera

Según la “Guía de Integración de la Gestión del Riesgo y el Ordenamiento Territorial Municipal” (2015), de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (NGRD) y la presidencia de la República Colombiana basada en la Ley 1523 de 2012, art 4, se presentan las siguientes definiciones:

- Elementos expuestos: “Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza”.

- Amenaza: “Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.”

- Vulnerabilidad: “Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.”

- Riesgo de desastre: “Corresponde a los daños o a las pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y de la vulnerabilidad.”

Según las definiciones anteriores, la erosión costera es una amenaza para las líneas de costa, entendiéndose a estas como un recurso ambiental del que derivan su sustento las comunidades humanas y ecológicas allí asentadas, además de ser un problema crítico puesto que, las poblaciones y la infraestructura costera continúan creciendo y se ven amenazadas por la erosión.

Por esta situación actualmente existe una mayor demanda de información precisa con respecto a las tendencias y a las tasas de movimientos costeros actuales y pasados. Infortunadamente en Colombia, se han hecho muy pocos esfuerzos, para analizar esta situación y atender estas problemáticas, y los estudios que existen sobre el tema son escasos e insuficientes, adicionalmente la infraestructura y las viviendas, en muchos centros poblados y rurales ya se han visto seriamente afectadas debido al desconocimiento

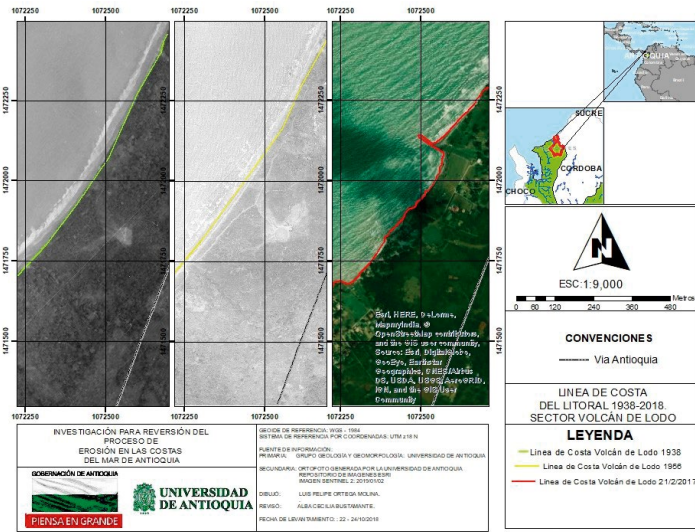


Figura 4.8 Línea de costa, sector volcán de lodo. (Fuente: Repositorio de imágenes ESRI, 2019; IGAC, 2019).

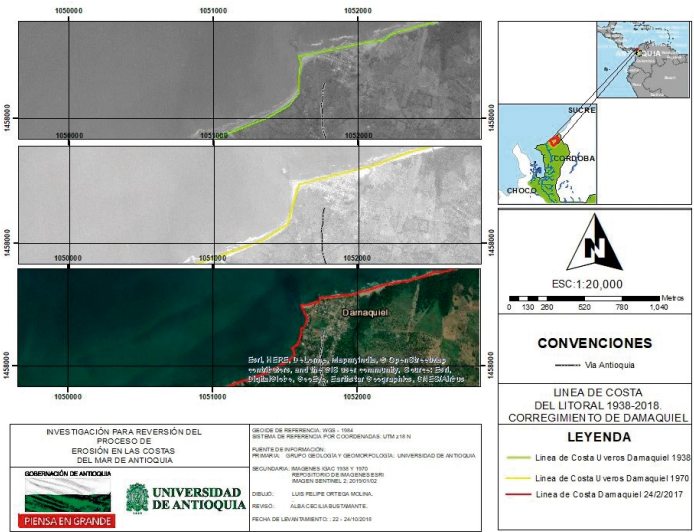


Figura 4.11 Línea de costa, sector Damaqueil. (Fuente: Repositorio de imágenes ESRI, 2019; IGAC, 2019).

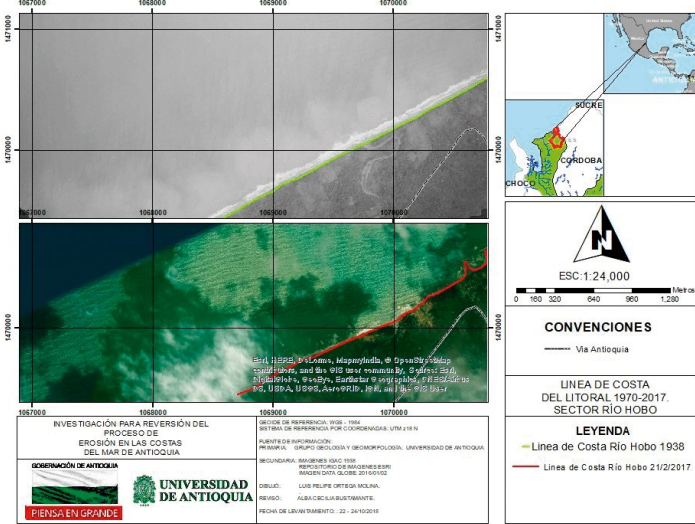


Figura 4.9 Línea de costa, sector río Hobo. (Fuente: Repositorio de imágenes ESRI, 2019; IGAC, 2019).

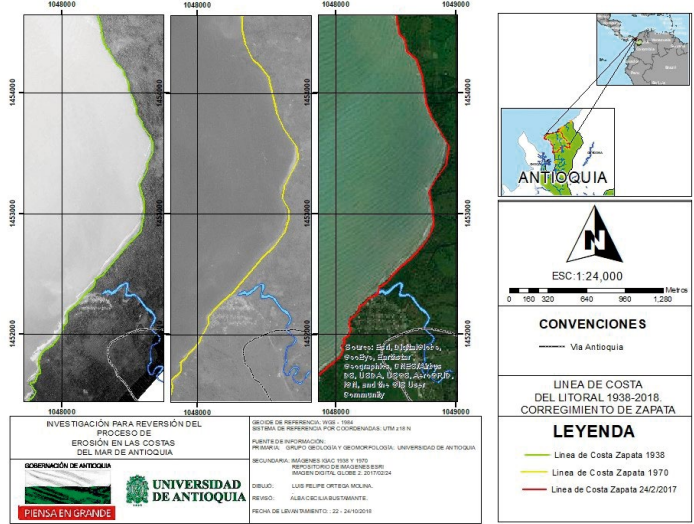


Figura 4.12 Línea de costa, sector Zapata. (Fuente: Repositorio de imágenes ESRI, 2019; IGAC, 2019).

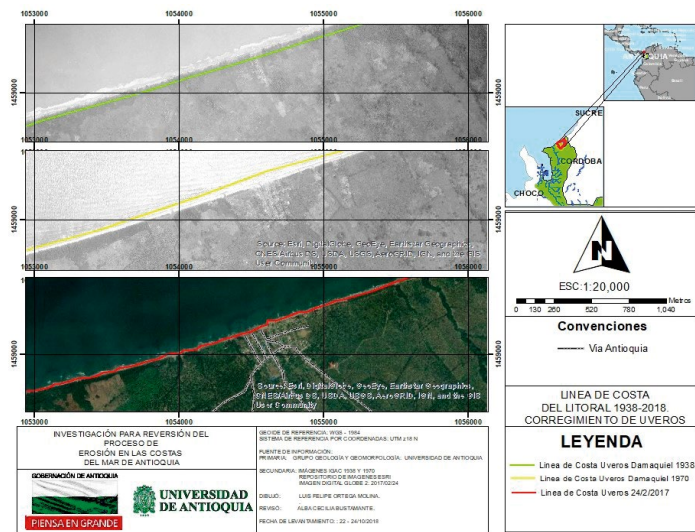


Figura 4.10 Línea de costa, sector Uveros. (Fuente: Repositorio de imágenes ESRI, 2019; IGAC, 2019).

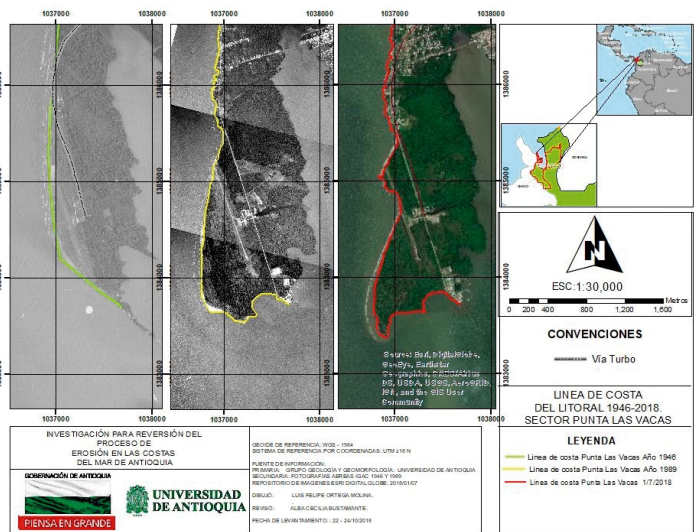


Figura 4.13 Línea de costa, sector punta Las Vacas. (Fuente: Repositorio de imágenes ESRI, 2019; IGAC, 2019).

que existe acerca de los factores que condicionan estos procesos erosivos. Es necesario un análisis exhaustivo del movimiento de la línea de costa que sea consistente de una región costera a otra.

Aprovechando los recursos disponibles en línea como los que proporciona la aplicación del Sistema de Análisis Digital de la Línea de Costa (DSAS: Digital Shoreline Analysis System), creado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y teniendo en cuenta la información disponible, tanto de imágenes aéreas del IGAC, imágenes satelitales y de drones se analizaron los cambios históricos en las costas a lo largo de las orillas y partes de las costas del departamento de Antioquia específicamente en los corregimientos de Uveros, Damaquiel, Zapata, los sectores de punta Las Vacas en Turbo y volcán de lodo de Arboletes.

Las líneas de costa históricas evaluadas, cubren períodos de tiempo que van desde el año 1938 hasta el 2019. Las tasas de cambio presentadas representan condiciones de costa disponibles. Inicialmente se aplicó la evaluación de la tasa de acreción erosión, utilizando el método de tasa de punto final (EPR), usando solo dos datos en el tiempo, el retroceso o acreción de la línea de costa, se calcula dividiendo la distancia del movimiento de la línea de costa, por el tiempo transcurrido entre la línea de costa más antigua y la más reciente.

Las principales ventajas del EPR son la facilidad de cálculo y el requisito mínimo de solo dos fechas en la línea de costa. La desventaja es que en los casos en los cuales hay más datos disponibles, la información adicional se ignora. Se pueden pasar por alto los cambios en el signo (en otras palabras, la acumulación de erosión), la magnitud o las tendencias cíclicas (Dolan y otros, 1991; Crowell y otros, 1997). Sin embargo, al obtener más información durante el desarrollo del Proyecto, se crearon nuevos modelos utilizando el método Tasa de regresión línea que puede determinar una estadística de tasa de cambio de regresión lineal, ajustando una línea de regresión de mínimos cuadrados de todos los puntos de la línea de costa para un transecto.

La línea de regresión se ubica de manera que la suma de los residuos al cuadrado (determinada al cuadrar la distancia de desplazamiento de cada punto de datos, desde la línea de regresión y la suma de los residuos al cuadrado) se minimice.

La tasa de regresión lineal es la pendiente de la línea. El método de regresión lineal incluye estas características:

1. Se utilizan todos los datos, independientemente de los cambios en la tendencia o la precisión.
2. El método es puramente computacional.
3. El cálculo se basa en conceptos estadísticos aceptados.
4. El método es fácil de emplear (Dolan y otros, 1991; Crowell y otros, 1997).

Sin embargo, el método de regresión lineal es susceptible a efectos atípicos y tiende a subestimar la tasa de

cambio, en relación con otras estadísticas, como el EPR (Dolan y otros, 1991; Genz y otros, 2007). Con esta se generan transectos sobre las líneas de costa, de los cuales pueden establecerse las tasas de cambio en la línea costa a largo plazo en cada transecto, utilizando el método de regresión lineal proporcionado por DSAS versión 5.0. Para este estudio, se usó DSAS para originar transectos ortogonales a un espaciado de 50 m a lo largo de la costa y para calcular posteriormente las estadísticas de cambio (tasa de regresión lineal y tasa de punto final).

La información derivada de los datos del IGAC y las imágenes satelitales de líneas de costa se tuvo en cuenta hasta con un espaciamiento costero de 2000 m. En este caso se utilizó esta metodología, debido a que la regresión lineal es la técnica estadística más comúnmente aplicada para expresar el movimiento de la línea de costa y estimar las tasas de cambio (Crowell y Leatherman, 1999) donde hay un número de muestras estadísticamente válido.

Sin embargo, debe aclararse que la regresión lineal no reconoce el potencial de las diferencias temporales en la tendencia (reversiones de tendencia) y las aceleraciones o desaceleraciones (Morton, 1991, 1996; Fenster y otros, 1993; Fenster y Dolan, 1994).

Luego de aplicada la metodología se generaron los mapas temáticos de riesgo por sitio que muestran las tasas de acreción erosión y el comportamiento de las líneas de costa (Figuras 4.14 a 4.19).

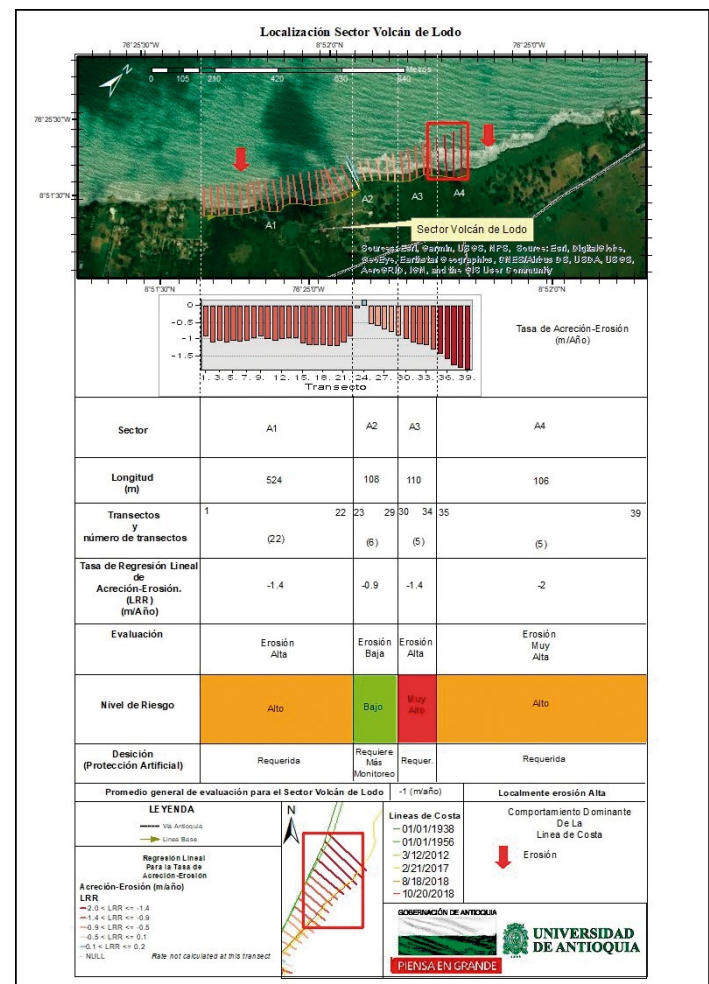


Figura 4.14 Mapa de riesgo por erosión para volcán de lodo. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

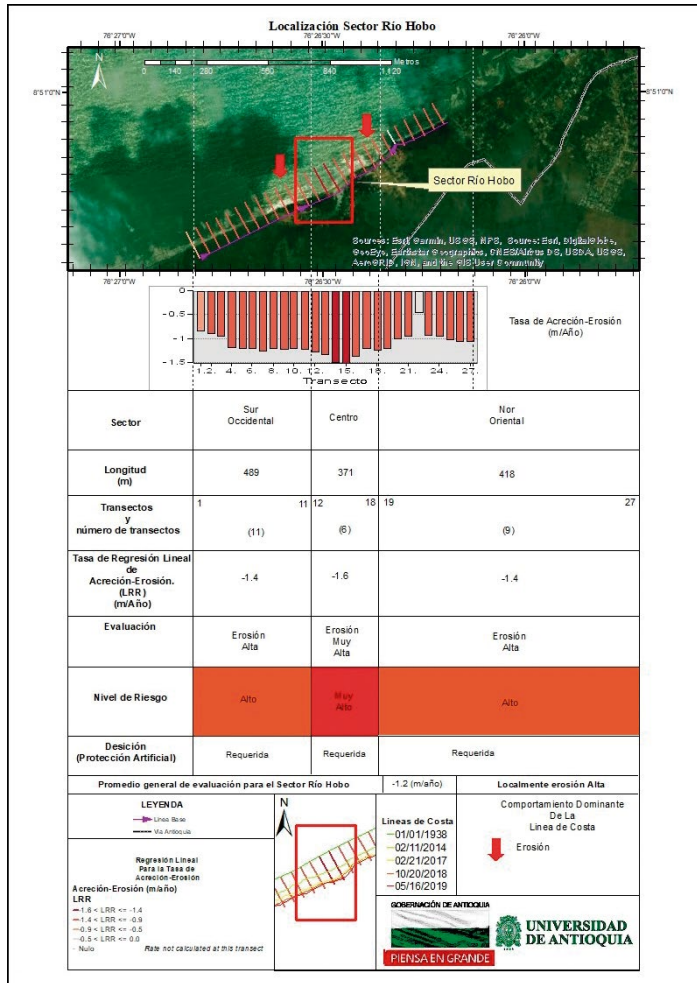


Figura 4.15 Mapa de riesgo por erosión para el sector del río Hobo. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

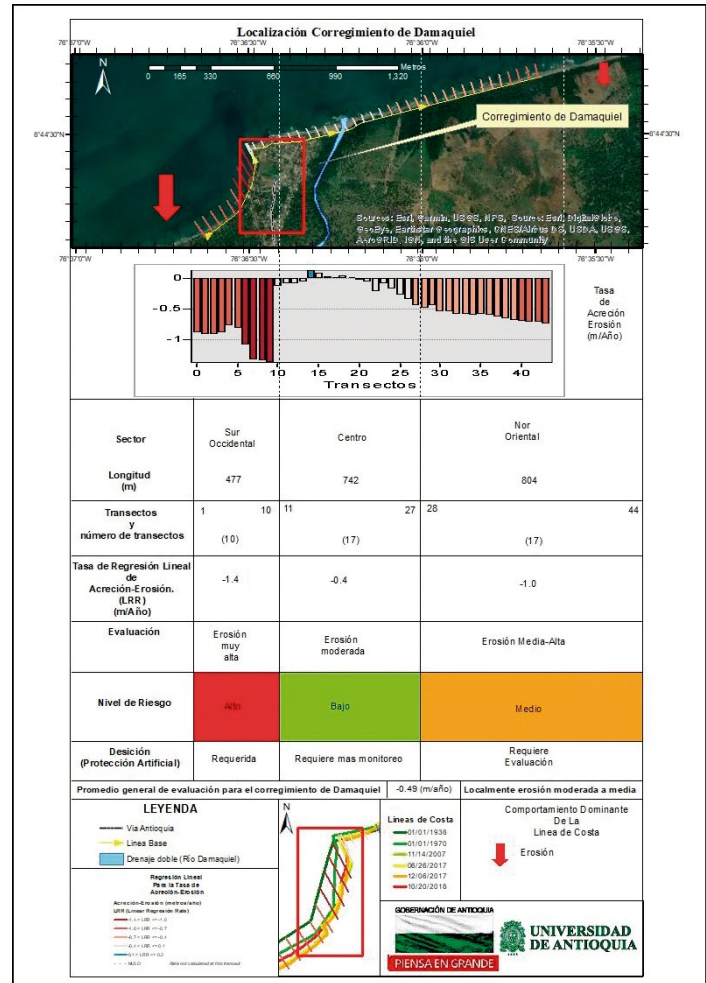


Figura 4.17 Mapa de riesgo por erosión para el sector Damaquiel. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

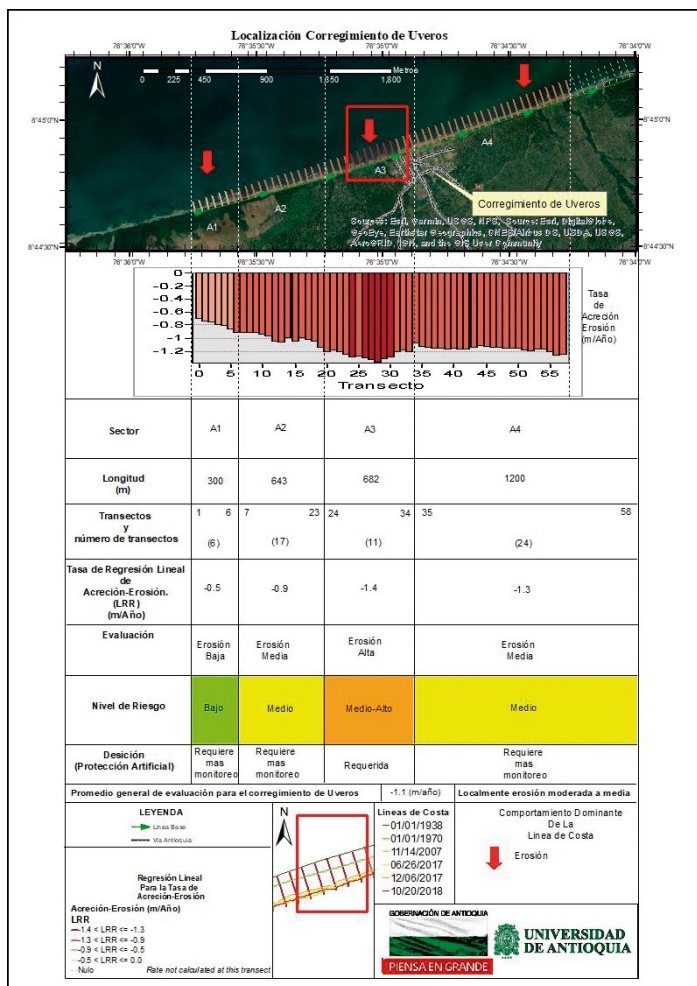


Figura 4.16 Mapa de riesgo por erosión para el sector Uveros. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

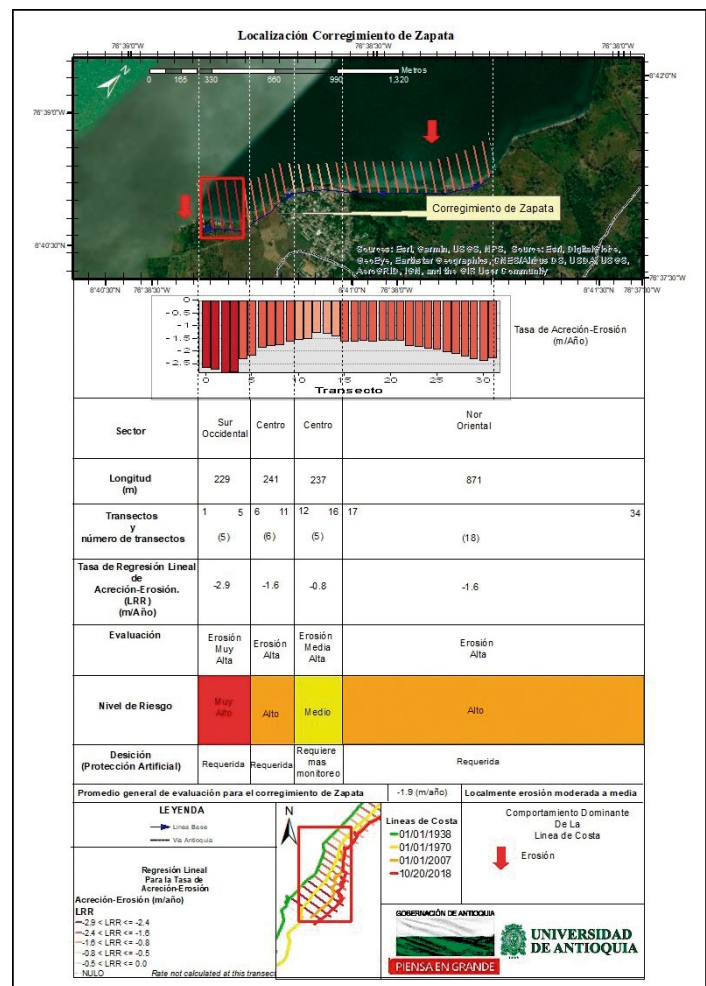


Figura 4.18 Mapa de riesgo por erosión para el sector Zapata. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

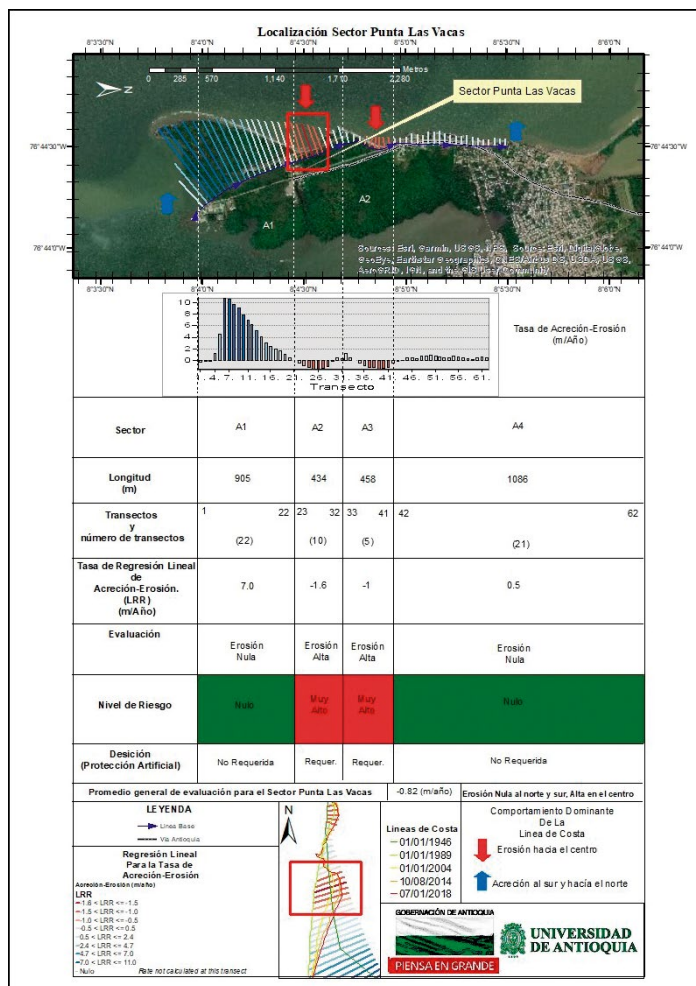


Figura 4.19 Mapa de riesgo por erosión para el sector *punta Las Vacas*. (Fuente: Cartografía del proyecto, 2019).

4.6 Referencias

Agencia Nacional de hidrocarburos ANH (2009). Interpretación del programa sísmico 2d Sinú sur. 2009. Colombia.

Aristizabal R., O. C., Betancur V., M. J., & Vásquez L., C. I. (1990). Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necoclí, Golfo de Urabá (Antioquia Colombia). Trabajo de Grado. Medellín.

Briceño L.; Vernet G. (1992). Manifestaciones del Diapirismo Arcilloso en el Margen Colombiano del Caribe. Geofísica Colombiana 1:21-30. octubre de 1992.

Carvajal J. H. (2017). Parte 1. Características del Volcanismo de Lodo en Volcanismo de lodo en el Caribe Colombiano. Servicio geológico colombiano. Colección Publicaciones Especiales. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia. 94 pp-

Correa, I. D., & Vernet G. (2004). Introducción al Problema de la Erosión Litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 33, 5-26.

Crowell, M. Douglas b. C. and Leatherman S.P. (1997). On Forecasting Future U.S. Shoreline Positions: A Test of Algorithms. Journal of Coastal Research Vol. 13, No. 4

(Autumn, 1997), pp. 1245-1255.

Dolan, R., M. S. Fenster, and S. J. Holme (1991). Temporal analysis of shoreline recession and accretion. Journal of Coastal Research: 723-44.

Echavarría Ochoa, J.C. (2002). Geometría de la Cámara de Lodo del Volcán de Arboletes. Trabajo de grado para optar al título de Ing. Civil. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2002.

Franco, E., Gómez J. (1996). Evolución de la línea de costa del litoral antioqueño. Aspectos geomorfológicos. Sector Río Necoclí – Turbo. CORPOURABÁ. Apartadó, Colombia. 118 p.

Genz, A. S., Fletcher C. H., Dunn R. A., Frazer L. N., and Rooney J. J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and along shore beach variation on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research 231:87-105. doi:10.2112/05-0521.1.

Hoyos Patiño F. (2008). Diapirismo y vulcanismo de Lodo. Un recorrido por el Caribe Colombiano. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2008.

IGAC (2007). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, subdirección de Agrología. Bogotá. Imprenta Nacional de Colombia. 992 p.

IGAC. (2019). Índice de líneas de vuelos. Aerofotografías blanco y negro. Plancha 76, vuelo III. Escala 1:33.000 Año 1938. Línea S-177. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

García, C., y Sierra P. (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.

GEOTEC (2003). Geología de los Cinturones Sinú-San Jacinto. Memoria Explicativa de las planchas 50, 51,59,60, 61, 69, 70, 71,79,80. Escala 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá Colombia.

González J. L. (1992). Geomorfología y problemas erosivos del Litoral Caribe Colombiano, sector: Delta de Tinajones-Punta Caribaná. En INGEOMINAS Regional del caribe.

Paniagua, J.F. (2013). Migración histórica actualizada y predicción de la línea de costa en sectores acantilados críticos del litoral Antioqueño considerando escenarios de ascenso del nivel del mar. Tesis de Maestría. Universidad Eafit. Medellín.

Posada, L. (2002). Erosión costera en el litoral Caribe colombiano, Departamentos de Antioquia y Córdoba. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín. 16 p.

Posada, P. B. y Henao, P. W. (2007). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del caribe colombiano. IN-

VEMAR, serie de Publicaciones Especiales N° 13 Santa Marta. Págs. 65, 74.

Rangel, N., Posada, B. O. (2005). Geomorfología y Procesos Erosivos en la Costa Norte del Departamento de Córdoba, Caribe colombiano (Sector Paso Nuevo – Cristo Rey). Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras. 34 pp. 101-119.

Rangel, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe Colombiana. Revista Gestión y Ambiente. Volumen 12 – No 2, mayo a agosto de 2009, Medellín. pp 43-56.

Sentinel (2019). Repositorio de Imágenes ESRI. Imagen Sentinel 2: 2019/01/02.

SGC. Servicio Geológico Colombiano (2017). Volcanismo de Lodo del Caribe Central Colombiano. Bogotá Colombia. 2017.

Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres (2015). Guía de Integración de la Gestión del Riesgo y el Ordenamiento Territorial Municipal. Departamento administrativo de la presidencia de la República. Bogotá. Disponible en: www.gestiondelriesgo.gov.co



Capítulo 5°



**EROSIÓN
COSTERA**

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 5°

Componente

Topografía Batimetría

Autor

Alfredo Jaramillo Vélez (MSc en Oceanografía)

5.1 Introducción

La zona costera se forma de manera natural por factores climáticos, oceanográficos y geológicos, presentando procesos de morfodinámica en el modelamiento de las playas en procesos de erosión y de acreción del litoral. Esta dinámica es modificada por fenómenos naturales y/o actividades antrópicas que ocasionan el aumento de las tasas de erosión costera, impidiendo así la recuperación natural de las playas. Entre los fenómenos naturales se encuentran, tsunamis, huracanes, los fenómenos de *El Niño* y *La Niña* y la actividad tectónica; por su parte, las causas antrópicas incluyen la subsidencia del suelo por extracción de líquidos (pozos de bombeo), el calentamiento global, represamiento o desvío de ríos, obras civiles sin un diseño adecuado, extracción de materiales de construcción, tala de vegetación, entre otros (Gutiérrez et al., 2017).

Los efectos de la erosión costera se han estudiado y monitoreado en las últimas décadas a lo largo de las costas colombianas. Los cambios producidos en las playas, especialmente aquellos que afectan a la población o que ocasionan pérdidas ambientales y económicas han promovido la atención en estas zonas y la elaboración de investigaciones sobre sus variaciones temporales y espaciales con el fin de generar planes, programas y políticas para la prevención, mitigación, control y recuperación de la erosión costera en Colombia.

En las últimas cuatro décadas se han presentado retrocesos de la línea de costa del orden de los 50-100 m en varios sectores (Uveros, Damaquiel, Zapata, Turbo), y de hasta 1,6 km en el área punta Rey Arboletes, en la cual las pérdidas de terrenos suman más de 4,5 km² y la erosión alcanzó tasas máximas de hasta 40 m/año (Correa & Vernet 2004). En el 2016 Correa y Paniagua, en su trabajo titulado “The Arboletes - punta Rey Littoral, Southern Caribbean Coast”, realizaron un análisis de los retrocesos de la línea de costa desde 1938 hasta 2009, donde los resultados predicen que la tendencia a la erosión activa continuará y causaría posiblemente un retroceso, hasta de 155 m para el año 2059.

Tanto en la plataforma, como en la parte emergida es común encontrar estructuras diapíricas, evidenciadas principalmente por domos y volcanes de lodo, muy bien desarrollados en Arboletes, San Juan de Urabá, Damaquiel y

Necoclí. Puede afirmarse que en corto plazo las altas tasas de erosión de las terrazas y acantilados en estas zonas, se presentan debido a las características geotectónicas muy pobres de sus rocas y sedimentos componentes. Principalmente en las zonas aledañas a las intrusiones diapíricas (Arboletes – Damaquiel) y en las zonas de fracturas y fallas, los acantilados están conformados por un nivel basal de arcillolitas y lodolitas inclinadas hacia el mar, y fuertemente fracturadas y meteorizadas. Estas rocas presentan baja resistencia a la acción del oleaje, haciendo posible que exista erosión y posterior deslizamiento por gravedad de la roca que se encuentra en la parte superior. Además, el nivel basal generalmente se encuentra por encima y sin continuidad entre las capas de sedimentos por un nivel (1 a 3 m de espesor) de suelos o de lodos no consolidados, que se erosionan fácilmente por las aguas lluvias, de escorrentía y de filtraciones (Correa & Vernet 2004).

Para efectuar un adecuado monitoreo y posteriormente implementar alternativas de solución en las zonas costeras que presentan procesos erosivos, se requiere primero entender el comportamiento del sistema marino – costero, mediante un estudio detallado que incluya distintas componentes, dentro de las que se encuentra la topo batimetría que se encarga de la medición de las profundidades marinas en conjunto con la medición del terreno costero. Este capítulo describe los resultados encontrados en la Componente Topografía Batimetría para seis puntos críticos ubicados en el Urabá antioqueño (volcán de lodo y desembocadura del río Hobo en el municipio de Arboletes, corregimiento de Zapata en el municipio de Necoclí, corregimientos de Uveros y Damaquiel localizados en el municipio de San Juan de Urabá y sector punta *Las Vacas* en el distrito de Turbo). El objetivo principal de esta componente es representar gráficamente y de la mejor manera posible, el terreno de estudio tanto en la parte emergida como en la sumergida. Para cumplir con esta meta, se ha adquirido información de campo mediante la topografía y la batimetría, que luego fue procesada con técnicas computacionales (Sistemas de Información Geográfica) para diseñar los modelos de terreno.

5.2 Metodología

El levantamiento topográfico de las zonas de estudio volcán de lodo, Río Hobo, *Zapata* y punta *Las Vacas* se efectuó mediante una estación total y para las otras zonas (Damaquiel y Uveros) se utilizó un GPS diferencial. Debido a que el método para obtener información topográfica sólo puede utilizarse en la parte emergida de las zonas de estudio, cuando se pretende obtener información de la parte sumergida, es necesario recurrir a un método diferente denominado batimetría, para lo cual se utilizó una ecosonda mono haz y un receptor DGPS (Differential Global Positioning System) con el fin de determinar las coordenadas X, Y, y Z del fondo marino.

El levantamiento topo batimétrico se cumplió durante

el mes de agosto de 2018 para las zonas de punta *Las Vacas* y *Volcán de lodo*; en octubre de 2018 se realizó el levantamiento en río *Hobo* y *Zapata*; y en febrero de 2019 en los sitios *Damaquiel* y *Uveros*.

5.2.1 Topografía

El área que cubre el levantamiento topográfico para cada zona, se definió estratégicamente con el fin de abarcar gran parte del litoral que ha presentado erosión. A continuación, se especifican los lugares:

- **Punta *Las Vacas*:** Desde el comienzo en la parte norte hasta el sur de la misma, enfocándose principalmente en la cabecera del aeropuerto de Turbo.
- ***Zapata*:** Desde 500 m al noreste de la desembocadura del río *Zapata* hasta 2500 m al suroeste del mismo (Se resalta el hecho de que el levantamiento topográfico solo se efectuó hasta 800 m al suroeste de la desembocadura antes mencionada, esto se debe a que los esfuerzos del levantamiento topográfico se concentraron en el centro poblado).
- ***Damaquiel*:** Desde la desembocadura del río *Damaquiel* al noreste del centro poblado, hasta la desembocadura de un cauce localizado aproximadamente a 350 metros al suroeste del cementerio del centro poblado.
- ***Uveros*:** Desde 600 m al noreste de la virgen que se encuentra a la derecha de la desembocadura del río *Uveros* hasta 600 m al suroeste del mismo. La batimetría cubrió además un área correspondiente a 600 m más hacia el noreste y 200 m más hacia el suroeste, logrando llegar a 1200 m aproximadamente mar adentro.
- **Río *Hobo*:** Desde los límites del manglar al suroeste del río *Hobo*, hasta el primer espolón al noreste del río.
- **Volcán de lodo:** Desde 480 m al noreste del espolón norte del volcán de lodo, hasta 920 m al suroeste del espolón sur del volcán.

5.2.2 Batimetría

La batimetría se efectuó siguiendo los estándares exigidos por la IHO (*International Hydrographic Organization*) en su publicación S-44 (Normas para la realización de levantamientos hidrográficos), donde se establecen los estándares mínimos de precisión para la realización de estos estudios. El levantamiento se efectuó mediante el uso de un equipo sondeador hidrográfico de alta frecuencia (200 Hz) y un GPS de doble frecuencia, ambos conectados a un computador portátil el cual tiene instalado el programa Hidrográfico (*Hypack Max* versión 2018) que conecta los equipos para almacenar la información obtenida en campo, mediante el seguimiento de líneas planeadas con separación entre ellas de 25, 50 y 75 m en los sectores de mayor interés para cada zona y una separación de 50, 100 y 200 m en el resto del área. Posteriormente se pasa a la etapa de ga-

binete donde se aplicaron todas las correcciones inherentes a este tipo de actividades (calado, velocidad del sonido y marea), para finalmente efectuar una selección de sondajes que representan la configuración del fondo marino del área levantada en formato XYZ.

El levantamiento batimétrico se efectuó con el elipsoide WGS-84 y sistema de coordenadas UTM norte zona 18, empleando un GPS de doble frecuencia TRIMBLE DSM 232 para *Zapata*, *Damaquiel*, *Uveros* y río *Hobo*; y un GPS de doble frecuencia Hemisphere R220 para volcán de lodo y punta *Las Vacas*.

Para el control de las profundidades en *Zapata*, *Damaquiel*, *Uveros* y río *Hobo* se utilizó una ecosonda hidrográfica Odom Hydrotack y para Volcán de lodo y punta *Las Vacas* se empleó una ecosonda *Syquest Bathy 500MF*, ambas son digitales y análogas de alta frecuencia con un transductor de 200 kHz y un ancho de haz de tres grados para la primera y seis grados para la segunda con unidad de medida métrica.

5.2.3 Software

Para el control de la navegación del sistema de recolección de datos batimétricos y posterior procesamiento se utilizó *Hypack Max* versión 2018, es el paquete hidrográfico más utilizado a nivel mundial. Además, para la elaboración de planos a las escalas requeridas se recurrió a ArcGIS versión 10.5.1, 2017, que es el paquete de dibujo más amigable, contiene los formatos más utilizados en dibujo y que son compatibles con otros softwares.

5.2.4 Correcciones aplicadas

La marea utilizada para la reducción de sondajes fue la pronosticada por el IDEAM (Tabla 5.1). El calado medido, la forma cómo fue determinado y el momento cuándo se aplicó dicho calado para cada zona se muestra en la Tabla 5.1; este calado fue adicionado a los sondajes registrados por la ecosonda.

Lugar	Coordenadas	Pseudónimo	Fecha inicial	Fecha final
Capurganá	8°38'31" N	CAP	2010/03/27/21	2010/03/25/15
	77°20'11" W			
Necoclí	8°22'6.86"N	NEC	2010/02/22/6	2010/02/28/12
	76°48'12.78"W			
Turbo	8°22'19.08" N	TUR	2009/03/27/14	2009/03/31/5
	76°48'13.89"W			
DIMAR	8°50'59" N	DIMAR	2010/10/01/0	2010/12/31/18
	76°56'55" W			

Tabla 5.1 Descripción de las correcciones aplicadas para cada zona de estudio. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

La velocidad del sonido fue determinada mediante equipo SVP *Digibar S de Odom*, con el cual se obtuvieron los datos de este parámetro en la columna de agua del área

de trabajo y se aplicó durante el levantamiento para el direccionamiento de los haces de la ecosonda y así corregir los datos obtenidos, la velocidad del sonido se determinó en promedio para cada zona.

5.2.5 Procesamiento

Una vez se obtiene la nube de puntos del levantamiento topo batimétrico, se procede a seleccionar un conjunto de nodos de control del total de datos (Tabla 5.2) para realizar las interpolaciones y procesamiento de la información.

ID Malla	Latitud min-más.	Longitud min-más.	Resolución [°]	Resolución [Km]
Caribe	7° - 24°	270° - 303°	1/6	18,5
Colombia	7.5° - 11°	281° - 285°	1/12	9,25
Urabá	7.5° - 10°	282° - 284°	1/60	1,85

Tabla 5.2 Nodos de control seleccionados para cada zona. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

Luego se evaluaron varios modelos de interpolación espacial respecto a los nodos de control previamente removidos del set de datos. La evaluación de los modelos consiste en la comparación de la información obtenida en campo y la información predicha por los diferentes modelos de interpolación espacial a partir de tres (3) parámetros: Error Medio (EM), Error Medio Cuadrático (EMC) y Desviación Estándar (σ).

- **Error Medio:** está definido como el promedio de las diferencias entre los valores predichos por un modelo y los valores observados en campo (ver Ecuación 1).

Ecuación 1

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (z_i^{modelo} - z_i^{observado})$$

En donde:

EM : Error Medio

n : Cantidad de datos evaluados

z_i^{modelo} : Altura predicha por el modelo

$z_i^{observado}$: Altura observada en campo

- **Error Medio Cuadrático:** es un estimador que trata de tasar el valor esperado de la pérdida del error al cuadrado entre valores predichos por un modelo y valores observados en campo (ver Ecuación 2).

Ecuación 2

$$EMC = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (z_i^{modelo} - z_i^{observado})^2}$$

En donde:

EMC : Error Medio Cuadrático

n : Cantidad de datos evaluados

z_i^{modelo} : Altura predicha por el modelo

$z_i^{observado}$: Altura observada en campo

- **Desviación Estándar:** Es una medida de dispersión que pretende estimar el esparcimiento de los datos respecto a un valor central, generalmente la media aritmética (Ver Ecuación 3).

Ecuación 3

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} ((z_i^{modelo} - z_i^{observado}) - EM)^2}$$

En donde:

σ : Desviación Estándar

n : Cantidad de datos evaluados

z_i^{modelo} : Altura predicha por el modelo

$z_i^{observado}$: Altura observada en campo

EM : Error Medio

5.3 Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la Componente Topografía Batimetría para las seis zonas de estudio.

5.3.1 Punta Las Vacas

Al correr los diferentes modelos de interpolación y evaluar los parámetros anteriormente mencionados (Tabla 5.3), se tiene que el modelo que mejor describe la topo batimetría del sector punta Las Vacas en el distrito de Turbo (Antioquia) es un modelo tipo Red de Triángulos Irregulares o TIN con un tamaño de celda de 8 m (Figura 5.1). Las TIN son una forma de datos geográficos digitales ba-

MODELO	EM	EMC	DESV.STD
Red de Triángulos Irregulares T.C. 8 m	-0,005	0,095	0,094
Vecinos Naturales T.C. 8 m	-0,007	0,097	0,096
Red de Triángulos Irregulares T.C. 13 m	0,007	0,139	0,138
Vecinos Naturales T.C. 13 m	0,008	0,146	0,145
Kriging T.C. 8 m	-0,002	0,174	0,174
Distancia Inversa Ponderada T.C. 8 m	0,027	0,209	0,208
Kriging T.C. 13 m	0,005	0,219	0,219
Distancia Inversa Ponderada T.C. 13 m	0,019	0,228	0,227
Polinomio Local T.C. 8 m	0,044	0,330	0,327
Polinomio Local T.C. 13 m	0,047	0,357	0,354

T.C. Tamaño de celda

Tabla 5.3 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector punta Las Vacas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

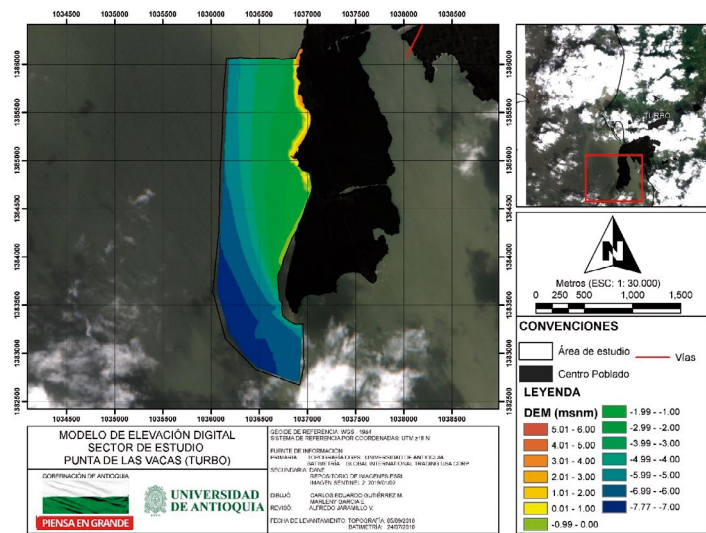


Figura 5.1 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en punta Las Vacas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

sados en vectores que se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos); los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos. Las aristas de los TIN forman facetas triangulares contiguas y no superpuestas que pueden utilizarse para capturar la posición de entidades lineales que juegan un papel importante en una superficie, como cadenas montañosas o arroyos.

También se diseñó un mapa de pendientes que puede observarse en la figura 5.2, encontrando que la mayor parte del terreno presenta pendientes inferiores al 3% excepto en la zona norte del levantamiento, entre el restaurante “Pedro P” (localizado en la parte norte de punta *Las Vacas*) y la segunda bahía hacia el sur, donde las pendientes llegan hasta un 7%, lo cual se explica a partir de la alta cantidad de escombros y del material depositado por algunos habitantes a modo de protección costera. Adicionalmente, se reporta, aunque no se observa en la figura, que al sur de la flecha ocurre un cambio abrupto en la pendiente.

Esto no fue posible medirlo puesto que las condiciones de seguridad para trasladar la estación total eran mínimas y además no había visibilidad por el exceso de vegetación en la orilla de la costa.

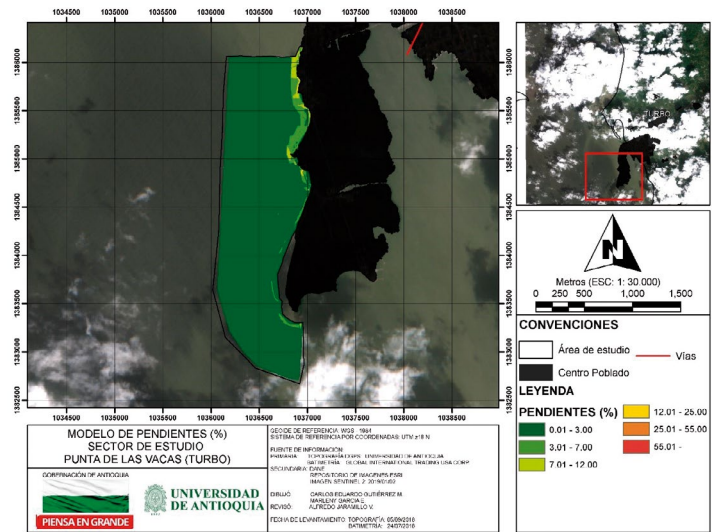


Figura 5.2 Mapa de pendientes del sitio de estudio punta Las Vacas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

A lo largo de la línea de costa de este lugar, se encontró alta cantidad de estructuras de protección como muros, espolones sumergidos, enrocados, etc. De igual forma en la parte norte, donde se encuentran establecimientos comerciales se evidencian múltiples escombros sumergidos debido a las construcciones que anteriormente estuvieron en la línea de costa y han colapsado como consecuencia de la acción del oleaje y de la erosión (Figura 5.3).



Figura 5.3 Principales características topográficas de punta Las Vacas. A) Espolón ubicado al frente del estadero “Pedro P”; B) Escombros; C) Enrocado dentro de capitania de puerto; D) y E) Escombros localizados en las zonas aledañas a los locales comerciales. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

El área levantada en la topobatimetría presenta valores que van desde 4,44 m de elevación hasta 7,64 m de profundidad y cubre una extensión de 259 Ha. La línea de costa estudiada posee una longitud de 3255 m.

El sector presenta una morfología muy homogénea y las pendientes son de aproximadamente 1:150 mínimo, exceptuando la zona sur en la punta *Las Vacas*, donde el talud se vuelve significativamente más pronunciado, alcanzando

profundidades de siete m a tan sólo 250 m de distancia respecto a la costa.

5.3 Zapata

El modelo que describe de la mejor manera la topo batimetría del sector Zapata, Necoclí (Antioquia) es un modelo tipo Vecinos Naturales (Tabla 5.4 y Figura 5.4). Este modelo de interpolación emplea el subconjunto de nodos de entrada más cercanos al punto de análisis para aplicar la ponderación basado en áreas de influencia proporcionales (polígonos de Thiessen); además, se considera un método local ya que solo utiliza el subconjunto de valores o nodos que rodean el punto analizado. Este modelo no tiene la capacidad de producir crestas o valles que no estén representados por la muestra de entrada, formando superficies suaves.

MODELO	EM	ECM	DESV.STD
Vecinos Naturales	0,017	0,348	0,347
Mínima Curvatura	-0,054	0,387	0,383
Vecinos Cercanos	-0,064	0,473	0,469
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cúbica	-0,012	0,498	0,498
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cuadrática	0,022	0,548	0,548
Red de Triángulos Irregulares	-0,002	0,799	0,799
Kriging	-0,094	0,811	0,806

Tabla 5.4 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector Zapata. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

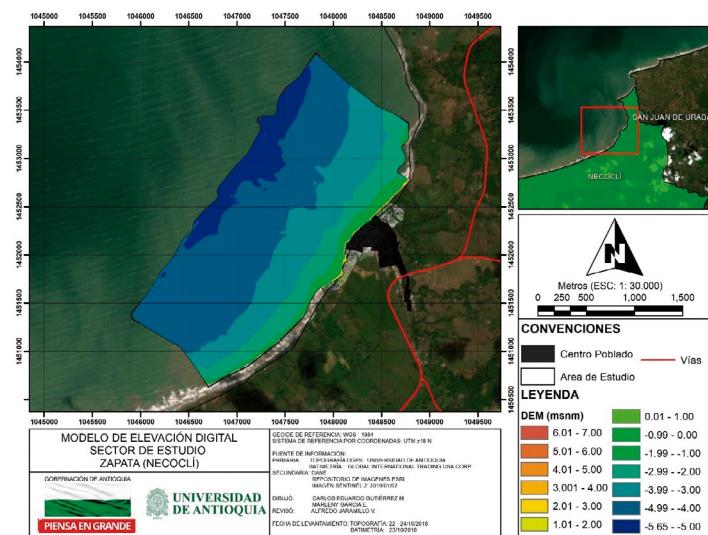


Figura 5.4 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en Zapata. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

En el mapa de pendientes (Figura 5.5) se evidencia que toda la zona sumergida presenta pendientes inferiores al 3% y las mayores pendientes (>55%) corresponden a los acantilados y enrocados situados sobre la costa.

Asimismo, se observa otra línea frente a la playa con pendiente de hasta 12%, posiblemente por escombros correspondientes a predios construidos anteriormente o a intentos de protección costera que no han resultado eficientes.

Geomorfológicamente hacia el suroeste del centro poblado se aprecian unas bahías causadas por la erosión

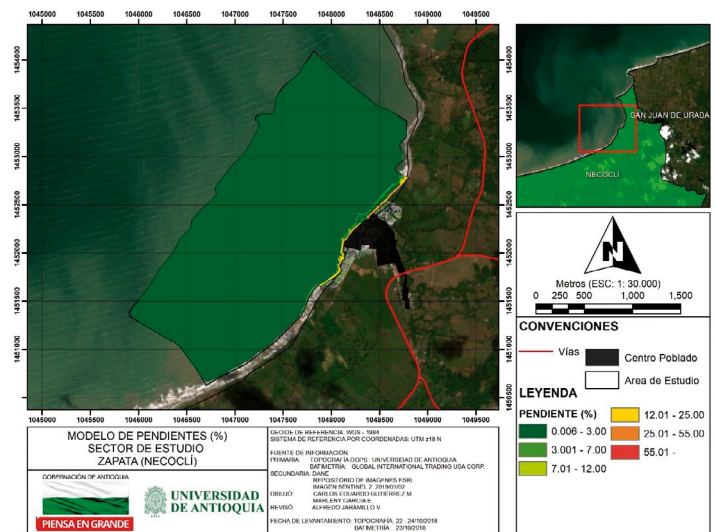


Figura 5.5 Mapa de pendientes del sitio de estudio Zapata. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

costera sobre los acantilados, así como arcos, y columnas típicas de la erosión activa sobre acantilados, con alturas del orden de 2 a 3 m (Figura 5.6).

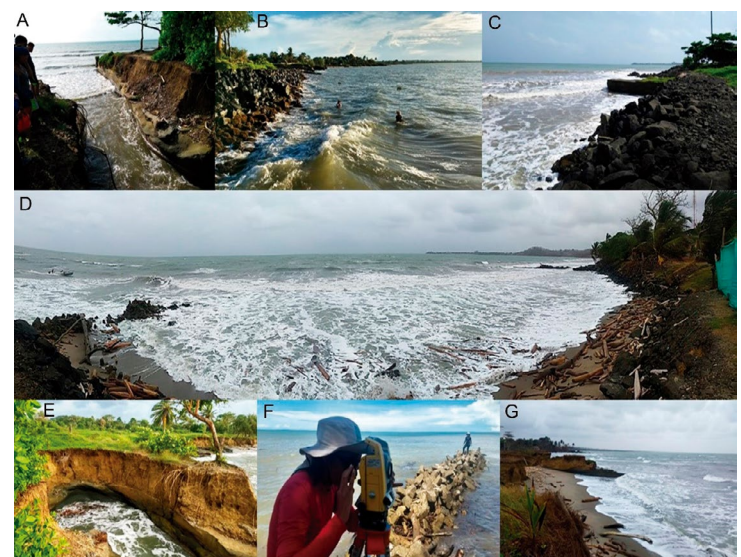


Figura 5.6 Principales características topográficas de Zapata. A) Río Zapata; B) y E) Acantilados; C) Enrocado; D) Bahía producto de la erosión; F) Espolón localizado en la playa del casco urbano; G) Playa principal. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

En el centro del poblado esas mismas morfologías fueron estabilizadas mediante una celda experimental o enrocado construido por CORPOURABÁ y la Universidad EAFIT entre 2015 y 2016.

La topobatimetría levantada presenta valores que van desde 5,9 m de elevación hasta 5,6 m de profundidad; el área es de aproximadamente 468 Ha y la longitud sobre la línea de costa estudiada es de aproximadamente 2 km.

Dado que el sector de Zapata ya presenta unas obras de protección, que corresponden a enrocados, y que estos han estabilizado el retroceso de la línea de costa en el sector urbano del corregimiento, se recomienda conservarlos y realizar el respectivo mantenimiento y monitoreo topo batimétrico y aero fotogramétrico.

De igual forma en el sector nororiental, después del río, se evidencia una playa estable, sin embargo, debido a los acantilados presentes, recomiendan realizar seguimientos a su retroceso pues gran parte del material sedimentario que los conforma es de origen diapírico, lo cual los hace más susceptibles a la erosión, tanto costera como subaérea.

Por otro lado, en el sector suroeste del corregimiento, las bahías y taludes de erosión son la zona crítica de erosión, no solo por el material sedimentario que las conforma sino también por estar en la zona aguas abajo del patrón anual de corrientes superficiales y al suroeste de las obras de protección costera del corregimiento; no obstante, el potencial turístico puede estar dado hacia el río Zapata y la playa contigua. Por esta razón se recomienda mantener el enrocado ubicado en el casco urbano, el cual se encuentra en buenas condiciones y mantiene la estabilidad de la playa principal del corregimiento. Además, se debería controlar el retroceso de la línea de costa en la zona aledaña al río para permitir al corregimiento fomentar su vocación turística.

5.3.3 Damaquiel

El modelo que mejor describe la topobatemetría del corregimiento de Damaquiel en el municipio de San Juan de Urabá (Antioquia) (Tabla 5.5) es un modelo tipo Red de Triángulos Irregulares o TIN (Figura 5.7).

MODELO	EM	EMC	DESV.STD
Red de Triángulos Irregulares	0,0002	0,0633	0,0633
Vecinos Naturales	0,0001	0,0676	0,0676
Kriging con corrección Lineal	-0,0006	0,0677	0,0677
Mínima Curvatura	-0,0006	0,0762	0,0762
Vecinos Cercanos	-0,0011	0,0837	0,0837
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cúbica	-0,0017	0,1056	0,1056
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cuadrática	-0,0011	0,1229	0,1229
Kriging con corrección por Nuggets	0,0124	0,2087	0,2084

Tabla 5.5 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector Damaquiel. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

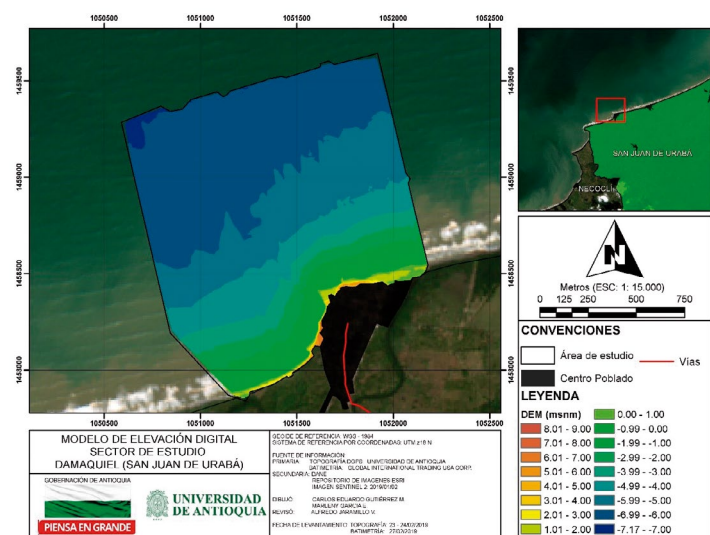


Figura 5.7 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topobatemétrico en Damaquiel. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

En la figura 5.8 se observan pendientes menores al 3% para la mayoría del área sumergida, logrando una variación de profundidad de aproximadamente 1 m vertical (V) por

cada 180 m horizontales (H); igualmente se observan varios sectores con pendientes hasta 7% y 12% cerca de la playa que corresponden a escombros o relictos de las obras de protección existentes desde varios años atrás. Por otro lado, pendientes mayores del 12% fueron encontradas en la parte alta de la playa, correspondiendo a los escarpes de playa y a taludes al suroeste, mientras que en el centro y noroeste del casco urbano corresponden a enrocado y taludes de erosión previos a la construcción de los espolones existentes actualmente. El sector de enrocado (frente al cementerio) presenta las máximas pendientes del levantamiento superando levemente el umbral del 55% ($\geq 50^\circ$).

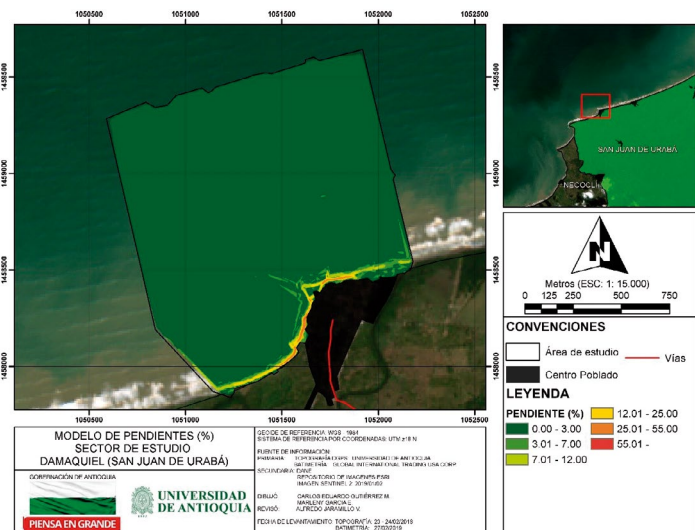


Figura 5.8 Mapa de pendientes del sitio de estudio Damaquiel. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

La topobatemetría incluye valores que van desde 7,15 m de elevación hasta 6,98 m de profundidad, además cubre un área de 183 Ha y una longitud sobre la línea de costa de aproximadamente 1530 m.

En el sector nororiental del corregimiento de Damaquiel se evidencia una playa estable debido a la presencia de dos espolones que están en el casco urbano (Figura 5.9), esta playa en la época seca (diciembre a marzo) tiende a



Figura 5.9 Principales características topográficas de Damaquiel. A) Playa de parqueo de embarcaciones B) Playa principal; C) y D) Espolones del centro poblado. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

presentar tendencias erosivas mientras que en época húmeda (abril a noviembre) tiende a la recuperación debido a la energía y dirección del oleaje incidente. Por otro lado, la franja suroccidental, después del último espolón está conformada por acantilados, los cuales son producto del efecto producido aguas abajo por los espolones existentes.

Debido a que los espolones existentes han estabilizado el retroceso de la línea de costa en el sector central del corregimiento, se recomienda conservarlos sin aumentar su tamaño o extensión, con un adecuado mantenimiento y monitoreo.

5.3.4 Uveros

Para el sector *Uveros*, San Juan de Urabá (Antioquia) el modelo que mejor describe la topo batimetría es Kriging con corrección lineal (Tabla 5.6 y Figura 5.10). Este modelo de interpolación geoestadístico asume que la distancia y dirección de los datos o nodos esparcidos de forma aleatoria sobre una superficie, presentan una correlación espacial, la cual puede determinar cómo se comporta la superficie analizada.

El mapa de pendientes (Figura 5.11) muestra que las pendientes no superan el 12% siendo las pendientes entre

MODELO	EM	EMC	DESV.STD
Kriging con Corrección Lineal	0,00021	0,05234	0,05234
Kriging con Corrección por Nugguet	-0,00004	0,05246	0,05246
Vecinos Naturales	0,00043	0,05297	0,05296
Red de Triángulos Irregulares	0,00059	0,05518	0,05518
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cúbica	0,00471	0,06566	0,06549
Vecinos Cercanos	0,00060	0,07537	0,07537
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cuadrática	0,00789	0,07592	0,07551

Tabla 5.6 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector Uveros. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

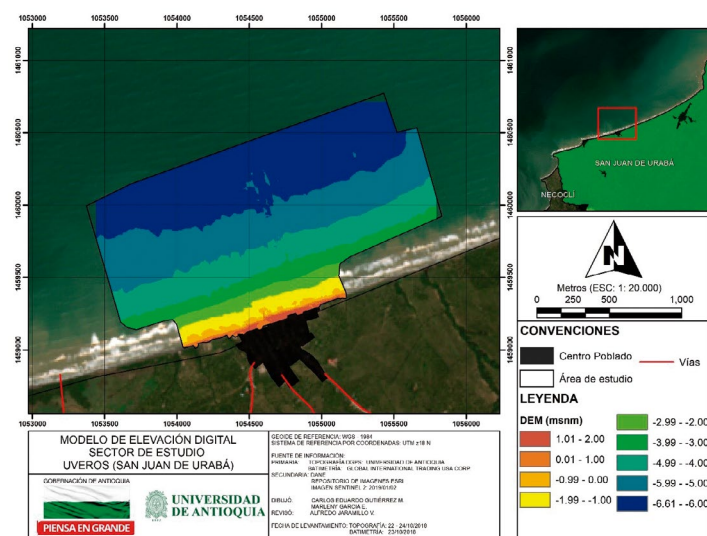


Figura 5.10 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en Uveros. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

3% y 12% las correspondientes a pequeños escarpes de playa de menos de 1m de altura. La zona de máxima pendiente, mayor a 12% corresponde al espolón central de la

playa. La totalidad del área sumergida presenta pendientes muy someras inferiores al 3%. Este sin duda es el lugar menos crítico en cuanto a la erosión, sin embargo, sus antecedentes y su vulnerabilidad ante inundaciones y retroceso de costa ameritan estudiar el problema y plantear soluciones.

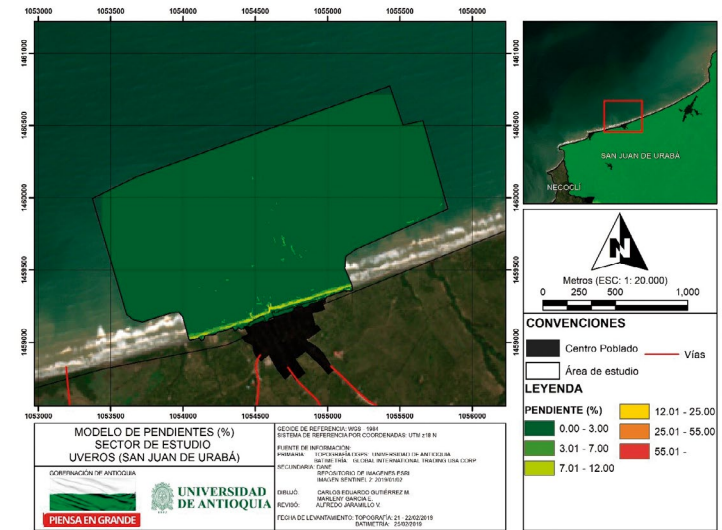


Figura 5.11 Mapa de pendientes del sitio de estudio Uveros. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

La profundidad mínima alcanzada en la batimetría fue de 2,20 m y la máxima de 6,51 m, mientras que en la topografía se alcanzaron alturas de 1,60 m y profundidades en la playa hasta de 1,53 m. El área total levantada cubre una extensión de 252 Ha y la línea de costa estudiada tiene una longitud aproximada de 1275 m.

Es importante resaltar que debido a las fuertes condiciones de oleaje y por seguridad del equipo técnico, no fue posible tomar datos de campo en la franja de conexión entre la zona de topografía y la de batimetría (entre 1,5 m y 2,2 m de profundidad), generando un área sin datos de aproximadamente 150 m de ancho. Dado que el sector de Uveros ya presenta algunas obras de protección, que corresponden a espolones, y estos han estabilizado el retroceso de la línea de costa en el sector urbano del corregimiento, se recomienda conservarlos y hacerles el respectivo mantenimiento y monitoreo. De igual forma al ser una playa más o menos estable (Figura 5.12), se recomienda el seguimiento debido que en verano se reportan tendencias erosivas.

5.3.5 Río Hobo

En el sector río Hobo en el municipio de Arboletes (Antioquia) el modelo que mejor describe la topobatimetría (Tabla 5.7) es un modelo tipo Vecinos Naturales con un tamaño de celda de 3 m (Figura 5.13).

En el mapa de pendientes (Figura 5.14) se encuentra que, en la mayor parte del área de estudio, principalmente área sumergida, se tienen pendientes muy bajas (inferiores

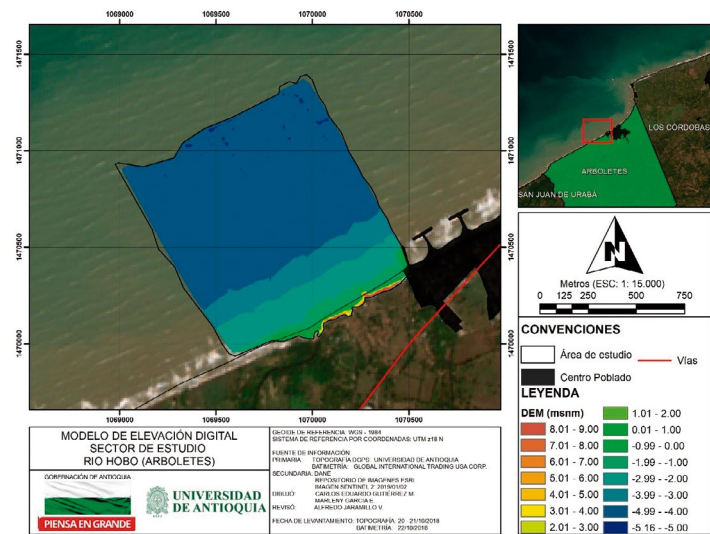


Figura 5.12 Principales características topográficas de Uveros. A) Caño Uveros; B), C), D) y E) Playa principal; F) Espolón localizado en el casco urbano. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

MODELO	EM	ECM	DESV.STD
Vecinos Naturales T.C. 3 m	-0,032	0,313	0,311
Red de Triángulos Irregulares T.C. 3 m	-0,033	0,320	0,319
Vecinos Naturales T.C. 5 m	-0,033	0,330	0,328
Red de Triángulos Irregulares T.C. 5 m	-0,032	0,336	0,335
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cúbica T.C. 3 m	-0,025	0,394	0,393
Distancia Inversa Ponderada de potencia Cúbica T.C. 5 m	-0,031	0,421	0,420
Polinomio Local T.C. 3 m	0,222	1,097	1,075
Polinomio Local T.C. 5 m	0,210	1,130	1,111
Kriging T.C. 3 m	-0,076	1,274	1,272
Kriging T.C. 5 m	-0,075	1,278	1,275

T.C.: Tamaño de celda.

Tabla 5.7 Comparación de Modelos de Interpolación Espacial para el sector río Hobo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

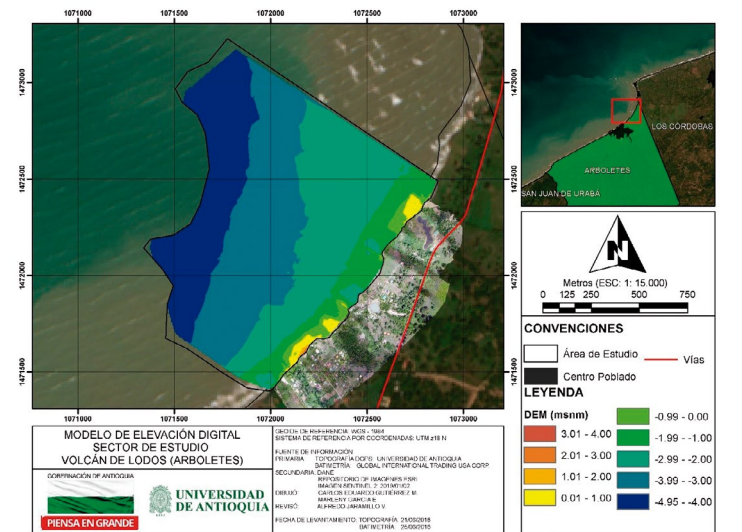
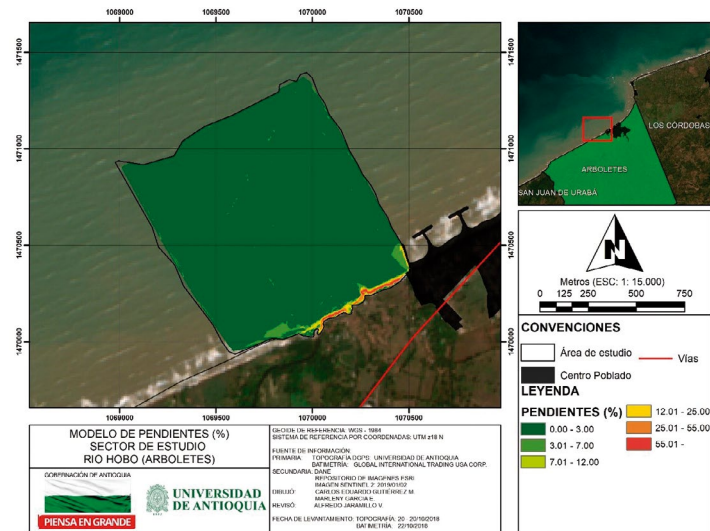


Figura 5.15 Principales características topográficas de río Hobo. A), B), C), E) y F) Acantilados localizados al noreste de la zona de estudio; D) Playa ubicada al suroeste de la desembocadura del río Hobo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica).

Figura 5.13 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en río Hobo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimétrica). al 3%), mientras que las mayores pendientes (superiores al 55%) corresponden a la zona del acantilado que se encuentra al noreste de la desembocadura del río Hobo.

La topobatimetría incluye valores que van desde 8,89 m de elevación hasta 5,03 m de profundidad; el área levantada es de 125 Ha. aproximadamente y la línea de costa estudiada posee una longitud de 1050 m.

Se observa una morfología en la zona sumergida muy

A lo largo de la línea de costa analizada, son muy pocas las obras encontradas, principalmente dos espolones al noreste del río Hobo y algunos escombros antiguos que se encuentran dispersos costa afuera.

5.3.6 Volcán de lodo

El modelo que describe de la mejor manera la topobatimetría del sector volcán de lodo, en el municipio de Arboletes (Antioquia) es un modelo tipo Vecinos Naturales con un tamaño de celda de 4 m (Tabla 5.8 y Figura 5.16).

En el mapa de pendientes de la figura 5.17, pueden observarse las zonas donde hay mayores pendientes, lo cual se debe principalmente a la presencia de escombros, de

MODELO	EM	EMC	DESV.STD
Vecinos Naturales T.C. 4 m	0,0071	0,0737	0,0733
Red de Triángulos Irregulares T.C. 4 m	0,0062	0,0759	0,0756
Kriging T.C. 4 m	0,0115	0,0981	0,0974
Vecinos Naturales T.C. 6 m	-0,0084	0,1304	0,1301
Red de Triángulos Irregulares T.C. 6 m	-0,0097	0,1306	0,1302
Distancia Inversa Ponderada T.C. 4 m	0,0275	0,1423	0,1396
Kriging T.C. 6 m	0,0152	0,1406	0,1397
Distancia Inversa Ponderada T.C. 6 m	-0,0022	0,1398	0,1398
Polinomio Local T.C. 4 m	0,0233	0,1689	0,1673
Polinomio Local T.C. 6 m	-0,0396	0,2156	0,2119

T.C. Tamaño de celda

Tabla 5.8 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en volcán de lodo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

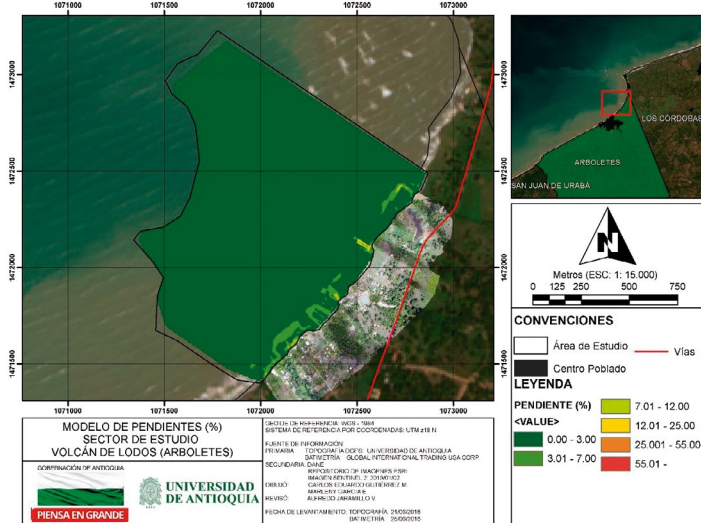


Figura 5.16 Modelo de Elevación Digital (DEM) del levantamiento topo batimétrico en volcán de lodo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).



Figura 5.17 Mapa de pendientes del sector de estudio volcán de lodo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría). obras de protección (espolones y enrocados) o a la dinámica sedimentaria.

Tanto el mapa de pendientes, como el mapa del modelo de elevación digital muestran que en la mayor parte del área de estudio se tienen pendientes muy bajas (inferiores al 3%); sin embargo, las mayores pendientes (hasta del 25%) corresponden a los espolones ubicados al norte y sur del volcán de lodo. Este sector presenta una morfología regular

y la pendiente es de aproximadamente 1:300. Además, se evidencia que los principales gradientes de pendiente se encuentran en los primeros 100 m de playa medidos de forma perpendicular a la línea de costa; debido principalmente al gran número de escombros o a estructuras existentes, las cuales fueron instaladas años atrás, en un intento fallido de proteger la costa ante la erosión.

En la topo batimetría se encontraron valores que van desde 1,96 m de elevación hasta 4,92 m de profundidad, el área estudiada es de 152 Ha y la línea de costa posee una longitud de 1690 m. Por otro lado, geomorfológicamente se encuentran barras de arena sumergidas y acantilados empinados con vegetación en ladera que presentan rastros de deslizamiento en el terreno. Respecto a estructuras antrópicas, se encuentran muros o recubrimientos del talud, espolones y diques, la mayoría conformados por escombros, rocas o tetrápodos convencionales (Figura 5.18). Por último, se evidencia desplazamiento del cráter del volcán en dirección hacia la carretera mediante el relleno con fragmentos de lodo seco.



Figura 5.18 Principales características topográficas de volcán de lodo. A) Obra de protección ubicada al norte del volcán; B) Lodo volcánico que llega al mar; C) Acanalado localizado al sur del volcán; D) Escombros al sur del volcán; E) Erosión al norte del volcán. (Fuente: Elaboración propia - Componente Topografía Batimetría).

Dada la dificultad del terreno, principalmente entre las isobatas de 0 y 1,5 m por la presencia de múltiples escombros y de estructuras, debe tenerse un factor de seguridad y prevención al momento de cualquier maniobra que se pretenda en dicha zona. Es importante considerar una intervención en la ladera completa del volcán toda vez que se controlen las aguas por escorrentía y por filtración, se implementen alternativas de revegetalización con especies livianas y de alta masa radicular, con el fin de mitigar la erosión subaérea de la zona.

5.4 Conclusiones

La geomorfología de las zonas Volcán de lodo, río Hobo, Zapata y en parte Damaquiel es similar por la

preencia de acantilados; en los resultados se encontró que vecinos naturales es el modelo que mejor se adaptó para representar las características topo batimétricas de las tres primeras zonas; a pesar que en Damaquiel el modelo de elevación digital es red de triángulos irregulares o TIN, vecinos naturales es el segundo modelo que mejor describe la topobatimetría, teniendo un valor de desviación estándar que no difiere mucho del TIN (0,0633 para TIN y 0,0676 para vecinos naturales). Por otro lado, en punta *Las Vacas* y *Uveros* se ajustaron los modelos TIN y Kriging con corrección lineal, respectivamente, cuyas playas no presentan acantilados, por el contrario, presentan pendientes que no alcanzan el 30%.

Los seis sitios de estudio se han intentado proteger de los procesos erosivos, razón por la cual se evidencian algunas estructuras de protección costera (espolones y enrocados), unas en buen estado y otras que han sido deterioradas por la acción del oleaje y que actualmente se han convertido en escombros dispersos por las playas.

Por otro lado, respecto a las condiciones actuales de erosión costera que presentan estas zonas, debe tenerse estricto control y monitoreo en los años siguientes a nivel topográfico, batimétrico y aerofotogramétrico para prever y mitigar a tiempo cualquier impacto o dificultad que se presente, implementando además medidas de solución para controlar o inclusive revertir el problema erosivo.

5.5 Referencias

Correa, Iván D., & Vernet, Georges. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, 33(1), 07-28.

Correa, Iván D., Paniagua, Juan F. (2016). The Arboletes – punta Rey Littoral, Southern Caribbean coast, World Geomorphological Landscapes, DOI 10.1007/978-3-319-11800-0_4.

Correa I y Tavera M., (2016). Actuaciones experimentales en los sectores del corregimiento de Zapata y la capitania del puerto, litoral antioqueño. Informe técnico final. Universidad de EAFIT.

Gutiérrez, C., Gutiérrez, Y., Noriega, O., Rangel, N., Fonseca, C., Ortega, E., García, H. (2017). Capítulo 4: Caracterización, Diagnóstico y Análisis de Vulnerabilidades y Amenazas en el Departamento del Magdalena, Erosión Costera. Universidad del Atlántico y Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORP Atlas de Geomorfología y Aspectos Erosivos del Litoral Caribe Colombiano).

Normas de la OHI para los levantamientos hidrográficos, 5a edición. Organización Hidrográfica Internacional (OHI). Publicación especial No. 44. B.P. 445 - MC 98011 Mónaco Cedex. Febrero, 2008.

A



Capítulo 6°

C



EROSIÓN
COSTERA

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 6°

Componente Ambiental

Autora

Mónica María Zambrano Ortiz
(PhD en Ciencias Biológicas)

6.1 Introducción

La erosión costera es un fenómeno que actualmente experimentan la gran mayoría de las costas del mundo (Linham & Nicholls, 2010; Pilkey & Cooper, 2014). Dadas las condiciones actuales del cambio climático, como la eventual elevación de la temperatura en sectores específicos del planeta y consecuentemente el aumento en el nivel del mar, los procesos de erosión alcanzarían en algún momento proporciones inmanejables para las comunidades costeras (Jones y Phillips, 2009; Shi et al. 2015). Por lo tanto, la erosión costera se vuelve un asunto prioritario y mucho más significativo, ya que las costas son lugares estratégicos para el desarrollo de las comunidades y son zonas de diferentes actividades productivas (Barragán & de Andrés, 2015).

La comunidad científica ha evaluado y ha divulgado la complejidad de las causas que causan erosión en las costas del mundo, enfatizando en la interrelación entre las influencias antropogénicas y los procesos naturales (van Rijin, 2011; Pranzini & Williams, 2013). En términos generales, los procesos de erosión se producen por factores que pueden contrastarse e incluyen entre otros los eventos de olas extremas, así como la alteración en el suministro de sedimentos, tanto naturales como provocados por el hombre (Rangel-Buitrago, Anfuso, Ergin, & Williams, 2015). Sin embargo, las condiciones de cada sector del planeta que se ha visto afectado por problemas de erosión tienen características muy diferentes; por lo general estas características son marcadas por factores que van desde lo climático hasta lo cultural, creando la necesidad en cada lugar de realizar procesos y controles específicos.

En este contexto la Componente Ambiental del proyecto *“Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”* tuvo como objetivo principal adelantar un análisis del estado de las propiedades fisicoquímicas, biológicas y de la contaminación del sistema marino, para recolectar información de base como diagnóstico en seis sectores seleccionados en el marco del Proyecto, por la complejidad que presentan ante la afectación causada por la erosión costera. El Proyecto, de manera integral, generó información tendiente a proponer soluciones encaminadas al manejo del problema erosivo, que contribuyan con el ordenamiento territorial de la costa de Antioquia y com-

plementen la información relacionada con el estado actual del litoral, ante el problema erosivo y las implicaciones del mismo en diversos sectores (ambiental, económico y social).

6.2 Metodología

6.2.1 Área de estudio

El golfo de Urabá, así como el litoral antioqueño (Figura 6.1) es un lugar que se destaca por contar con un enriquecido banco de peces que alimenta las actividades socioeconómicas de la región, se encuentran sábalos, meros, pargos, entre otras especies (Blanco, 2016). Los manglares circundantes son además refugio de cientos de aves migratorias, como tijeretas, gaviotas y pelícanos, declaradas especies de reserva municipales lo que convierte a esta región en potencial biodiverso del país (Uribe, 2012).

Los ríos como Atrato, León, Mulatos y San Juan entre otros, hacen parte de un rasgo característico importante de esta zona que, además cuenta con una línea de costa que ha sido levantada y deformada, afectando la plataforma marina, cuyas olas en pleamar atacan directamente el escarpe de la terraza marina causando la erosión (Correa & Vernette, 2004).



Figura 6.1 Golfo de Urabá y área correspondiente al litoral antioqueño, en amarillo puntos de muestreo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

Considerando las características físicas del suelo y de los sedimentos descargados por los ríos, los productos de erosión no alcanzan a ser depositados en la playa, permaneciendo en suspensión y siendo transportados mar adentro. Este proceso morfológico es el más importante en toda la línea de costa por la erosión de los escarpes de la terraza marina. Además, una vasta cantidad de moléculas son batidas permanentemente por las olas y el accionar del mar, en el cual se encuentran también remanentes de la roca terciaria que aparentan ser bloques caídos, los cuales aportan modificaciones en las zonas de playa (intermareal) y en la zona marina (submareal) afectando los sistemas biológicos en especial bentos y necton.

En este contexto los seis sitios seleccionados para adelantar los monitoreos se localizaron en los sectores de volcán de lodo (VDL) y río *Hobo* (RH) en el municipio de Arboletes, *Uveros* (Uv) y *Damaquiel* (Da) en el municipio de

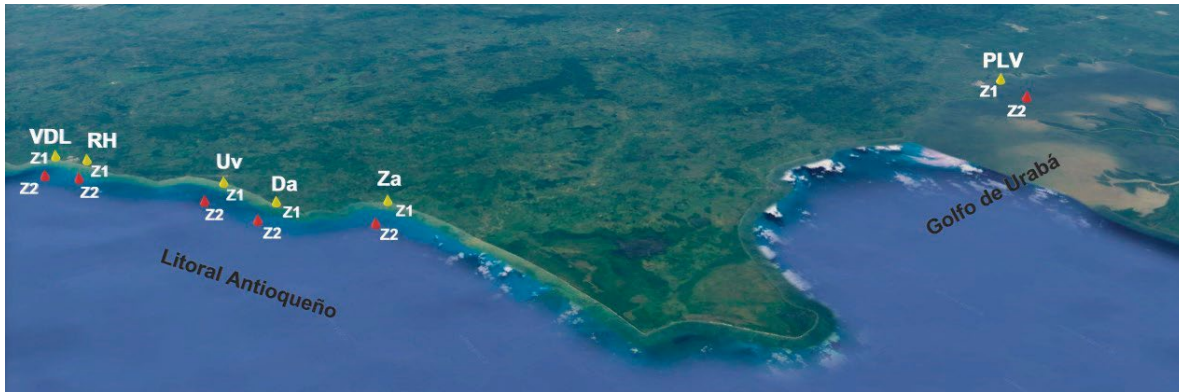


Figura 6.2 Zonas fijadas para análisis ambiental en los seis sectores establecidos, en el sector oriental del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

San Juan de Urabá, Zapata (Za) en el municipio de Necoclí y punta *Las Vacas* (PLV) en el distrito de Turbo. En cada sector se fijaron dos zonas para el análisis (Figura 6.2), una ubicada en el intermareal a orilla de playa (Z1) donde la actividad bajo influencia del proceso erosivo es mayor y la otra, perpendicular a la línea de costa (aprox. 750 m) en la zona marina, a una profundidad aproximada de 5 m (Z2).

6.2.2 Toma de muestras y análisis

Siguiendo metodologías ya establecidas y adaptando, en algunas, según las propiedades de la matriz analizada, se adelantaron los monitoreos; algunos procedimientos se desarrollaron en su totalidad y de manera directa en ambas zonas (Z1 y Z2) durante el muestreo (*in situ*), mientras que otros fueron analizados en los laboratorios (química y/o biología) de la Universidad de Antioquia - Sede Ciencias del Mar.

Entre los meses de agosto de 2018 y marzo del 2019 se cumplió con periodicidad mensual un levantamiento de información tendiente a la caracterización e identificación de la vegetación asociada a la playa de los sectores de interés, asimismo se midieron parámetros fisicoquímicos y se tomaron muestras de agua para el análisis de clorofila.

Trimestralmente se recolectaron muestras de agua para el análisis de plancton (mediante arrastres, empleando redes) y de nutrientes (nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y fosfatos), estas últimas se recolectaron en recipientes de 4 L de capacidad. Los sedimentos se recolectaron empleando un corazonador (Z1) y draga (Z2) para análisis de bentos. Para evaluar el necton se adelantó una faena de pesca en los lugares en que se tienen identificados caladeros de pesca (Punta *Las Vacas* y *Zapata*). Las muestras para determinación de contaminantes (metales pesados, pesticidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos - HAPs) se recolectaron mediante el uso de draga en los puntos de muestreo establecidos como Z2.

La información obtenida en campo, relacionada con parámetros fisicoquímicos se recolectó, empleando un medidor multiparámetros marca HANNA, determinando en agua los siguientes parámetros: temperatura superficial (°C), salinidad, pH, oxígeno disuelto (mg/L) y sólidos di-

sueltos totales (mg/L).

Los sedimentos fueron recolectados empleando una draga metálica *Van Veen*, del contenido extraído en la misma y mediante el uso de una espátula metálica se tomaron las muestras destinadas al análisis de pesticidas e hidrocarburos, depositando el material recolectado en papel aluminio y luego en una bolsa plástica; de otra parte, la muestra destinada a determinar la presencia de metales pesados se tomó empleando una espátula plástica y el material recolectado se depositó directamente en una bolsa plástica, en ambos casos se siguieron los protocolos establecidos para evitar la contaminación de las muestras que posteriormente fueron transportadas al laboratorio, en donde se adelantaron las actividades previamente establecidas para realizar los respectivos análisis químicos.

La determinación de nutrientes se cumplió en los laboratorios de la Corporación Para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABÁ), y la determinación de HAPs, Pesticidas y Metales fue analizada por el laboratorio de análisis ambiental de la Universidad de Antioquia sede Medellín.

Los análisis granulométricos, así como los biológicos (plancton, bentos y necton) se adelantaron en los laboratorios de la Sede de Ciencias del Mar de la Universidad de Antioquia.

6.3 Resultados y discusión

En gran parte de la línea de costa se evidencian riscos y desniveles formados por la caída segmentada del borde externo del suelo continental, producto de la deshidratación y la falta de cohesión en los componentes formadores del material arcilloso costero afectado por el accionar del mar, es evidente la alteración de los subsistemas que conforman la zona.

Las alteraciones derivadas de los procesos de erosión evidencian la necesidad de conocer el estado ambiental de estos sectores, siendo el seguimiento a la calidad del agua (parámetros fisicoquímicos y biológicos) y los de los sedimentos (contaminantes y comunidad bentónica) de gran importancia, ya que reflejan de manera confiable la condición del ambiente marino costero.

6.3.1 Parámetros Físico Químicos

6.3.1.1 Temperatura

La temperatura superficial del mar es una de las características más utilizadas en los estudios de variabilidad climática, por ser un índice significativo de la interacción océano atmósfera, ya que refleja los procesos de intercambio de calor y humedad (IDEAM, 2010); y además tiene una gran influencia sobre otras variables de la calidad acuática, pues afecta los procesos físicos (volatilización, solubilidad de sales y gases como el oxígeno, estratificación de estanques), químicos (pH, equilibrio de ionización o concentración de amoníaco, velocidades de reacción) y biológicos (tasa metabólica, descomposición de materia orgánica), por lo tanto, repercute en el efecto de los agentes contaminantes (Pérez-Castillo y Rodríguez, 2008).

Este parámetro permite establecer diferencias preliminares entre los sectores de playa y zonas marinas alejadas de la misma, su comportamiento en zonas costeras guarda una importante relación con la época climática, considerando la temporada húmeda y seca del año. Las diferencias entre zonas reflejan las variaciones en la interacción entre los componentes de cada ecosistema e inclusive, permiten comprender algunas alteraciones en el mismo. La figura 6.3 muestra los valores de temperatura medidos en los seis puntos establecidos en el litoral antioqueño.

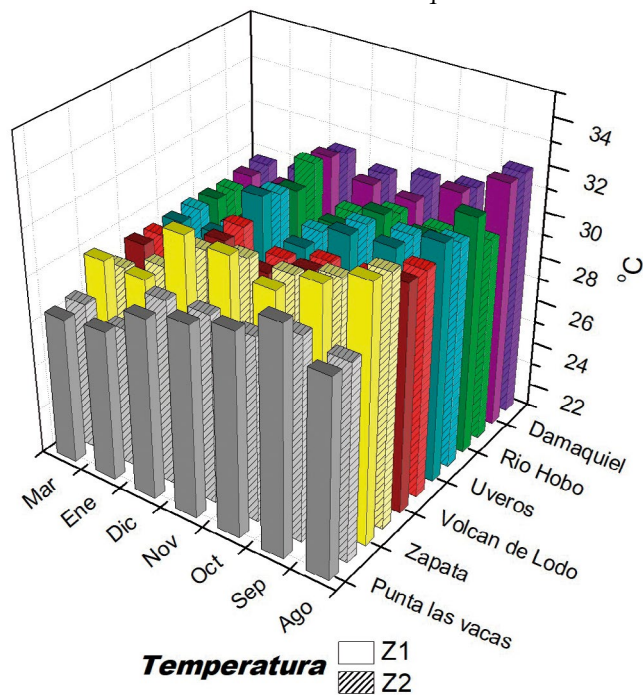


Figura 6.3 Valores de temperatura en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

Los valores registrados para este parámetro estuvieron entre los 27 °C en la estación de punta *Las Vacas* para el mes de marzo y un máximo de 32 °C en la estación de *Damaquiel* para agosto. Las variaciones entre Z1 y Z2 para todas las estaciones fueron mínimas, exceptuando la estación de *Zapata* que para el mes de diciembre registró una diferencia de

1 °C, siendo la Z2 la que presentó el menor registro de temperatura debido a la interacción de corrientes oceánicas. Es importante resaltar que las temperaturas más altas en la zona se registran durante los meses de temporada de lluvias, a medida que la época seca se acentúa y se incrementa la fuerza de los vientos provenientes del noreste, ejerciendo mayor influencia las corrientes oceánicas que disminuyen la temperatura superficial del agua en la zona litoral.

6.3.1.2 Salinidad

La salinidad es un parámetro que obedece a la presencia de algunas especies iónicas solubles en el sistema, es una propiedad importante del agua de mar ya que puede afectar las funciones fisiológicas de los organismos al alterar su balance osmótico, afectando su distribución y comportamiento.

En el agua de mar el intervalo de variación de este parámetro no es amplio, es usual en los ecosistemas costeros valores entre 34 y 36 psu. No obstante, esta situación es radicalmente distinta en los estuarios, donde las mezclas de agua de río con agua de mar proporcionan intervalos de variación muy amplios, entre 0 y 36 psu (Arjonilla y Blasco, 2003).

En zonas costeras como el litoral antioqueño la concentración superficial de sales decrece progresivamente en muchas localidades, especialmente por los aportes de agua dulce a través de las desembocaduras de ríos y quebradas (Salamanca & Schneider, 2013; Werlinger, et al., 2004).

El comportamiento de la salinidad y los valores registrados en los sitios de muestreo se presentan en la figura 6.4.

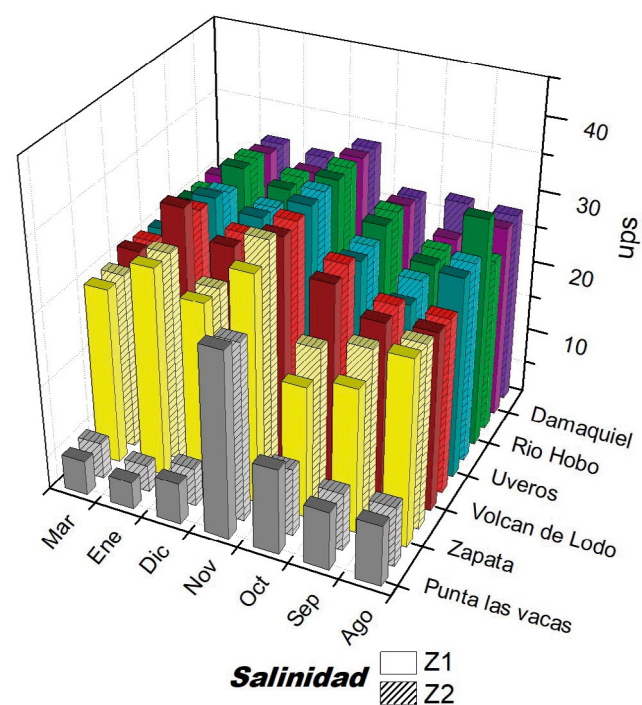


Figura 6.4 Valores de salinidad en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

Los valores de salinidad variaron en un rango entre 4,35 en el sector de punta *Las Vacas* (entre los meses de enero a marzo donde comienzan las lluvias dando fin a la temporada seca) y 33,4 en el sector de *Uveros* (en los meses de temporada seca). Estos valores obedecen a que en el sector de punta *Las Vacas* al estar dentro del golfo de Urabá las aguas se encuentran muy influenciadas por la desembocadura de ríos que causan procesos de dilución y disminuyen la salinidad en este sector.

Por otro lado, algunos sectores del litoral sufren un proceso similar, pero con la diferencia que sobre ellos se presenta menor influencia de las aguas continentales y mayor influencia de aguas oceánicas, con niveles de salinidad que varían en rangos entre 21 en temporada de lluvias y 33 en temporada seca, cuando los vientos aumentan y las corrientes oceánicas tienen mayor incidencia sobre la costa.

6.3.1.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH es una variable clave utilizada para describir el equilibrio y la cinética de los procesos químicos en aguas oceánicas (Yang, et al., 2014). Por lo general, los valores de pH en aguas oscilan entre 4 y 9 siendo la mayoría ligeramente básicas debido a la alta influencia de la carga iónica en el medio (Bates & Vijh, 1973). Existe cierta dependencia entre el equilibrio de las propiedades fisicoquímicas del cuerpo de agua y el pH del medio; es así como la disminución en la salinidad puede ser un claro factor de incremento de la concentración de iones hidronio y por lo tanto, de aumento de la acidez del medio (Qu, et al., 2017). La figura 6.5 muestra los valores de pH en una escala espacio-tiempo para los lugares monitoreados en el litoral antioqueño.

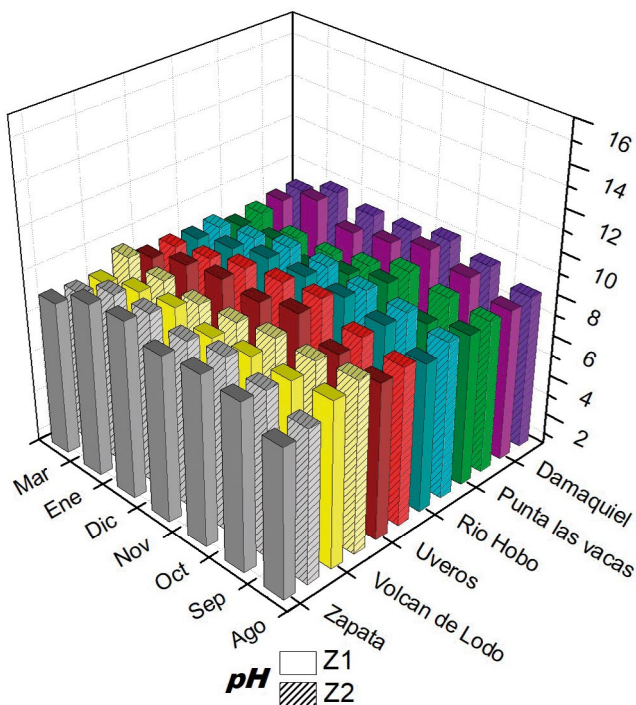


Figura 6.5 Valores de pH en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

Se encontró una variación general entre 7,6 en punta *Las Vacas* para el mes de marzo y 9,3 en *Uveros* para el mes de octubre; dado que este parámetro está muy asociado a otras propiedades, refleja la influencia de las distintas interacciones intermoleculares que coexisten en el ecosistema y que definen la concentración de sal e incluso la temperatura. Esta característica permite explicar la tendencia del pH en todas las estaciones monitoreadas, en las cuales a medida que la temporada seca se acentúa se presenta un aumento en la salinidad y, por tanto, en la alcalinidad del medio.

6.3.1.4 Oxígeno disuelto (OD)

La evaluación de OD en agua de mar es fundamental, pues permite evaluar la distribución de diferentes organismos en el océano (Asociación Interciencia., 2010). Los cambios en la concentración de OD en el agua se han utilizado para la determinación de las tasas de actividades autótroficas y la respiración comunitaria, obteniendo profundas implicaciones en la comprensión del equilibrio metabólico en los océanos (Chen, et al., 2003; Karl, Laws, Morris, Williams, & Emerson, 2003). En la figura 6.6 se representa el comportamiento del OD en una escala espacio temporal para cada uno de los sitios de muestreo.

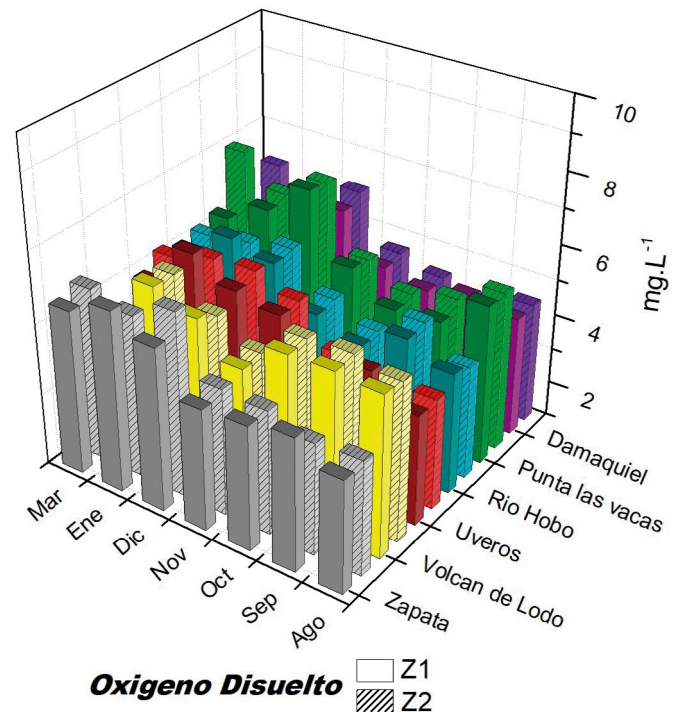


Figura 6.6 Concentración de OD en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

Las concentraciones de OD registraron valores entre los 3,47 mg.L⁻¹ en *Zapata* para el mes de octubre y 7 mg.L⁻¹ en punta *Las Vacas* para el mes de marzo. Este comportamiento en general es influenciado por las dos temporadas climáticas que caracterizan a la región. Para los meses correspondientes a la temporada de lluvias se registraron en algunos puntos concentraciones inferiores a la establecida como referencia (4,0 mg.L⁻¹) en cuanto a criterios de ca-

lidad con fines de preservación de la fauna y de la flora marina según la normativa colombiana.

Las concentraciones $<4.0 \text{ mg.L}^{-1}$ obedecen a un mayor aporte por parte de los ríos y a los procesos de descomposición de materia orgánica que ingresa al medio (transportada por estos cursos de agua continental), que requieren de oxígeno por parte de los microorganismos asociados a la actividad microbiana. Los incrementos en la concentración de OD durante la estación seca reflejan la fuerte influencia que sobre el golfo y el litoral tiene la actividad de los vientos y las corrientes, condiciones que aumentan la dinámica mareal e influyen directamente en los procesos de oxigenación de la columna de agua.

6.3.1.5 Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos (TDS) son la suma de todos los minerales, sales, iones disueltos y sólidos en suspensión que se encuentran en el agua (Devesa & Dietrich, 2018). Este parámetro resulta de gran importancia, teniendo en cuenta que se relaciona entre otros, con las descargas de sustancias minerales que viajan por las cañerías subterráneas hasta los ríos y que desembocan en el mar (Sylus & Ramesh, 2015). Los TDS estuvieron en el rango comprendido entre $8,49 \text{ mg.L}^{-1}$ para el mes de octubre y $74,75 \text{ mg.L}^{-1}$ en el mes de septiembre respectivamente, ambas concentraciones se registraron en el sector de punta *Las Vacas*.

En el agua de mar los TDS pueden alcanzar concentraciones muy superiores a las registradas en la zona, dado que el aporte de ríos en el golfo de Urabá ejerce una influencia importante en la variación de este y de otros parámetros fisicoquímicos al interior de la columna de agua. La figura

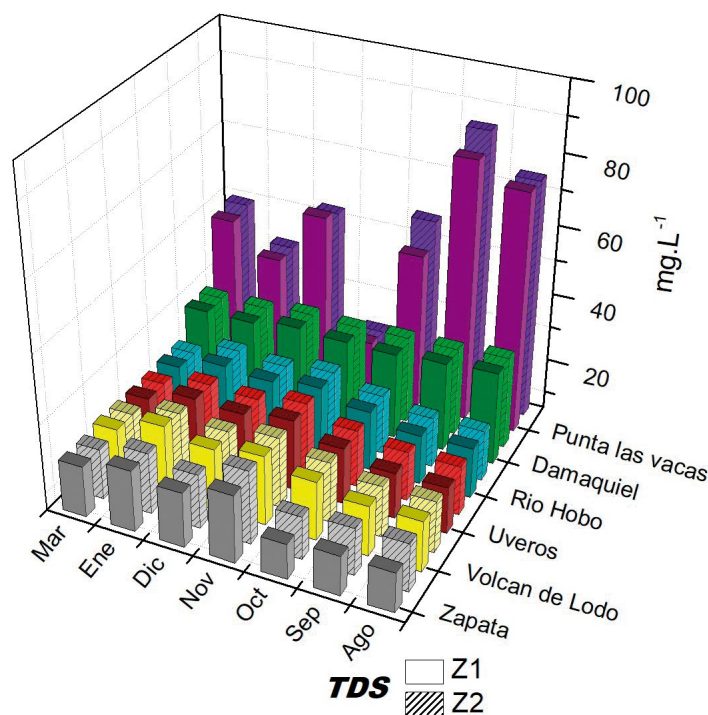


Figura 6.7 Concentración de TDS en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

6.7 muestra los valores de TDS determinados en una escala espacio-tiempo.

El sector de punta *Las Vacas* presenta influencia de las desembocaduras del río Atrato, la quebrada del Medido y el canal Casanova, por lo cual registra valores de TDS altos que pueden disminuir cuando las lluvias se reducen, descendiendo la cantidad de descargas por parte de estos cursos de agua dulce.

Los resultados obtenidos para la época de lluvias presentaron concentraciones de TDS inferiores a las obtenidas durante la época seca, pese a que se presenta una drástica disminución en los aportes de agua continental, esto indica que los incrementos en sólidos suspendidos durante este periodo se relacionan con el accionar del oleaje asociado a la fuerte incidencia de los vientos característicos de este periodo en el Caribe, lo que a la vez origina una importante resuspensión de material en la columna de agua, incidiendo de manera directa en la concentración de los TDS.

6.3.1.6 Clorofila

La clorofila *a* se encuentra presente en todos los organismos fotosintetizadores oxigénicos, por lo que su concentración en el agua de mar permite estimar la biomasa del fitoplancton e indirectamente la actividad biológica, es considerada una de las variables más importantes para describir la condición biológica promedio en los ecosistemas marinos (Manzano-Sarabia Salinas-Zavala, 2008); su determinación permite analizar la calidad del agua y consecuentemente la del ecosistema marino. La figura 6.8 muestra los valores de clorofila en una escala espacio tiempo del litoral antioqueño.

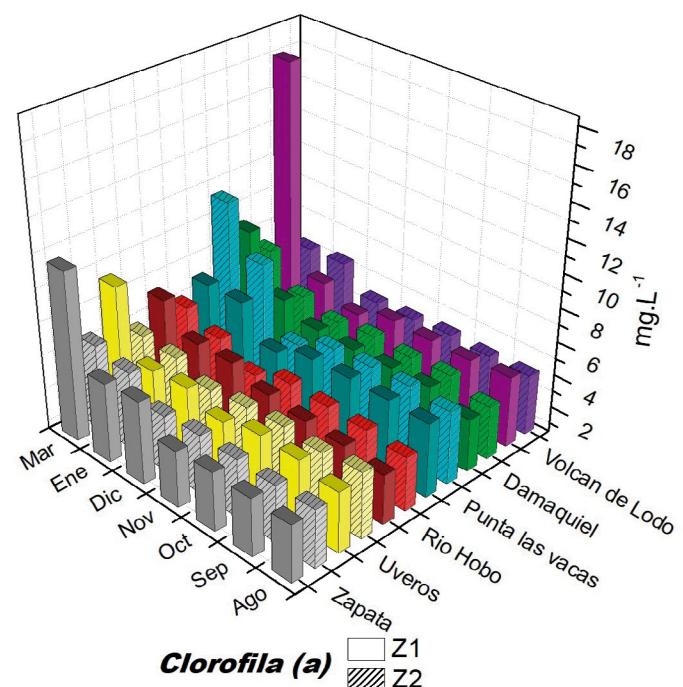


Figura 6.8 Concentración de clorofila en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

La clorofila presentó un rango de concentración entre los 3,86 y los 5,45 mg.L⁻¹ a lo largo de todo el litoral, salvo el mes de marzo donde se registraron concentraciones entre 4,9 y 17 mg.L⁻¹, siendo esta elevada concentración obtenida en la estación de volcán de lodo, guardando relación con un evento de floración algal detectado en la zona cercana a la playa, situación que se registró en todas las estaciones de muestreo, presentando en la estación de punta *Las Vacas* una incidencia mayor hacia la parte marina. Este comportamiento guarda relación con la temporada de transición climática donde termina el periodo de época seca para comenzar la temporada de lluvias, época que además registra disminución en el accionar de los vientos y el incremento en las descargas de diferentes arroyos que drenan el agua estancada con gran contenido de nutrientes, generando así un incremento en la comunidad fitoplanctónica y, por ende, en la actividad fotosintética que se refleja a su vez, en una mayor concentración de clorofila.

6.3.1.6 Nutrientes

En el medio marino los nutrientes soportan la base de la red trófica, pues son requeridos por los organismos autótrofos; sin embargo, su exceso asociado a actividades antrópicas genera desequilibrio en el ambiente llegando incluso a limitar la vida presente en el medio acuático (Paparazzo, et al., 2013).

La entrada de luz o el suministro de nitrógeno o fósforo biológicamente disponible, generalmente limitan la producción de biomasa. La forma de fósforo con mayor disponibilidad biológica (biodisponible) es el ortofosfato (PO₄³⁻) y las formas de nitrógeno más biodisponibles son el amoníaco (NH₃) y el nitrato (NO₃) (Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 1992). En los ambientes acuáticos, el proceso de asimilación de nitrógeno es ejercido por el fitoplancton y bacterioplancton, principalmente en la capa eufótica (Paparazzo, et al., 2013).

El nitrógeno amoniacal (NH₃-N) en los ecosistemas acuáticos es producto de la descomposición de la materia organonitrogenada y del intercambio de gases con la atmósfera, es mayor su relación en ecosistemas costeros con la degradación del nitrógeno orgánico, el cual, por acción bacteriana, se va oxidando gradualmente a nitritos (NO₂-N) y finalmente a nitratos (NO₃-N). Sin embargo, es importante resaltar que los NO₂-N son muy inestables por tanto sus valores son despreciables, de igual forma pasa con los fosfatos (PO₄-P) ya que no existe una fuente marina importante que lo aporte. La figura 6.9 muestra los valores de NO₃-N y NH₃-N en una escala espacio-tiempo para la zona de estudio en el litoral antioqueño.

Estos compuestos presentaron cambios en concentración según la temporada climática, encontrando mayores niveles de nitrógeno amoniacal en temporada húmeda, con un descenso significativo para la temporada seca, incluso, durante la época de transición, comportamiento que tiene una importante relación con los vertimientos de aguas resi-

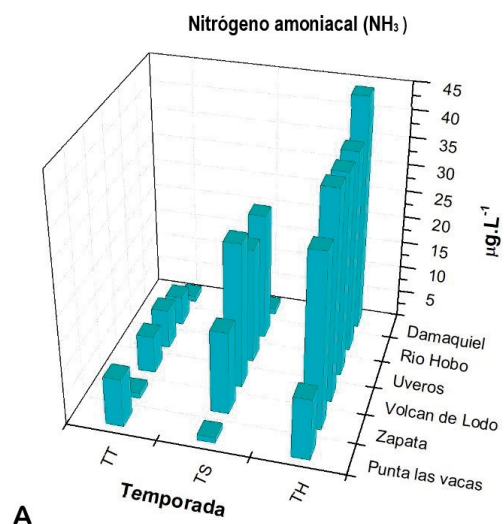
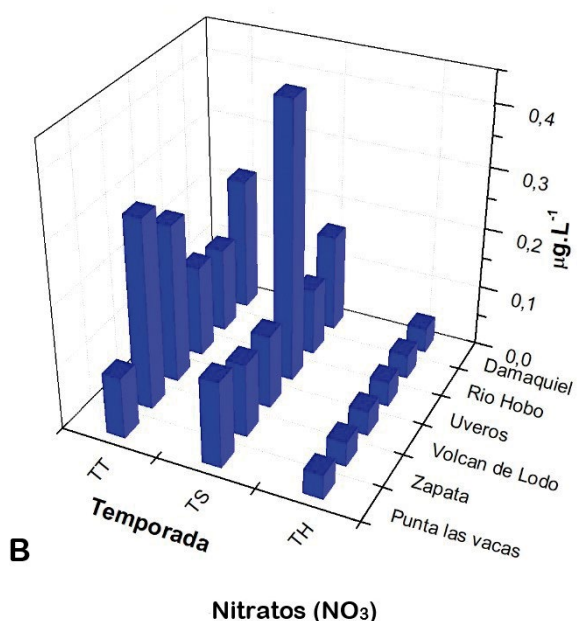


Figura 6.9 Concentración de nitrógeno amoniacal y nitratos en escala espacio-temporal para las estaciones de muestreo establecidas en sectores del litoral antioqueño. A) NH₃-N y B) NO₃-N. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).



duales desde asentamientos humanos, frecuentes en la temporada húmeda, cuando los ríos generan un mayor aporte al litoral y los caños transportan de manera más eficiente las aguas residuales que reciben; durante la temporada seca, la disminución del caudal aporta aguas con menos dilución de compuestos y materia orgánica.

Las concentraciones registradas para los nutrientes evaluados se encuentran por debajo de las establecidas en los criterios de calidad admisibles para aguas marinas y estuarinas para nitritos (55 µg.L⁻¹) nitratos (60 µg.L⁻¹), nitrógeno amoniacal (70 µg.L⁻¹) y fosfatos (45 µg.L⁻¹) (Marine Environment Division, 2008), indicando a este nivel, una óptima calidad del cuerpo de agua.

6.3.2 Contaminantes

Los contaminantes son compuestos químicos tóxicos

que pueden encontrarse de forma frecuente disueltos o dispersos en las diferentes matrices que conforman los ecosistemas, razón por la cual se hace fundamental el estudio y el monitoreo de contaminantes como metales pesados, pesticidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos, grupos que se relacionan con diversas actividades antrópicas y cuya presencia puede representar riesgos importantes para los ecosistemas.

Los valores de Cd, Pb, pesticidas y HAPs estuvieron por debajo de los límites de detección de las técnicas analíticas empleadas, por tanto, no se hace referencia a los mismos. En la tabla 6.1 se presentan las concentraciones de metales determinadas en sedimentos del litoral antioqueño.

Sector	Resultados en $\mu\text{g/g}$											
	TH				TS				TT			
	Cu	Cr _R	Ni	Zn	Cu	Cr _R	Ni	Zn	Cu	Cr _R	Ni	Zn
VDL	23,1	18,7	18,4	49,9	22,3	44,3	48,3	110	14,6	30,8	29,2	65,1
RH	24,0	17,2	18,4	45,6	40,1	66,3	55,9	127	5,56	6,12	13,4	21,8
Uv	18,8	14,3	11,3	37,1	16,4	49,4	30,9	86,5	6,79	12,3	14,2	32,7
Da	27,7	12,6	12,7	34,4	32,1	39,2	39,3	102	6,42	13,3	16,2	30,6
Za	39,0	19,7	18,6	55,8	35,5	46,6	48,9	115	-	10,6	14,2	22,4
PLV	24,0	33,3	26,5	69,0	15,9	41,2	31,4	82,1	5,87	21,1	19,4	36,0

TH (Temporada húmeda) TS (Temporada seca) TT (Temporada de transición)

Tabla 6.1 Concentración de metales pesados en los sitios de muestreo establecidos en el litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

El cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn) presentaron concentraciones inferiores a las establecidas como niveles permitidos según agencias de regulación internacional (Calderón & Valdés, 2012), pese a ello, estos metales no dejan de representar un peligro potencial para los ecosistemas, teniendo en cuenta las interacciones que se presentan, especialmente las asociadas con procesos de bioacumulación por parte de los organismos y de biomagnificación a través de la red trófica. En general, las concentraciones se incrementaron en la TS, lo que puede asociarse con el aumento en la velocidad del viento que altera el oleaje y produce resuspensión de los sedimentos, esto puede aumentar la concentración de los contaminantes adheridos a partículas resuspendidas en la columna de agua.

Metales como el Cu en el sedimento provienen de residuos de fertilizantes usados en la agricultura y en pintura para embarcaciones (Burgos Núñez, et al., 2017), el cromo al igual que el cobre se relaciona con actividades agrícolas y también con residuos de la actividad minera, específicamente de platino, oro y plata (Gutiérrez Mosquera, et al., 2018), mientras que el Zn es un contaminante común derivado de actividades agrícolas, de desechos de alimentos, fabricación de pesticidas y pinturas antiincrustantes para embarcaciones (El-Sorogy, et al., 2018).

6.3.3 Granulometría

Las playas como zonas de acumulación de sedimentos, al igual que otros sistemas costeros obtienen la mayor parte del material producto de las descargas fluviales. Por lo

tanto, la cantidad y el tipo de sedimento depende de varios factores, entre los más comunes se encuentran el aumento o disminución del caudal del río, así como la fuerza de la corriente transportadora del material. En este contexto, el análisis y la caracterización del sedimento es fundamental para la generación de información complementaria en el desarrollo de las propuestas que ayuden a disminuir la alteración del ecosistema marino de la región.

La zona de estudio en el litoral antioqueño presenta un tipo de sedimento clasificado según el tamaño del grano como arena, algo común en toda su línea de costa; estas arenas se subdividen en tres grupos: finas, medias y gruesas, y su distribución en cuanto a proporción varía para cada sector.

Para la zona de volcán de lodo el sedimento está constituido en un 99% por arenas finas tanto en Z1 como en Z2; para el sector de río *Hobo* el 98% en Z1 y 92% en Z2 corresponde a arenas medias; en el sector de *Uveros* y *Damaquiel* en Z1 el 50% pertenece a arenas medias y el 50% a finas, mientras que en Z2 el 95% está constituido por arenas finas, sin embargo el porcentaje en Z2 para *Damaquiel* varía según la influencia del río frente a la playa con un 75% de arenas finas y 25% de arenas medias; en el sector de *Zapata* en Z1 el 70% corresponde a arenas medias y el 30% a arena gruesa producto de la erosión del enrocado que existe en la zona, aumentando el tamaño del sedimento, en Z2 el 60% son arenas finas; en el sector de punta *Las Vacas* para Z1 el 60% lo constituyen arenas medias y el 40% arenas finas, mientras que en Z2 el 99% corresponde a arenas finas.

6.3.4 Biológicos

El plancton, al igual que el bentos son la base que sustenta de manera directa o indirecta la vida del resto de los organismos marinos. Estas comunidades se encuentran condicionadas por factores físicos, químicos y biológicos, siendo susceptibles a cambios. De esta manera, su estructura ocurre en respuesta a condiciones encontradas en el ambiente, por lo tanto, su abundancia y su composición, son variables clave para determinar la calidad de aguas y sedimentos (Crisp, 1984; Cifuentes, et al., 2000; Marques, et al., 2007; Pérez, et al., 2016).

Por su parte, el necton se encuentra constituido por animales capaces de nadar activamente y cuyo desplazamiento no está determinado por las corrientes de agua, entre ellos se encuentran principalmente crustáceos, moluscos, peces, reptiles y mamíferos. De este grupo, los peces son el grupo más diverso, sin embargo, muchas especies se encuentran amenazadas por las actividades humanas (Duncan y Lockwood 2001). Su caracterización resulta muy importante porque constituye una buena herramienta de ayuda para la toma de decisiones en materia ambiental, indican diversos niveles de degradación y definen el éxito de restauración de los ecosistemas acuáticos (Valer & Águila 2014).

GRUPO	ESTACIÓN	VDL			RH			Uv			Da			Za			PLV			
		H	S	T	H	S	T	H	S	T	H	S	T	H	S	T	H	S	T	
	ESPECIE	Temporada																		
—Diatomeas	<i>Asterionellopsis glacialis</i>					x	x						x	x				x		
	<i>Asteromphalus sp</i>				x	x		x					x							x
	<i>Bacteriastrium sp</i>	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x					x		x
	<i>Ceratium tripos</i>										x									
	<i>Chaetoceros affinis</i>	x	x		x	x		x	x	x										
	<i>Chaetoceros borgei</i>	x				x														x
	<i>Chaetoceros danicus</i>	x								x										
	<i>Chaetoceros didymus</i>	x	x													x	x		x	
	<i>Chaetoceros distans</i>									x										
	<i>Chaetoceros diversus</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x	
	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x				x
	<i>Chaetoceros muelleri</i>	x																		
	<i>Chaetoceros peruvianus</i>		x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x					
	<i>Chaetoceros singularis</i>	x																		
	<i>Chaetoceros subtilis</i>		x		x	x			x	x		x	x					x		
	<i>Clsterium kuetzingii</i>						x													
	<i>Coscinodiscus sp</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	<i>Grammatophora marina</i>		x													x	x			
	<i>Günardia flaccida</i>	x		x		x	x		x	x				x				x		x
	<i>Gyrosigma sp</i>									x										
	<i>Hemianulus hauckii</i>	x			x	x			x									x		
	<i>Hemianulus membranaceus</i>					x	x									x				
	<i>Hermesinum sp</i>	x	x		x	x		x				x	x		x				x	x
	<i>Leptocylindrus danicus</i>									x										
	<i>Neocalyptrella robusta</i>					x			x				x							
	<i>Neoceratium sp</i>		x	x	x		x	x	x	x			x	x				x		x
	<i>Nitzschia sp</i>																	x		
	<i>Odontella sp</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x					x		x
	<i>Plagiogramma sp</i>						x							x	x					x
	<i>Plagiotropis sp</i>						x											x		
	<i>Pleurosigma sp</i>		x				x	x			x		x	x						
	<i>Proboscia sp</i>	x								x										
<i>Pseudo-nitzschia</i>						x				x										
<i>Pseudosolenia sp</i>					x	x							x							
<i>Rhizosolenia sp</i>	x	x			x				x				x							
<i>Stephanopyxis palmeriana</i>																	x			
<i>Surirella factuosa</i>																	x			
<i>Thalassionema sp</i>		x	x			x	x		x	x			x	x				x		
Dinoflagelados	<i>Dictyocha fibula</i>					x														
	<i>Dinophysis acuminata</i>									x										
	<i>Dinophysis caudata</i>	x	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x	x				x	
	<i>Ditylum sp</i>	x	x					x	x				x							
	<i>Prorocentrum sp</i>		x			x			x	x		x	x						x	
	<i>Protoperdinium sp</i>									x				x						
Cianofíceas	<i>Anabaena sp</i>					x	x										x		x	

Tabla 6.2 Clasificación de las especies identificadas en el análisis de la comunidad fitoplanctónica en las tres temporadas climáticas evaluadas. Época húmeda (H), Seca (S) y Transición (I). (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

En la tabla 6.2 se relacionan las especies de organismos fitoplanctónicos identificados en cada uno de los sectores de estudio, en la tabla 6.3 se discrimina la diversidad encontrada a nivel del necton y en la tabla 6.4 se presenta la relación de los organismos pertenecientes a la comunidad bentónica.

Se registraron en total 45 especies fitoplanctónicas, encontrando mayor riqueza en la época seca, situación que puede atribuirse a condiciones óptimas de temperatura y salinidad en la columna de agua, y a que, pese a la disminución de la descarga de aguas continentales en la zona, se mantuvo el aporte de nutrientes requerido por parte de esta comunidad para su adecuado desarrollo. Géneros como *Dinophysis*, *Thalassionema*, *Odontella*, *Neoceratium*, *Hermesinum*, *Guinardia*, *Coscinodiscus*, *Chaetoceros* y *Bacteriastrum* estuvieron presentes en todas las estaciones. En la figura 6.10, se muestran algunas de las especies de esta comunidad encontradas en la zona de estudio.

Por su parte, la comunidad zooplanctónica estuvo dominada principalmente por copépodos y en más baja proporción, por larvas de moluscos bivalvos, larvas de moluscos gasterópodos, tintínidos, cladóceros y radiolarios. Sin embargo, la densidad de estos organismos durante las épocas de muestreo y en las seis estaciones fue <50 or-

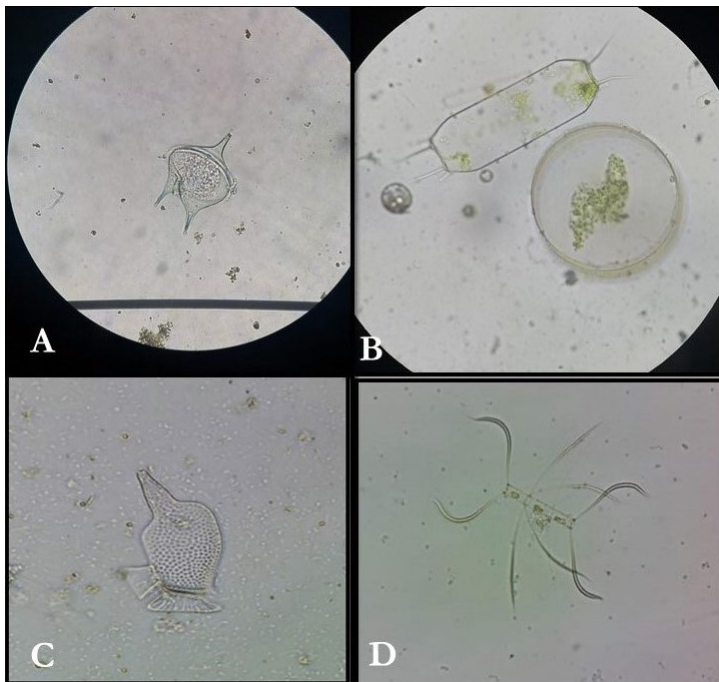


Figura 6.10 Especies fitoplanctónicas identificadas en aguas costeras del sector oriental del golfo de Urabá. A) *Protoperidinium* sp B) *Odontella* sp y *Coscinodiscus* sp C) *Dinophysis caudata* D) *Chaetoceros didymus* y *Chaetoceros Peruvianus*. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

ganismos/L, en la figura 6.11 se muestran algunas de las especies de zooplancton encontradas en el área de estudio.

En general, la comunidad planctónica registró un comportamiento muy similar en los periodos de época húmeda y transición, que difiere del registrado en época seca, periodo en el cual el incremento en la comunidad fitoplanctónica se vio reflejado en la variación de la concentración de clorofila registrada a lo largo del litoral.

En el área de estudio se identificaron dos caladeros de

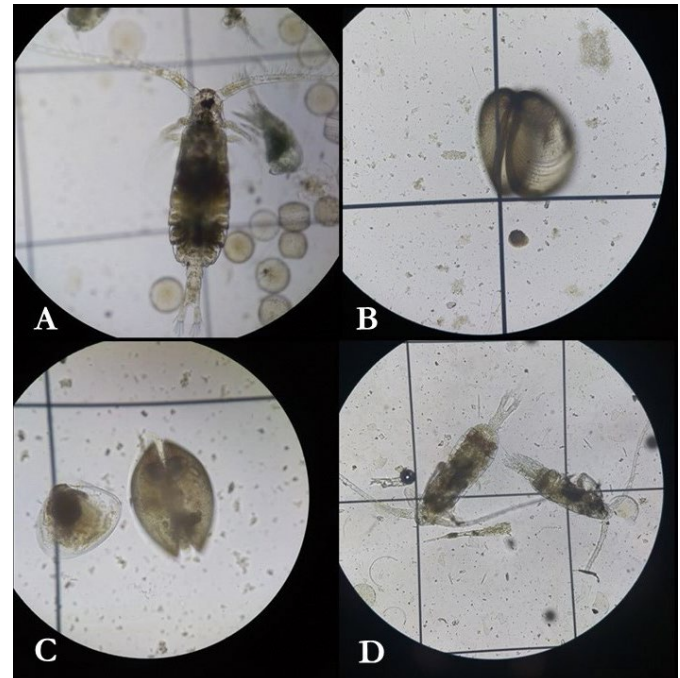


Figura 6.11 Especies zooplanctónicas identificadas en aguas costeras del sector oriental del golfo de Urabá. A y D) Copépodos B y C) Larvas de bivalvos. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

pesca, uno de ellos ubicado en el sector de *Zapata* y el otro en punta *Las Vacas*, en la tabla 6.3 se muestra la relación de las especies y el número de ejemplares capturados durante las faenas practicadas en ambos sectores.

El necton presentó diversidad en grupos de organismos asociados a los caladeros, se resaltan las especies *Chloroscombrus chrysurus* y *Cathorops mapale*, las cuales fueron las más abundantes en PLV y Za respectivamente. Los resultados indican una buena calidad de las aguas y de las condiciones aptas para el desarrollo de la actividad pesquera, la figura 6.12 muestra algunas de las especies capturadas en estos puntos.

A nivel de organismos bentónicos, la presencia de los mismos fue baja, en la tabla 6.4 se relacionan los grupos identificados en los sedimentos de cada uno de los sitios de muestreo.

La baja diversidad de organismos en los sedimentos analizados, puede atribuirse a la inestabilidad del suelo, debido

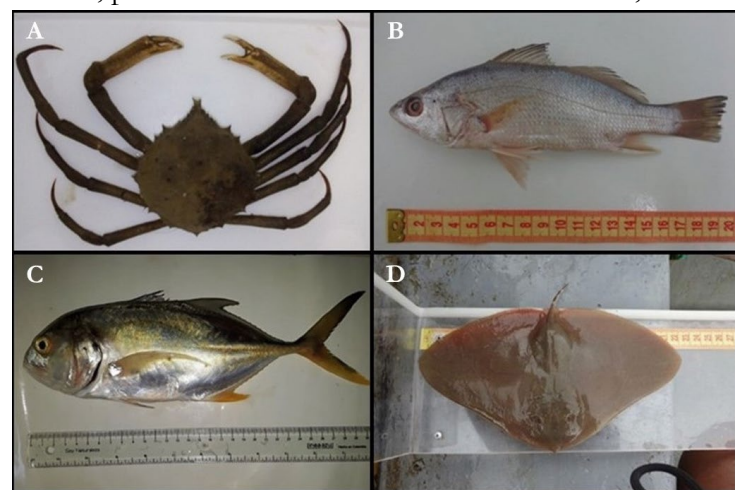


Figura 6.12 Organismos presentes en los caladeros de pesca. A) Cangrejo (*Mithrax* sp) B) Corvina (*Bairdiella ronchus*) C) Jurel aleta amarilla (*Caranx hippos*) D) Raya (*Gymnura micrura*). (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

GRUPO	ESPECIE	NOMBRE COMÚN	Za	PLV
PECES	<i>Cetengraulis edentulus</i>	Sardina cola amarilla	2	10
	<i>Odontognathus compressus</i>	Sardina transparente	1	0
	<i>Lycengraulis grossidens</i>	Sardina	2	0
	<i>Pellona harroweri</i>	Sardina ojona	0	1
	<i>Selene vomer</i>	Casabe	0	5
	<i>Trichiurus lepturus</i>	Sable	0	5
	<i>Scomberomorus brasiliensis</i>	Sierra común	0	1
	<i>Megalops atlanticus</i>	Sábalo, tarpón	1	0
	<i>Dasyatis guttata</i>	Raya latigo	2	0
	<i>Gymnura micrura</i>	Raya sin puas	1	0
	<i>Larimus breviceps</i>	Boquita de sábalo	2	0
	<i>Hemicaranx amblyrhynchus</i>	Chopa gorda	1	4
	<i>Eucinostomus sp</i>	Mojarra	1	0
	<i>Macrodon ancylodon</i>	Brillantina	1	0
	<i>Conodon nobilis</i>	Ronco Amarillo	2	0
	<i>Menticirrhus americanus</i>	Boquita pa' bajo	2	0
	<i>Chaetodipterus faber</i>	Dorotea	1	2
	<i>Nebris microps</i>	Huevolucio ó Safraná	1	0
	<i>Oligoplites saurus</i>	Siete cuero	2	11
	<i>Caranx latus</i>	Jurel sargentillo	0	2
	<i>Caranx hippos</i>	Jurel aleta amarilla	1	8
	<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	Chopa flaca	20	82
	<i>Opisthonema oglinum</i>	Chopa de escama	0	14
	<i>Elops saurus</i>	Macabí	0	8
	<i>Bairdiella ronchus</i>	Corvina	1	0
	<i>Stellifer sp</i>	Corvina	1	0
	<i>Micropogonias fumieri</i>	Corvina común	0	3
	<i>Achirus achirus</i>	Lenguado	2	1
	<i>Symphurus sp</i>	Lenguado puntudo	1	0
	<i>Cathorops mapale</i>	Chivo	26	1
	<i>Peprilus paru</i>	Palometa blanca	0	1
	<i>Sphyraena guanchancho</i>	Juancho juancho	0	1
	<i>Bagre bagre</i>	Bagre pluma larga	0	3
<i>Trachinotus falcatus</i>	Pámpano blanco	0	1	
<i>Bagre marinus</i>	Barbudo de pluma	1	3	
<i>Bagre bagre</i>	Barbudo de aguacil	2	0	
<i>Ariopsis sp</i>	Barbudo tetón	2	1	
Crustáceos	<i>Litopennaeus sp</i>	Camarón	2	0
	<i>Penaeus monodon</i>	Camarón tigre	0	1
	<i>Mithrax sp</i>	Cangrejo robocot	1	0
	<i>Callinectes sapidus</i>	Jaiba Azul	4	12
	<i>Callinectes bocourti</i>	Jaiba roja	3	1

Tabla 6.3 Especies asociadas al necton en caladeros de pesca del sector de Zapata y punta Las Vacas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

a la remoción que se ha generado por tiempo prolongado a causa de la erosión a la que está sometida la zona. Esta dinámica cambiante no permite un adecuado reclutamiento de organismos debido a la inestabilidad que presenta el sustrato y al cambio en composición que ha registrado el mismo. Sin embargo, la diversidad y la abundancia de estos

organismos fue mayor en temporada seca, esta condición se atribuye al aumento en los nutrientes y a condiciones físicoquímicas más estables en el área de estudio; en la figura 6.13 se muestran algunos de los organismos encontrados en los sedimentos de la línea costera.

TEMPORADA	PHYLLUM	CLASE	FAMILIA	VD L	RH	Uv	Da	Za	PLV	
TH	Annelida	Polychaeta	Capitellidae	1						
		Polychaeta	Phyllodocidae			3				
	Artrhopoda	Malacostraca	Ampeliscidae			2				
	Mollusca	Gasteropoda	Olividae						1	
		Gasteropoda	Columbellidae			1	1		2	1
		Bivalvia	Donacidae				1	1		
TS	Annelida	Polychaeta	Capitellidae		1					
		Polychaeta	Paraonidae	2						
		Polychaeta	Phyllodocidae		2		2		1	
	Artrhopoda	Malacostraca	Ampeliscidae	9						
		Malacostraca	Cirolanidae			1				
	Mollusca	Gasteropoda	Olividae	2		1				
		Gasteropoda	Pyramidellidae			1	1			
Bivalvia		Donacidae					1			
TT	Annelida	Polychaeta	Capitellidae			1				
		Polychaeta	Phyllodocidae		1					
	Artrhopoda	Malacostraca	Ampeliscidae						1	
	Mollusca	Gasteropoda	Olividae		1				1	
		Gasteropoda	Pyramidellidae						1	

Tabla 6.4. Organismos bentónicos registrados en los sedimentos de cada uno de los sitios de muestreo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

En la actualidad, las actividades humanas han provocado crisis en los ecosistemas marinos, incluida la pérdida de biodiversidad, los cambios en la red alimentaria y la disminución del recurso pesquero, por lo tanto, se ha reducido la capacidad del océano para autorregularse y prestar servicios a los seres humanos (Yu et al., 2019). Si bien, los problemas de erosión en el litoral antioqueño tienen origen natural, hay sectores que se han visto severamente afectados por la implementación de alternativas erróneas, tendientes a erradicar los problemas derivados de la erosión natural sobre determinados lugares, situación que ha impactado drásticamente la composición de comunidades vegetales y bentónicas.

6.4 Conclusiones

Entre los parámetros analizados, el OD registró en casi todos los sitios de muestreo, exceptuando punta *Las Vacas*, concentraciones inferiores a la establecida como adecuada para la preservación de la fauna y de la flora marina y estuarina, particularmente durante el periodo comprendido entre septiembre y octubre de 2018, situación que pudo originarse por un mayor ingreso de nutrientes y material orgánico a través de los aportes de los ríos.



Figura 6.13 Organismos bentónicos encontrados en los sedimentos de las estaciones de muestreo localizadas en el sector oriental del golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia - Componente Ambiental).

A nivel general, la calidad de los sedimentos evidenció una mínima afectación por actividades antrópicas; los contaminantes evaluados se encontraron por debajo de los límites de detección, con excepción de algunos metales, los cuales registraron concentraciones inferiores a los valores

establecidos como referencia para suelos contaminados.

La concentración de clorofila *a* durante el mes de marzo evidenció un incremento importante en la productividad primaria, relacionado con un evento de floración algal que se registró en todos los puntos de monitoreo.

Los caladeros de pesca registraron similitud en cuanto a diversidad de organismos en *Zapata* y punta *Las Vacas*, con mayor número de individuos en esta última estación, lo que puede estar asociado a una mayor influencia de aguas continentales y, por ende, de nutrientes.

Los sectores evaluados, exceptuando *Uveros*, registran diversos grados de afectación por el proceso de erosión que ha modificado de manera significativa el paisaje, alterando y/o restringiendo la composición y distribución de las comunidades biológicas que originalmente se encontraban en estos sectores.

La comunidad bentónica en los sitios afectados por erosión es escasa, la acción del fuerte oleaje y la remoción del sustrato genera condiciones inadecuadas que no permiten el asentamiento de los organismos propios de la zona intermareal y submareal.

Las comunidades bentónicas son indicadoras de la condición de un ecosistema, su escasa representación evidencia del efecto tensor/estrés que sobre las mismas se ha generado debido al proceso de erosión que afecta severamente la mayor parte de los sectores evaluados.

6.5 Referencias

Arjonilla, M. y Blasco, J. (2003). Análisis de nutrientes en aguas estuáricas. Efecto de la salinidad. *Ciencias marinas*, 29(4), 389-395.

Asociación Interciencia, M.E.S.D (2010). *Interciencia* (Vol. 35).

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council (1992). *Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters*. National Water Quality Management Strategy. Canberra.

Barragán, J., & de Andres, M. (2015). Analysis and trends of the world's coastal cities and agglomerations. *Elsevier Ocean & Coastal*.

Bates, R. G., & Vijh, A. K. (1973). Determination of pH: Theory and Practice. *Journal of The Electrochemical Society*, 120 (8), 263C.

Burgos-Núñez, S., Navarro-Frómata, A., Marrugo-Negrete, J., Enamorado-Montes, G., & Urango-Cárdenas, I. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the Cispatá Bay, Colombia: A marine tropical ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 120 (1–2), 379–386.

Calderón, C., & Valdés, J. (2012). Contenido de metales en sedimentos y organismos bentónicos de la bahía San

Jorge, Antofagasta, Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 47(1), 121–133.

Chen, C.-C., Shiah, F.-K., Gong, G.-C., & Chiang, K.-P. (2003). Planktonic community respiration in the East China Sea: importance of microbial consumption of organic carbon. *Deep-Sea Research II*, 50, 1311–1325.

Cifuentes, J. L., Torres-García, P., & Frias, M. (2000). *El océano y sus recursos: Plancton*. 2 ed. Fondo de Cultura Económica. México. 2000. 161 p.

Correa, I., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo), costa Caribe colombiana.

Crisp, D. J. (1984). Energy flow measurements. En: Holme, N. A., & Mcintyre, A.D. (eds). *Methods for the study of marine benthos*. Blackwell, Oxford: IBP Handbook 16, 1984. 284-367

Devesa, R., & Dietrich, A. M. (2018). Guidance for optimizing drinking water taste by adjusting mineralization as measured by total dissolved solids (TDS). *Desalination*, 439, 147–154.

Duncan, J. R. & Lockwood, J.L (2001). Extinction in a field of bullets: a search for causes in the decline of freshwater fishes. *Biological Conservation* 102: 97-105.

El-Sorogy, A., Al-Kahtany, K., Youssef, M., Al-Kahtany, F., & Al-Malky, M. (2018). Distribution and metal contamination in the coastal sediments of Dammam Al-Jubail area, Arabian Gulf, Saudi Arabia. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 8–16.

Gutiérrez-Mosquera, H., Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Roy, P. D., & Rivera-Rivera, D. M. (2018). Metal concentrations in the beach sediments of Bahía Solano and Nuquí along the Pacific coast of Chocó, Colombia: A baseline study. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1–8.

Blanco, J. F. (2016). Expedición Caribe sur: Antioquia y Chocó costeros. (Blanco Libreros Juan Felipe; Londoño Mesa Mario Hernán, Ed.). Bogotá: comisión colombiana del océano.

IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Estudio sobre la variabilidad de la temperatura superficial del mar en el Caribe colombiano. 42 pp.

Jones, A., & Phillips, M. (2009). Disappearing destinations: Climate change and future challenges for coastal tourism.

Karl, D. M., Laws, E. A., Morris, P., Williams, P. J. leB., & Emerson, S. (2003). Metabolic balance of the open sea. *Nature*, 426 (6962), 32–32.

Linham, M., & Nicholls, R. (2010). Technologies for climate change adaptation: coastal erosion and flooding.

Marques, S. C., Azeiteiro, U. M., Martinho, F., & Pardal, M. Â. (2007). Climate variability and planktonic communities: The effect of an extreme event (severe drought) in a

southern European estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73 (3–4), 725–734.

Marine Environment Division - MED. (2008). *Asean Marine Water Quality: Management Guidelines and Monitoring Manual*. Water Quality Management Bureau, Pollution Control Department. Marine Water Quality Criteria For The Asian Region. [en línea] [citado 7 Jun 2019]. Disponible en: URL:<https://environment.asean.org/wp-content/uploads/2015/07/ASEAN-MarineWaterQualityManagementGuidelinesandMonitoringManual.pdf>

Paparazzo, F. E., Farias, L., Santinelli, N., Alder, V. A., & Esteves, J. L. (2013). Incorporación de nitrato por fitoplancton en dos ambientes marinos diferentes de la provincia de Chubut (42°-46°S, Argentina). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 48(3), 591–600.

Perez, E., Lodeiros, C., Semidey, D., Uribe, E., & Freites, L. (2016). Crecimiento, supervivencia e influencia de factores ambientales en tres cohortes de la ostra perla *Pinctada imbricata*, en cultivo suspendido en el Golfo de Cariaco, Venezuela. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 44(1), 99–112.

Pérez-Castillo, A.G., & Rodríguez, A. (2008). Índice físico-químico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología Tropical*, 56(4), 1905-1918.

Pilkey, O. H., & Cooper, J.A.G. (2014). *The last beach*. Duke University Press, Durham, NC

Pranzini, E., & Williams, A. (2013). Coastal erosion and protection in Europe.

Qu, L., Xu, J., Sun, J., Li, X., & Gao, K. (2017). Diurnal pH fluctuations of seawater influence the responses of an economic red macroalga *Gracilaria lemaneiformis* to future CO₂-induced seawater acidification. *Aquaculture*, 473, 383–388.

Rangel-Buitrago, N., Anfuso, G., Ergin, A., & Williams, A. (2015). *Assessing and Managing the Coastal Scenery. Blue Solutions from Latin America and the Wider Caribbean*.

Salamanca, M. & Schneider, W. (2013). La Salinidad de los Océanos. Recuperado de <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/BioMarina/04.pdf>

Shi, P., Wang, J., Xu, W., Ye, T., Yang, S., Liu, L., & Wang, M. (2015). *World Atlas of Natural Disaster Risk* (pp. 309–323). Springer, Berlin, Heidelberg.

Sylus, K. J., & Ramesh, H. (2015). The Study of Sea Water Intrusion in Coastal Aquifer by Electrical Conductivity and Total Dissolved Solid Method in Gurpur and Ne-travathi River Basin. *Aquatic Procedia*, 4, 57–64.

Uribe, J. P. (2012). *Nuevos elementos para el manejo integrado de la región de Urabá, Costa Caribe colombiana*.

Valer, I. S., & Águila, M. H. Del. (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas:*

plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales.

van Rijin, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*. 54 (12), 867-887

Werlinger, C., Alveal, V., & Romo, H. (2004). *Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos*.

Yang, B., Patsavas, M. C., Byrne, R. H., & Ma, J. (2014). Seawater pH measurements in the field: A DIY photometer with 0.01 unit pH accuracy. *Marine Chemistry*, 160, 75–81.

Yu, W., Zou, X., Zhang, D., Wang, T., Wang, C., Yao, Y., ... Yuan, J. (2019). The evaluation of marine biological value of the Jiangsu coastal zone (east of China) under the interference of human activities. *Ecological Indicators*, 102, 76–83.

ESTRUCTURA DE SOPORTE

Capítulo 7º

CTD

EROSIÓN
COSTERA

OBSERVATORIO
EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 7°

Componente

Mediciones Físicas

7.1 Subcomponente

Mediciones In Situ

Autor

Juan Camilo Restrepo López
(PhD en Ciencias del Mar)

7.1.1 Introducción

La medición física es un proceso fundamental en la ciencia que consiste en comparar el comportamiento de un patrón seleccionado con la variable o fenómeno cuya magnitud física desea medirse, para observar cuántas veces está contenido en esa magnitud.

En el marco del presente Proyecto que pretende investigar para revertir el proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, se hizo necesario conocer las variables oceanográficas presentes en la zona de estudio. Las variables medidas fueron: Oleaje, corrientes, salinidad, temperatura y concentración de sedimentos en suspensión.

Estas mediciones son una primera aproximación para caracterizar el mar en la zona de estudio, también son de gran importancia para darle validez a la componente de modelación numérica que está dentro del marco del proyecto.

7.1.2 Equipos de medición

Los equipos utilizados para la medición de las variables oceanográficas ya mencionadas han sido:

- **RBR DR-1060:** Es un sensor de presión compacto de alta precisión, ideal para sondeos en aguas costeras, estuarios y hielo. Se caracterizó con este equipo el oleaje escalar del área de estudio.
- **Aquadopp HR:** El correntómetro Aquadopp profiler registra a partir de métodos acústicos (efecto Doppler) perfiles de velocidad (m/s) y dirección de corrientes en la columna de agua. El equipo estará acoplado con un OBS 3+ el cual será programado a la misma tasa de medición, se encarga de medir la concentración de sedimentos en suspensión.
- **LISST:** El equipo mide la concentración y distribución de tamaño de sedimentos mediante sensores ópticos

de difracción láser in situ (Laser In Situ Scattering Techniques, LISST-200X). Este equipo determina la concentración de sedimentos en 36 diferentes clases de tamaño.

- **OBS 5+:** Es un sensor óptico para medir la turbidez y las concentraciones de sólidos en suspensión mediante la detección de luz infrarroja dispersada por la materia en suspensión. La respuesta de los sensores OBS depende en gran medida del tamaño, la composición y la forma de las partículas suspendidas.
- **CTD Castaway:** A través del CTD se realizan mediciones hidrodinámicas de salinidad, densidad y temperatura en la columna de agua.

7.1.3 Zonas de medición

Las mediciones se realizaron en varios sectores a lo largo de la zona costera del Urabá antioqueño (Figura 7.1.1), estos sectores ubicados en: Turbo, Zapata (Necoclí), Uveros (San Juan de Urabá) y Arboletes.

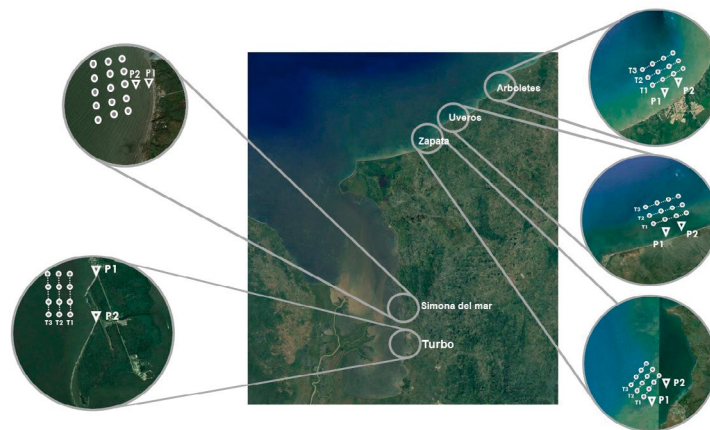


Figura 7.1.1 Puntos de mediciones físicas en la zona de estudio. (Fuente: Elaboración propia - Subcomponente Mediciones In Situ).

Para cada sector las mediciones fueron efectuadas en dos modalidades:

7.1.3.1 Mediciones puntuales

Este tipo de mediciones tiene como propósito tomar medidas en un punto particular del espacio geográfico. Por cada sector mencionado anteriormente se realizaron dos mediciones puntuales simultáneas de 24 horas. Se midió el oleaje escalar con el sensor de presión RBR DR-1060 y las corrientes fueron medidas con el correntómetro Aquadopp profiler, se pueden observar en la figura 7.1.2 los equipos en la estructura de montaje. Los puntos donde fueron realizados este tipo de mediciones se pueden identificar en la figura 7.1.1 con el indicativo P1 y P2, para cada sector de medición.

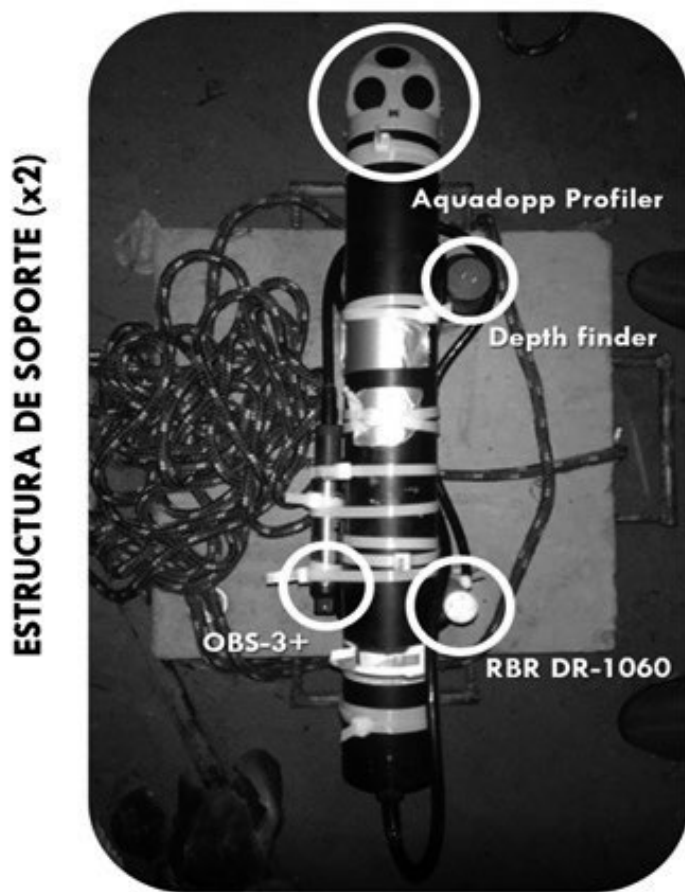


Figura 7.1.2 Montaje para mediciones puntuales. (Fuente: Elaboración propia - Subcomponente Mediciones In Situ).

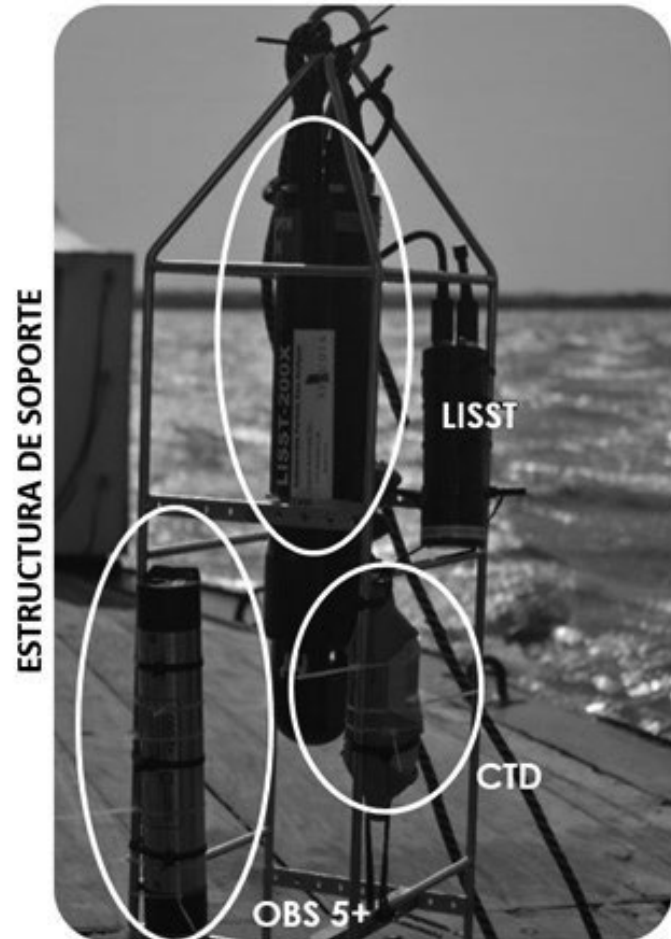


Figura 7.1.3 Montaje para mediciones en perfiles. (Fuente: Elaboración propia - Subcomponente Mediciones In Situ). época climatológica definida como seca, la cual es caracterizada por la ausencia de lluvias en la costa Caribe.

7.1.3.2 Mediciones en perfiles

Es básicamente una sección transversal de la superficie de un elemento que puede medirse, en este caso el agua del mar. Este tipo de mediciones permite observar cómo varían los parámetros de medición a lo largo de la columna de agua. Se realizaron tres transectos paralelos a la línea de costa, en cada transecto se aplicaron cuatro perfiles verticales dando un total de 12 perfiles por sector. En estos perfiles se midieron la salinidad y la temperatura con el CTD CastAway, la concentración de sedimentos en suspensión con el OBS 5+ y el tamaño de grano de los sedimentos con el LISST. La ubicación de los equipos en la estructura utilizada para los perfiles puede observarse en la figura 7.1.3. Los puntos de medición pueden identificarse en la figura 7.1.1 en los transectos T1, T2 y T3, siendo T1 el perfil longitudinal más cerca a la costa y T3 el más alejado de la costa.

7.1.3.3 Resultados de las mediciones

Las mediciones en los sectores de Turbo, Zapata, Uveros y Arboletes se llevaron a cabo los días 21, 23, 25 y 27 de enero de 2019. El período de medición corresponde a la

Los resultados muestran que los valores de salinidad medidos en el sector de Turbo son menores comparados con los otros sectores de medición, registrando valores mínimos del orden de los 4 PSU, esto debido al efecto de las descargas del río Atrato en el sector de medición, los sectores de Zapata, Uveros y Arboletes muestran que la salinidad del agua de mar en la zona oscila entre 26 y 33 PSU, lo cual está dentro del promedio de salinidad para el mar Caribe.

Las mediciones de temperatura del mar en la zona de estudio oscilan entre los 28°C y 29°C. Los resultados muestran que en el sector de Zapata se tienen las mayores alturas de ola (2.44 m) y las mínimas alturas de ola se encuentran en el sector de Turbo (0.9 m).

Las mediciones obtenidas muestran que las corrientes varían dependiendo del sector de medición, la Tabla 20 muestra que la dirección predominante en el sector de Turbo es el Sur donde se presentan valores de corrientes de hasta 0.59 m/s, mientras que para los sectores de Zapata y Uveros las mayores corrientes medidas 0.41 m/s y 0.35 m/s, respectivamente van dirigidas a la dirección Este y en el sector de Arboletes los mayores valores de corrientes (0.245 m/s) registrados corresponden a la dirección Oeste.

Los equipos encargados de medir la concentración de sedimentos y el tamaño del grano muestran que los limos

		Turbo	Zapata	Uveros	Arboletes
Salinidad	<i>max</i>	6	32.8	28.4	28
	<i>min</i>	4	30.4	27.8	26.2
Temperatura (°C)	<i>max</i>	28.2	28.8	28.9	29
	<i>min</i>	28	28.2	28.4	28.6
Altura significante de ola (m)	<i>max</i>	1.89	2.3	2.44	1.63
	<i>min</i>	0.9	1.51	1.56	0.98
Período pico de ola (s)	<i>max</i>	7.95	11.22	10.03	10.08
	<i>min</i>	6.43	7.78	7.04	7.96
Componente de la velocidad máxima de las corrientes (m/s)	<i>Norte</i>	0.068	0.333	0.24	0.215
	<i>Sur</i>	0.416	0.204	0.288	0.145
	<i>Este</i>	0.084	0.413	0.352	0.197
	<i>Oeste</i>	0.394	0.137	0.14	0.245
Concentración de Sedimentos (µl/l)	<i>max</i>	64	30	13	50
	<i>min</i>	8	5	4	5
Diámetro Medio de Partículas (µm)	<i>max</i>	140	124	90	205
	<i>min</i>	20	18	18	18
Tipo de sedimento según Udden-Wentworth	Limos medios, limos gruesos y arenas muy finas				

Tabla 7.1.1 Resumen de resultados obtenidos en las campañas de medición. (Fuente: Elaboración propia - Subcomponente Mediciones In Situ). medios, los limos gruesos y las arenas finas son los sedimentos característicos de toda la zona de estudio y tienen mayor concentración en el sector de Turbo (64 µl/l), lo cual puede ser explicado por las descargas fluviales del río Atrato.

7.1.3.4 Conclusiones

Las mediciones físicas pretenden caracterizar la zona de estudio correspondiente al mar de Antioquia, y permiten concluir, que el comportamiento de las variables oceanográficas medidas, varía dependiendo del sector de medición.

El sector de Turbo mostró comportamientos muy diferentes a los sectores restantes, esto se debe a su ubicación dentro del golfo de Urabá y su proximidad a las descargas fluviales del río Atrato, lo que causa que disminuya el tamaño de las olas, que los valores de salinidad sean bajos respecto a los otros sectores de medición y que tengan una alta concentración de sedimentos en suspensión.

Los sectores de Uveros, Zapata y Arboletes al estar más alejados del golfo de Urabá y de las descargas fluviales del río Atrato, muestran características diferentes al sector de Turbo. Los resultados indican presencia de mayores alturas

de ola, con periodos más largos, corrientes en magnitud mayores con dirección predominante Este, una menor concentración de sedimentos en suspensión caracterizado principalmente por limos medios, gruesos y arenas finas.

La información recolectada por este subcomponente es una primera aproximación para poder caracterizar la hidrodinámica y morfodinámica de la zona del mar de Antioquia en época seca y es clave para la validación de modelos numéricos utilizados en el marco del presente proyecto.

7.2 Subcomponente Mediciones En Laboratorio

Autores

Andrés Fernando Osorio Arias

(PhD en Ciencias y Tecnologías Marinas)

Ligia Estela Urrego Giraldo (PhD en Biología).

Juan David Osorio Cano

(PhD en Ciencias Marinas)

Maximiliano Arredondo Ramírez

(MSc en Ingeniería)

Carlos Alejandro Henao Vargas (Ing. Civil)

María Alejandra Piedrahita Ospina (Ing. Civil)

7.2.1 Introducción

La estabilidad de una playa depende del balance entre los sedimentos disponibles y el transporte longitudinal y transversal de sedimentos producto de la acción del oleaje, el viento y las corrientes. De esta manera la costa puede sufrir pérdida o ganancia de sedimentos o simplemente permanecer en equilibrio (Rangel, Anfuso, & Williams, 2015). Estos balances de sedimentos en las playas se ven afectados por la construcción de estructuras costeras y el aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio climático, alterando el equilibrio dinámico natural de las playas. El resultado es una nueva condición de equilibrio de la línea de costa, que en algunos casos puede no ser deseable (Sorensen, 2006).

En el caso específico del Urabá antioqueño, desde las últimas cuatro décadas se han producido retrocesos de la línea de costa del orden de los 50-100 m en promedio y en algunos sectores alcanza valores máximos de hasta 1.6 km, con tasas de erosión de 40 m/año. Un ejemplo de esta dinámica se presenta en las playas entre los municipios de Arboletes y Turbo. Adicionalmente, las tasas de erosión se han incrementado debido a intervenciones antrópicas como la desviación del río Turbo, la extracción intensiva de materiales de playa, el manejo inadecuado de las aguas lluvias y residuales y obras de protección mal construidas (Blanco, Estrada, Ortiz, & Urrego, 2012). Por esta razón, se hace evidente la necesidad de ejecutar planes para controlar o mitigar con eficiencia el proceso erosivo de las costas del mar de Antioquia.

Para el control de los procesos erosivos en las playas se ha implementado la construcción de obras duras como diques, espolones o rompeolas como se muestra en la figura 7.2.1

En los últimos años esta problemática ha comenzado a abordarse con soluciones de bajo impacto ambiental o soluciones basadas en la naturaleza (Maza et al., 2017). Se han usado diversos ecosistemas naturales como disipa-



Figura 7.2.1 Estructuras duras utilizadas para proteger la línea de costa en el litoral Caribe colombiano. A) Rompeolas en Cartagena (Foto INVEMAR – Marta Vides). B) Bolsacretos y bloques en la banca de la vía al aeropuerto de Santa Marta (Foto Programa GEO – INVEMAR). C) Baterías de espolones en el golfo de Morrosquillo (Foto cortesía Sucre). D) Enrocados para proteger obras viales de la acción del oleaje en Santa Marta (Foto Programa GEO – INVEMAR). (Fuente: Posada & Henao, 2008).

dores de energía y reservorios de sedimentos, los cuales han presentado buenos resultados y podrían usarse como estabilizadores de la erosión costera. Una de las estructuras naturales que ha mostrado gran eficiencia en la mitigación de los procesos erosivos son los manglares. Muchos estudios han demostrado que los bosques de manglar pueden disipar la energía del oleaje por medio de cambios en la rugosidad del lecho u obstáculos. De esta manera, estas coberturas se consideran barreras naturales contra la erosión y los eventos extremos (Alongi, 2007; Thampanya, Vermaat, Sinsakul, & Panapitukkul, 2006). Por lo tanto, en este estudio se propone el uso de los árboles de mangle, particularmente de la especie *Rhizophora mangle*, como una alternativa de control al problema de erosión presente en el Urabá antioqueño.

7.2.2 Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se aplicó una modelación física a escala de laboratorio. Las modelaciones se realizaron en el canal de olas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Este es uno de los canales más grandes de su tipo en Sur América y el único en Colombia hasta el momento. El canal está compuesto por una zona de generación de olas donde una pala tipo pistón se encarga de realizar este trabajo. Posteriormente se encuentra una zona de propagación y al final una zona de disipación construida con una playa de piedras de grava para disipar las ondas incidentes y reducir la reflexión. Cada una de las partes anteriormente mencionadas se presenta en la figura 7.2.2.

Para las modelaciones físicas fue necesario caracterizar y escalar el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo y el clima marítimo de la zona de estudio. A continua-

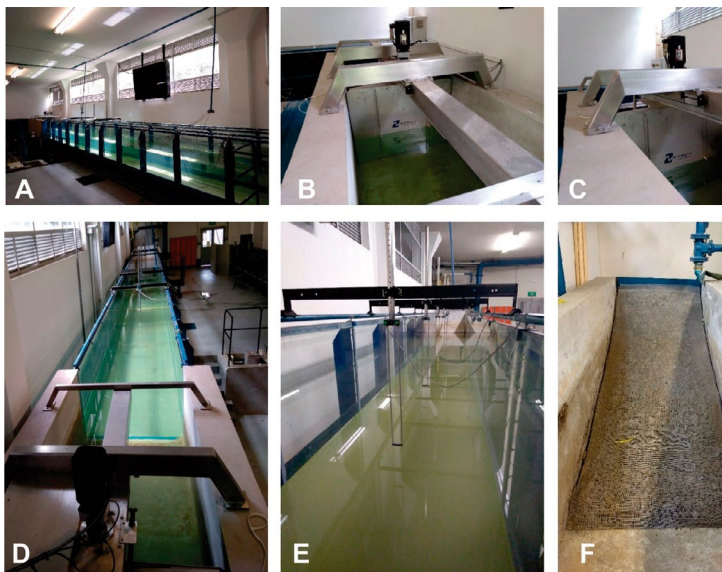


Figura 7.2.2 Canal de oleaje de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. A) Canal ola-corriente. B, C, D) Sistema de generación de oleaje y pala tipo pistón. E) Zona de propagación de oleaje. F) Zona de disipación y playa de grava. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio). ción, se detalla este proceso.

7.2.2.1 Caracterización del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo usado en las modelaciones físicas

Los manglares son una formación de bosque o humedal costero con especies vegetales que presentan adaptaciones especiales para desarrollarse en ambientes inundables con alto contenido de sales (Rodríguez & Vázquez, 2007). La especie *Rhizophora mangle* se caracteriza por tener raíces aéreas desde el tallo en forma arqueada. La altura de las raíces depende del régimen de mareas ya que estas le proporcionan la respiración a la planta. Por su parte, las hojas permiten la oxigenación de la planta y la eliminación de sal. En la actualidad, se han registrado bosques de mangle en 123 países, de los cuales Colombia ocupa el puesto número 13 en poseer mayor número de hectáreas de manglares (FAO, 2007). De acuerdo con cifras de la FAO (2007) Colombia presenta 371.250 ha de bosques de manglar, siendo la especie más común es el *Rhizophora mangle*, de las cuales 4500 ha aproximadamente pertenecen al golfo de Urabá (Urrego, Molina, & Suárez, 2014).

Las modelaciones en el canal de olas, se construyeron modelos artificiales de árboles de *Rhizophora mangle* a escala 1/10 en acero inoxidable representando las características morfométricas de la especie. Se escogió esta especie por ser la más expuesta al oleaje y por presentar un alto grado de resistencia frente a tsunamis, a la mitigación de la erosión costera, eventos extremos producto del cambio climático, capacidad de almacenar el carbono de la atmósfera, los beneficios sobre la formación de suelos y además por ser la especie más abundante en el golfo de Urabá (Alongi, 2007).

Para escalar el manglar se tomaron los datos reportados por Urrego et al. (2014), donde midieron el diámetro a la

altura del pecho (DBH) y la altura total de 23.690 árboles en nueve zonas del golfo de Urabá. Con base en esta información, se aplicó la metodología de Ohira, Honda, Nagai, & Ratanasuwan (2013), la cual permite dimensionar el complejo sistema de raíces de un mangle con solo el valor de DBH para cualquier espécimen de *Rhizophoraceae*. De acuerdo con la metodología, la altura de la raíz más alta ($H_{R_{max}}$) se puede obtener con base en el DBH de cualquier árbol, con la siguiente ecuación:

$$H_{R_{max}} = 7.56(DBH) + 0.5$$

Por su parte, el número de raíces primarias de un espécimen de mangle se puede obtener con la $H_{R_{max}}$ usando la siguiente ecuación:

$$N = 3.2(H_{R_{max}})^2 + 5.3(H_{R_{max}}) + 0.1$$

Para determinar la altura de cada una de las raíces principales (H_{R_i}) y el diámetro de estas (θ_{R_i}), Ohira et al. (2013) propone las siguientes ecuaciones:

$$H_{R_i} = H_{R_{i-1}} - \frac{H_{R_1} - 0.25}{N - 1} \text{ para } 2 < i < N$$

$$\theta_{R_i} = 0.04DBH + 0.005H_{R_i} + 0.024$$

Para obtener modelos de mangle con sistemas de raíces más representativos, se adicionaron raíces secundarias implementando la metodología de Järvelä (2004) que consiste en asignar un primer orden a las raíces más pequeñas de un árbol de mangle (raíces más alejadas del tronco, por medio de las cuales brotan las raíces de alimentación y están en contacto con el suelo) e ir aumentando el número de orden conforme se cambie hacia una raíz superior hasta llegar al tronco del árbol. Para asignar un orden a cada raíz debe cumplirse con las siguientes reglas:

- Las raíces más pequeñas se les asigna un número de orden 1.
- La unión entre dos o más raíces de un mismo orden (m) forma una raíz de orden (m+1).
- La unión entre dos raíces de diferente orden forma una raíz de igual orden al mayor orden entre las dos raíces que se están uniendo.

Para la construcción de los modelos se diseñaron plantillas de cada raíz y a partir de estas se realizaron los dobleces del acero inoxidable. Posteriormente cada raíz primaria fue soldada al tronco principal y de cada raíz principal fueron soldadas dos raíces secundarias como se muestra en la figura 7.2.3.

En total se construyeron 28 árboles artificiales de mangle los cuales cubren una distancia de cinco metros dentro del canal. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 7.2.4.



Figura 7.2.3 Proceso constructivo de los árboles de mangle. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

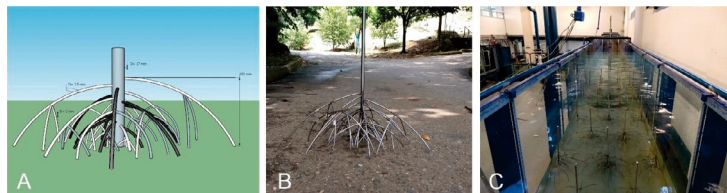


Figura 7.2.4 Modelo físico del mangle para la implementación en el canal de olas. A) Esquema del modelo. B) Construcción del modelo físico. C) Modelo físico instalado en el canal de olas. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

La densidad del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo se ha identificado como uno de los factores que tienen mayor influencia en la amortiguación o disminución de la energía del oleaje (Husrin & Oumeraci, 2009). Con el fin de evaluar el comportamiento del flujo en la condición de bosque densamente poblado, característica de un manglar joven y la condición de bosque menos poblado, característico de un manglar maduro o intervenido antrópicamente, se usaron dos densidades para el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo típicas de la región de estudio, para ser representadas en el modelo de laboratorio, una de ellas es de 5.6 árboles/m² y la otra de 7 árboles/m². En la figura 7.2.5 se presenta la distribución del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo dentro del canal.

Para la configuración del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo, fue necesaria la utilización de medios árboles, los cuales se localizaron en el extremo longitudinal de las paredes del canal con el objetivo de no crear canales preferenciales de flujo y afectar la hidrodinámica dentro del modelo paramétrico.

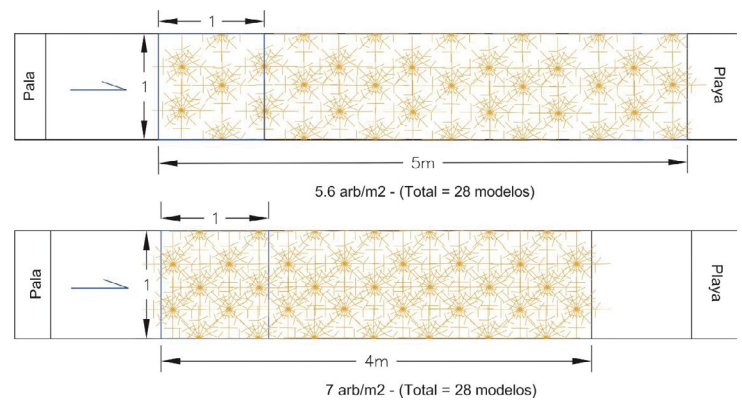


Figura 7.2.5 Distribución de modelos de mangle en el canal para una densidad de 5.6 árboles/m² y para una densidad de 7 árboles/m². (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

7.2.2.2 Características del clima marítimo

Una de las variables de mayor importancia en la dinámica morfológica de las playas es el oleaje. Cuando la ola se aproxima de una manera oblicua hacia la costa, el rompimiento de esta produce una corriente longitudinal (*longshore current*) responsable del transporte longitudinal y del balance (erosión/acreción) de sedimentos en las playas cercanas (Ashton & Murray, 2006). La alta energía producida en la disipación por rompimiento de la ola y la formación de las corrientes longitudinales se encargan de causar inestabilidades en la forma de la costa que se ven reflejadas en procesos de acreción y erosión a lo largo del litoral (Ashton, Murray, & Arnoult, 2001). Por tal motivo, la selección adecuada de los escenarios de modelación es de gran importancia para comprender mejor el papel que cumple el manglar como estructura atenuadora del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia.

Para las diferentes modelaciones se usó la información reportada por Osorio, Montoya, Ortiz, & Peláez (2016), en la cual generaron series de oleaje sintético durante condiciones medias y extremas para todo el litoral del Caribe colombiano, usando técnicas y herramientas estadísticas para validar los datos modelados mediante el modelo SWAN. Cada una de las series construidas son de libre acceso y pueden ser consultadas en: minas.medellin.unal.edu.co/gruposdeinvestigacion/oceanicos/virtualbuoys. De las series construidas por Osorio et al. (2016), se seleccionaron las boyas sintéticas más cercanas al sitio de estudio, cuya localización se presenta en la figura 7.2.6.

En general todas las boyas seleccionadas presentan un comportamiento similar a lo largo del periodo de registro que se extiende entre enero 1 de 1979 y diciembre 31 de 2011 (Figura 7.2.7), con variaciones en la altura de ola significativa entre 0.5 y 2.3 m, mientras que el periodo pico oscila entre 5.8 y 7.5 segundos. Dada la similitud entre los datos de cada boya, se decidió usar los registros de la boya 2 para el presente estudio ya que es la más próxima a la zona de estudio.

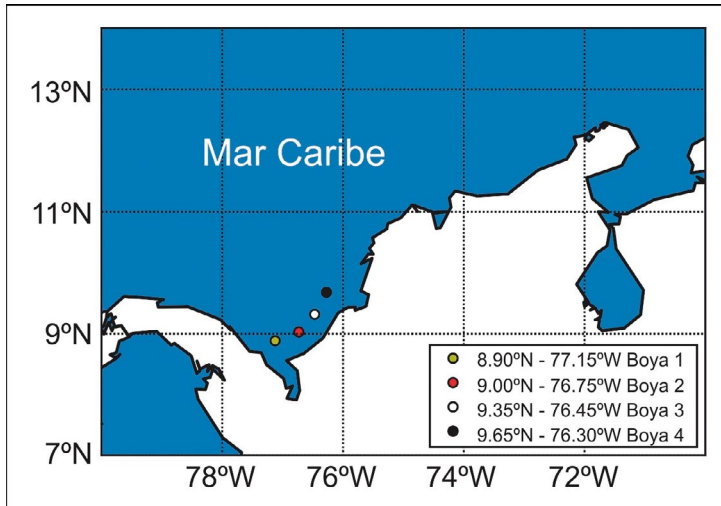


Figura 7.2.6 Boyas sintéticas seleccionadas para extraer el clima marítimo de la región de estudio. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

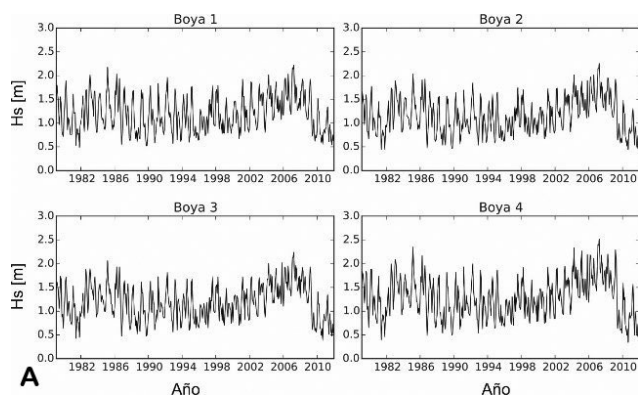
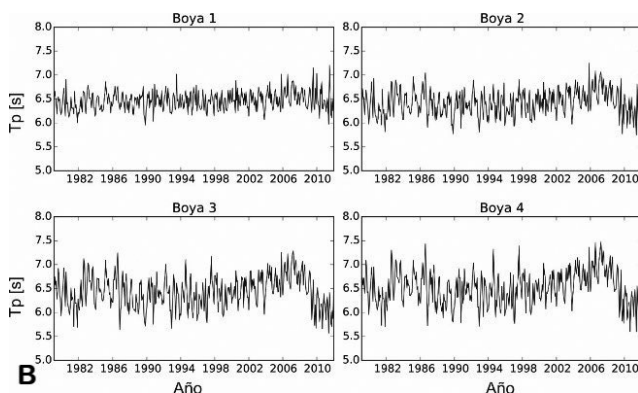


Figura 7.2.7 Variación interanual de la altura de ola significativa, Hs (A) y periodo pico, Tp (B) de las boyas sintéticas cercanas al sitio de estudio. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).



Para determinar la escala y los casos de oleaje usados en las modelaciones físicas se consideraron factores como las características físicas del canal de olas y los casos probables de ocurrencia de altura de ola y periodo pico incidentes en la región. En primer lugar, la pala encargada de generar las ondas dentro del canal de olas solo puede reproducir oleaje lineal de Stokes de 2do orden. Una forma de cuantificar la no linealidad del oleaje es por medio del número del Ursell (Ur) que combina la pendiente de la ola y la profundidad relativa del agua (Holthuijsen, 2007). Adicionalmente, el oleaje simulado está condicionado por la rotura que puede presentarse por el efecto del fondo ($H < 0.6h$) o por la pendiente de la ola ($H < L/7$), siendo L la longitud

de onda, H la altura de ola y h la profundidad de agua en el canal. En la tabla 7.2.2 se presentan todos los criterios que debe cumplir un caso particular que se desee simular correctamente en el canal de oleaje.

Criterio	Antioqueño
Linealidad: Número de Ursell	$Ur < 26$; $Ur = HL^2/h^3$; $H < 26h^3/L^2$
Linealidad: Stokes 2do orden	$H/gT^2 < 0.01$; $H < 0.1T^2$
Rompimiento por fondo	$H < 0.6h$
Rompimiento por pendiente	$H < 0.14L$

Tabla 7.2.2 Criterios que deben cumplir los casos de oleaje simulados. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Adicionalmente a estas características que debe cumplir el oleaje, para la selección de los diferentes escenarios de modelación se calculó la probabilidad conjunta entre la altura de ola significativa (H_s) y el periodo pico (T_p) de los datos reportados por Osorio et al. (2016). Los resultados se presentan en la figura 7.2.8.

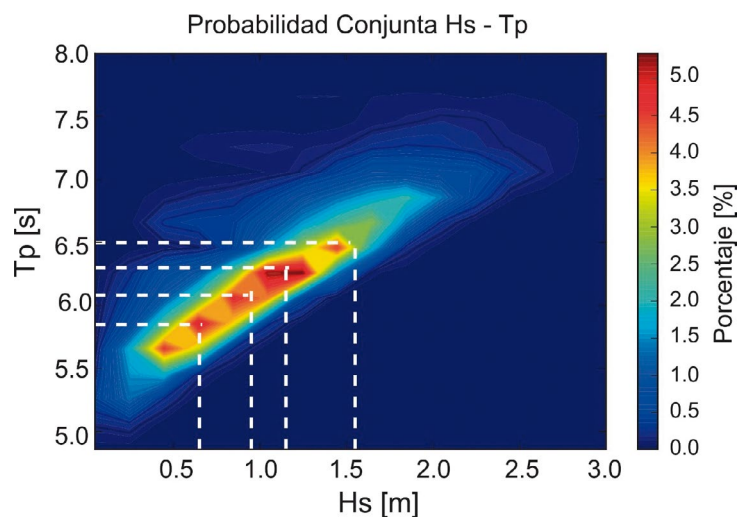


Figura 7.2.8 Probabilidad conjunta entre la altura de ola significativa (H_s) y el periodo pico (T_p). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

En la figura 7.2.8 se observan las combinaciones de H_s y T_p con mayor probabilidad de ocurrencia (color rojo) y que fueron simulados ya que son los escenarios más probables en los que se encuentra sometido el manglar de la región.

Con la información que se obtiene al combinar los criterios de linealidad y de probabilidad conjunta se diseñó el modelo físico y se realizó el escalamiento completo del prototipo usando una escala 1/10. Para representar adecuadamente la interacción del oleaje con el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo se usó el número de Froude (F) para escalar el modelo, garantizando así semejanza geométrica y cinemática entre el modelo y el prototipo. Este es un número adimensional que expresa la influencia relativa entre las fuerzas inerciales y las gravitacionales en

un flujo a superficie libre (Hughes, 1993) y se expresa por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * L}}$$

Donde V es la velocidad media, g es la aceleración de la gravedad y L es una longitud característica. Dado que se requiere que las relaciones entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales sean las mismas en el prototipo y modelo, se obtuvo la relación:

$$\frac{V_p}{\sqrt{g_p * L_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m * L_m}}$$

Como el modelo y el prototipo operan en el mismo campo gravitacional, la expresión queda dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}}$$

Por otro lado, se puede tener una relación de velocidades entre el prototipo y el modelo del tipo:

$$\frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p}{t_p} * \frac{t_m}{L_m}$$

Igualando las dos ecuaciones anteriores y despejando t_m se obtiene la escala para el periodo del modelo en función de la escala geométrica:

$$t_m = \frac{t_p}{\sqrt{\frac{L_p}{L_m}}}$$

Para la escala geométrica se consideró un balance entre los rangos de operación de la pala del canal de oleaje y la facilidad en la construcción del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo. Para esto, se realizaron diferentes pruebas de escalamiento variando la escala geométrica las cuales permitieron identificar que la escala 1:10 presenta las mejores condiciones para realizar el proyecto. Con base en esto se calculó la altura de ola en el modelo usando la relación de escalas como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{H_m}{H_p} = \frac{1}{10} \quad H_m = \frac{1}{10} * H_p$$

Los resultados obtenidos del escalamiento se presentan en la tabla 7.2.3.

Caso	Prototipo (probabilidad conjunta)		Modelo (m)	
	Altura de ola, Hs [m]	Periodo pico, Tp [s]	Altura de ola, Hs [m]	Periodo pico, Tp [s]
1	0.7	5.8	0.07	1.8
2	1.0	6.2	0.10	2.0
3	1.3	6.4	0.13	2.0
4	1.6	6.6	0.16	2.2

Tabla 7.2.3 Casos seleccionados para prototipo y modelo. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Los casos de oleaje seleccionados para la modelación física fueron evaluados para tres profundidades de sumergencia (hr) que corresponde a la profundidad a la que se encuentran sumergidas las raíces del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo. Las profundidades seleccionadas son de 1.4 m, 1.8 m y 2.2 m que corresponden en el modelo físico (escala 1:10) a profundidades de 0.14 m, 0.18 m y 0.22 m respectivamente. Con la selección de estas profundidades se buscó simular condiciones medias y extremas a las que se puede encontrar un bosque de mangle rojo, logrando obtener un amplio rango de resultados para diferentes condiciones hidrodinámica.

7.2.2.3 Estructuras artificiales

Además de usar el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo como estructura disipadora de la energía del oleaje, también se usaron dos estructuras artificiales para evaluar y para comparar el efecto en la disipación y la atenuación de la altura de la onda ya que en lo que se refiere a la protección costera, en los últimos años se han implementado técnicas utilizando rompeolas con geometrías variables para mejorar la eficiencia de la disipación del oleaje bajo amplios rangos de parámetros escalados como la frecuencia, la altura de ola y la profundidad relativa. Una alternativa eficiente para la modificación de la energía del oleaje son las estructuras sumergidas. Generalmente son construidas paralelamente a la costa buscando reducir la energía incidente sobre la playa, lo que induce su protección o su regeneración. Comúnmente, estas estructuras se diseñan para reducir cierto grado de transmisión de la energía del oleaje causando la rotura del mismo en aguas someras (Gyssels, Pagot and Hillman, 2013).

Para la construcción de las estructuras se garantizó que en todo instante estas se encontraran sumergidas, incluso en los casos donde se produce rotura del oleaje. Para determinar la longitud total de la estructura se tuvo en cuenta que esta dimensión no fuera inferior a L/3, para que la onda propagada lograra interactuar lo suficiente con la es-

estructura. Por esta razón y considerando los casos de propagación definidos anteriormente, se definió la longitud total de las estructuras de 2.5 m. Las estructuras fueron construidas con madera de formaleta de 1.5 cm de espesor resistente a la humedad. Se construyó una estructura cóncava y una convexa con el objetivo de evaluar su influencia sobre el oleaje incidente. Para la parte frontal de la estructura cóncava se usó una malla de zarandeo de 0.90 cm y fibra de vidrio con el fin de impedir el flujo por la impermeabilización de la estructura como se muestra en la figura 7.2.9.

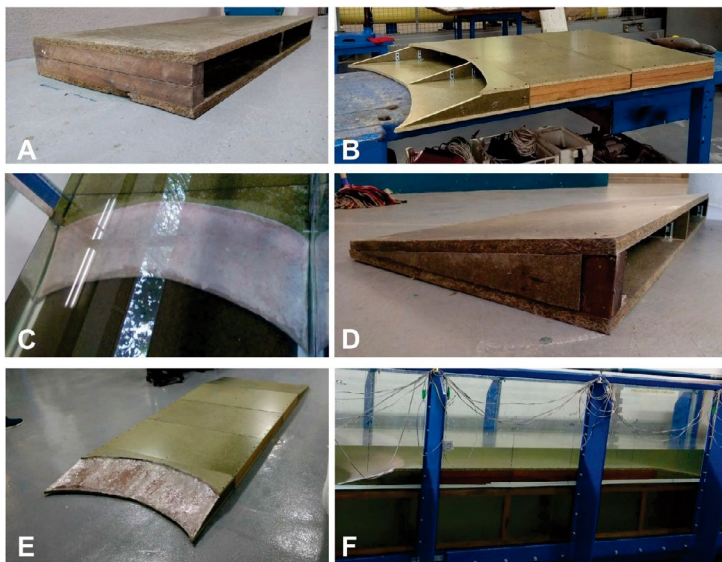


Figura 7.2.9 Proceso constructivo de la estructura cóncava: A) Módulos rectangulares del cuerpo de la estructura; B) Esqueleto de pendiente frontal; C) Estructura cóncava; D) Esqueleto de la pendiente final de la estructura; E) Estructura cóncava finalizada; F) Estructura cóncava instalada en el canal. (Fuente: Elaboración propia—Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Para la parte frontal de la estructura convexa se utilizó madera de formaleta impermeabilizada con plastilina como se presenta en la figura 7.2.10 Este cambio en el proceso constructivo para la estructura convexa se debió a la facilidad en la construcción ya que no se podía garantizar la curvatura correcta usando la malla de zarandeo y la fibra de vidrio.

7.2.2.4 Técnicas de medición en el laboratorio

Para medir la superficie libre del agua en cualquier instante dentro del canal, se instalaron ocho sensores resistivos los cuales funcionan según el principio de la corriente que fluye sobre un par de alambres de acero inoxidable paralelos de 0.6 m de largo. Un amplificador (que suministra voltaje a los medidores) permite el registro de pequeños cambios de voltaje en un rango de 0 a 10 V y luego se convierten en series de tiempo digitales mediante un convertidor analógico digital. Para obtener más información de las características del sensor, el manual de usuario del sistema de medición de onda de HR Wallingford (2018) ofrece una descripción detallada.

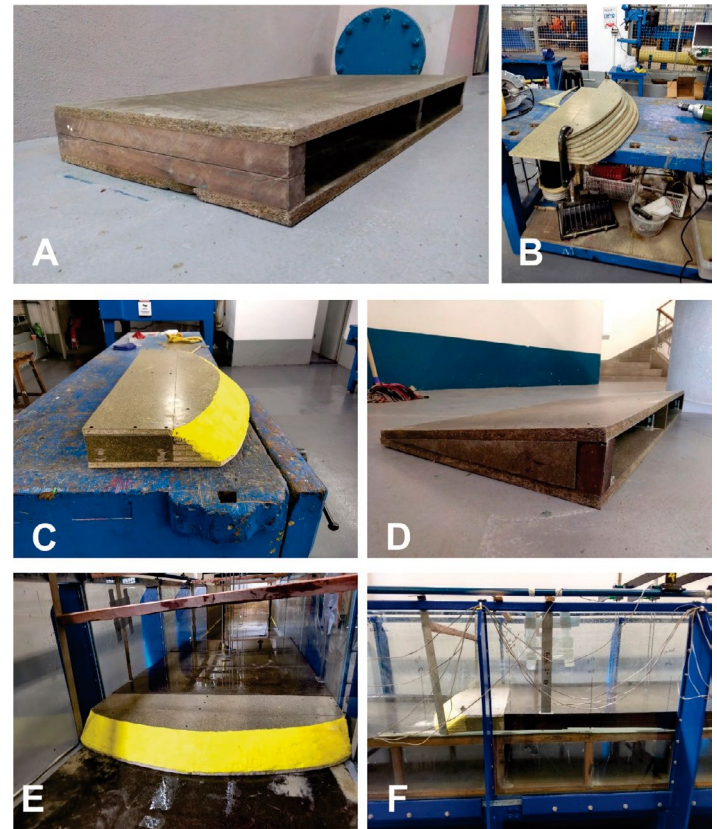


Figura 7.2.10 Proceso constructivo de la estructura convexa: A) Módulos rectangulares del cuerpo de la estructura; B) Esqueleto de pendiente frontal; C) Estructura cóncava; D) Esqueleto de la pendiente final de la estructura; E) Estructura convexa finalizada; F) Estructura convexa instalada en el canal. (Fuente: Elaboración propia—Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Los sensores fueron calibrados diariamente para cada una de las modelaciones. Cada caso ejecutado tiene un tiempo de duración total de 1000 segundos. Durante este tiempo los sensores resistivos están programados para adquirir 100 datos por segundo. Debido a que se parte de un estado de reposo, los primeros 400 segundos presentan un comportamiento heterogéneo en las características de las ondas ya que el sistema se está estabilizando, razón por la cual se decidió cortar la serie y eliminar los primeros 400 segundos de medición y quedarse con los 600 segundos restantes, garantizando una gran cantidad de ondas homogéneas y continuas para el análisis de la disipación de la energía y la atenuación de la altura de ola.

Por su parte, las velocidades dentro del canal de olas fueron medidas usando un Velocímetro Doppler Acústico (ADV). Este equipo transmite ligeros pulsos de sonido por medio de un transductor de transmisión, escucha su eco empleando cuatro sensores ubicados alrededor del transmisor (transductores de recepción) y finalmente mide el cambio de frecuencia del sonido que retorna. Para cada punto se midió la velocidad en los tres ejes (x, y, z) durante 10 minutos. El equipo fue programado para medir con una frecuencia de 50 datos por segundo, obteniendo en total 30000 datos por punto del perfil vertical de velocidades, logrando asegurar una cantidad de mediciones suficientes para realizar un análisis robusto y estadísticamente representativo. Se midieron perfiles de velocidad antes (Perfil 1) y dentro del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo (Perfil 2 y Perfil 3). La ubicación de estos perfiles y de los sensores resistivos se muestra en la figura 7.2.11. La pri-

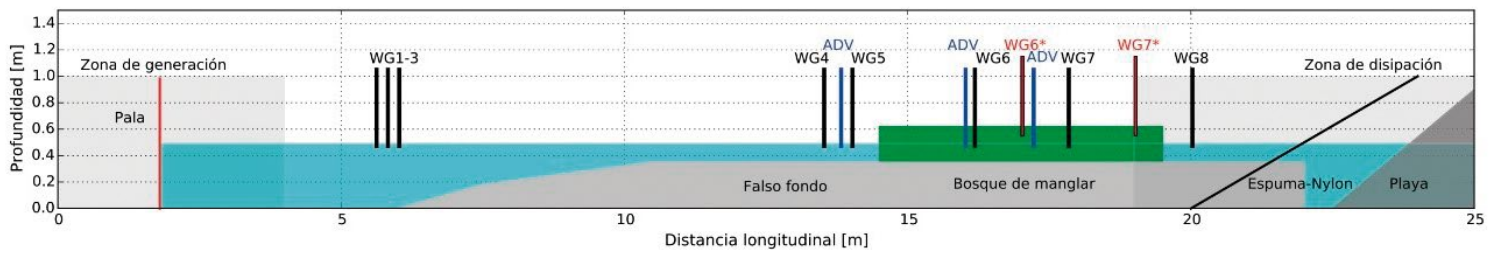


Figura 7.2.11 Distribución de los sensores resistivos (WG) y del ADV a lo largo del canal. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

mera línea azul de izquierda a derecha corresponde al Perfil 1, la segunda línea al Perfil 2 y la tercera línea al Perfil 3.

Para las series de datos medidas se calcularon estadísticos como altura de ola significativa (H_s), altura media (H_m) y la altura media cuadrática (H_{rms}). La altura de ola significativa se define como la media aritmética del tercio de olas de mayor altura del registro. Su cálculo se presenta en la siguiente ecuación, donde H_i es la serie de altura de olas individuales del registro ordenada de mayor a menor y N es el número total de olas individuales del registro.

$$H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^{N/3} H_i$$

Por su parte, la altura media hace referencia a la media aritmética de todas las olas registradas H_i . Se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$

Por último, la altura media cuadrática se define como la raíz de la media aritmética de la altura de ola al cuadrado, su cálculo está dado por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2}$$

Para obtener los valores de H_i se implementó el método de los pasos ascendentes por cero, el cual busca los pasos por cero en el registro de superficie libre para delimitar una ola. El tiempo que hay entre dos pasos ascendentes consecutivos es el periodo de la ola (T), mientras que la altura (H_i) se determina como la diferencia del valor máximo y mínimo encontrado dentro del periodo (Hughes, 1993).

También se realizó el cálculo de la energía del oleaje en cada uno de los sensores resistivos. Esta ecuación corresponde a la suma de la energía cinética y la energía potencial y viene dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{8} \rho g (H_{rms})^2$$

Dónde $g=9.8 \text{ m/s}^2$ y $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$.

Con el valor de altura de ola media cuadrática H_{rms} se estimó la energía en cada una de las posiciones de los sensores resistivos. En función de la energía calculada se determinó el porcentaje de disipación de energía acumulada entre el sensor WG5 y WG8 de la siguiente manera:

$$\% \text{ Disipación} = \frac{E_{WG5} - E_{WG8}}{E_{WG5}} * 100$$

Es importante resaltar que en las mediciones de altura de ola realizadas para la segunda densidad de árboles dentro del canal (7.0 arb/m^2) se movieron dos sensores que se encontraban al inicio del falso fondo (WG2 y WG3) y se dispusieron dentro del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo. Este procedimiento se realizó ya que al calcular el coeficiente de reflexión de la estructura (falso fondo) se concluyó que este parámetro se encontraba en límites aceptables de acuerdo a la literatura, por lo que la utilización de estos sensores sería más beneficiosa al discretizar mejor el campo donde se encuentra el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo y de la estructura artificial. Estos sensores se presentan en las siguientes figuras como WG6* y WG7*.

7.2.3 Resultados y análisis

Los resultados obtenidos se dividen en la evolución de la ola desde el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo y la evolución de la ola a través de las estructuras artificiales (cóncava y convexa).

7.2.3.1 Evolución de la ola a través de un modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo

Para todos los casos evaluados se observa en general un decaimiento inicial de la altura de ola producto del rompi-

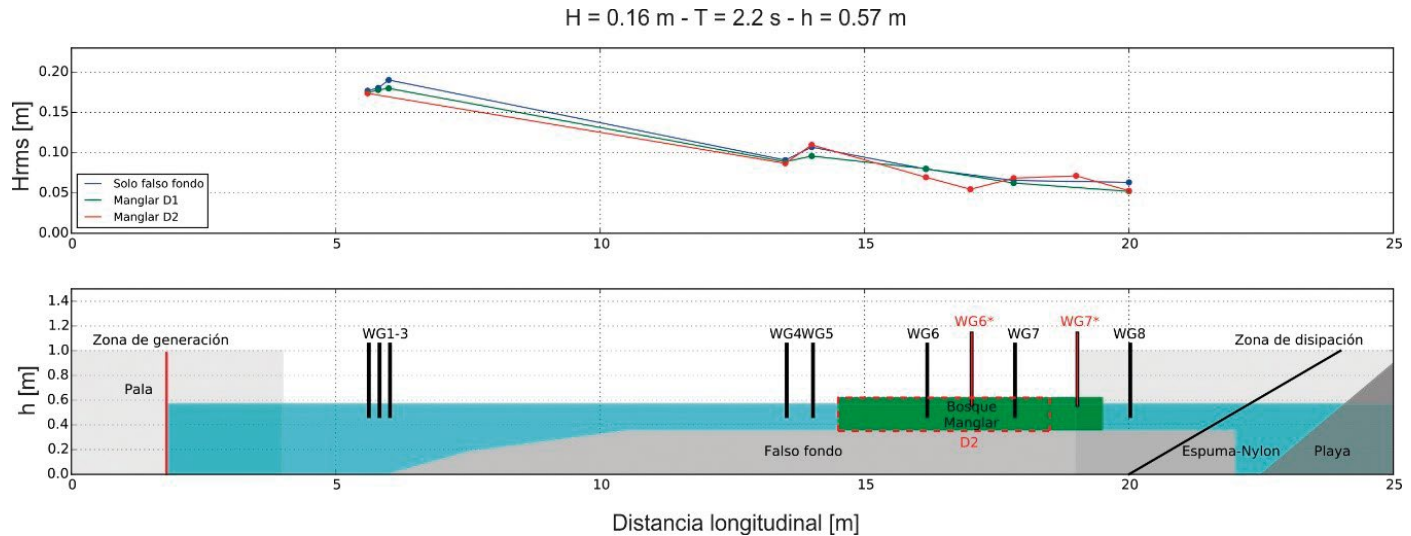


Figura 7.2.12 Evolución general de la altura de la ola media cuadrática (H_{rms}) a lo largo del canal de olas asociado a $H=0.16$ m, $T=2.2$ s y $h=0.57$ m ($hr=0.22$). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

miento de la onda generada al interactuar con la pendiente del falso fondo donde se localiza el manglar y que tiene una altura de 0.35 m como se observa en la figura 7.2.12.

Cuando la ola se acerca al modelo paramétrico de los árboles de mangle, se observó una pequeña sobreelevación de la ola registrada en el sensor WG5, producto de un asomeramiento inducido por el modelo paramétrico como se evidencia en la figura 7.2.12. Las alturas registradas en este punto se tomaron como las alturas de ola incidentes al modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo. En el momento en el cual la ola interactúa con el modelo, se observó una atenuación del oleaje incidente que es producido por la interacción entre la onda, el manglar y en menor proporción el fondo de la estructura.

Durante los experimentos se evidenció además que la ola cuando entra al modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo pierde velocidad y su cresta se amplía. Cuando la ola sale del modelo comienza a acelerarse, pero la altura ha disminuido con respecto al inicio del manglar. Los cálculos de energía disipada corresponden a la disipación acumulada de la energía entre el sensor WG5 y el sensor WG8 que se localiza a 0.5 m medidos a la salida del manglar. Este comportamiento general puede observarse en la figura 7.2.12 que corresponde al caso con $H=0.16$ m, $T=2.2$ s y $h=0.57$ m.

7.2.3.2 Influencia del incremento de la densidad en el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo en la atenuación del oleaje

Uno de los parámetros evaluados de mayor importancia fue la densidad del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo. Como se describió anteriormente se evaluaron dos densidades. La primera densidad, “Manglar D1”, corresponde a 5.6 árboles/ m^2 para una longitud total de 5 m, mientras que la segunda densidad evaluada “Manglar D2”, fue de 7 árboles/ m^2 para una longitud total de 4 m. Los resultados obtenidos se presentan en porcentaje de

energía disipada por metro cuadrado como se muestra en la figura 7.2.13.

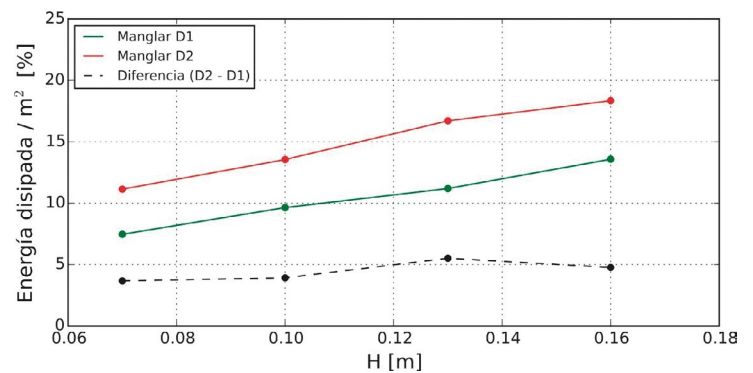


Figura 7.2.13 Influencia de la densidad del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo en la disipación de la energía para las alturas de ola de 0.07 m, 0.10 m, 0.13 m, y 0.16 m, para un periodo de 1.8 s, 2.0 s, 2.0 s y 2.2 s respectivamente y evaluada a una profundidad del manglar hr de 0.18 m. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Como se observa en la figura 7.2.13 en promedio el aumento de la densidad en el modelo paramétrico ayudó a reducir la energía del oleaje en un 5% por metro cuadrado. No obstante, estas diferencias pueden ser mayores si la longitud del modelo en ambos casos fuera mayor. Por esta razón, se recomienda para futuros trabajos extender el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo.

7.2.3.3 Influencia de la altura de ola propagada en la atenuación de oleaje para la modelación con el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo

Según las mediciones realizadas se observó que al aumentar la altura de ola se presenta una mayor disipación de la energía para ambas densidades del modelo paramétrico evaluadas como se presenta en la figura 7.2.14 Sin embargo, para las mayores alturas de ola ($H=0.13$ y 0.16 m) se generó rompimiento, por lo que parte de la disipación de

la energía se debe a la rotura de la ola.

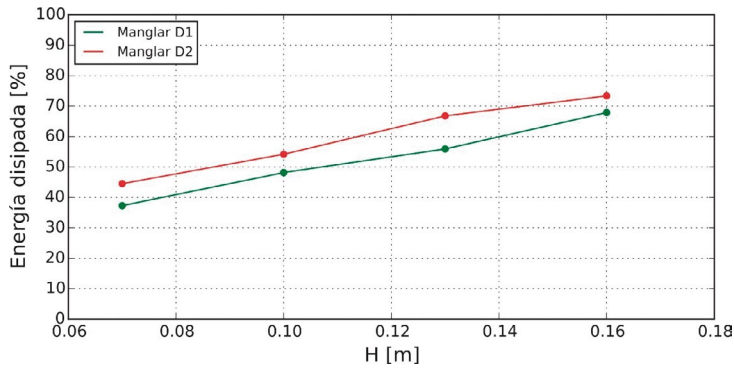


Figura 7.2.14 Cambios en la energía disipada en función de la altura de ola para alturas de 0.07 m, 0.10 m, 0.13 m, y 0.16 m, para un periodo de 1.8 s, 2.0 s, 2.0 s y 2.2 s respectivamente, evaluada a una profundidad del manglar hr de 0.18 m. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Se debe tener presente que, aunque una parte importante de la energía disipada se produce por el descrestamiento de la ola, estas son condiciones normales a las que se encuentra sometido un bosque de mangle en la costa. Además, se debe resaltar el papel que cumple el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo como estructura disipadora de energía, pues en los casos donde no se presenta rotura del oleaje la disipación debida al modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo fue de 37.3 % para el Manglar D1 y del 44.5 % para el Manglar D2.

7.2.3.4 Influencia del periodo en la atenuación del oleaje para la modelación con el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo

Según las mediciones realizadas se encontró que para una misma altura de ola (0.07 m), en las mismas condiciones de sumergencia del bosque, el periodo del oleaje incidente es un parámetro clave en la atenuación de la ola, donde se encontró que para menores periodos el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo presenta alrededor de un 11% mayor disipación de la energía de la ola incidente sin importar la densidad del modelo. Estos resultados se pueden evidenciar en la tabla 7.2.4, el signo negativo en algunos valores indica ganancia de energía.

H = 0.07				H = 0.07			
T = 1.2				T = 1.8			
Caso	Atenuación promedio [m]	Atenuación Promedio [%]	Energía disipada [%]	Caso	Atenuación promedio [m]	Atenuación Promedio [%]	Energía disipada [%]
Sin manglar	0.002	1.98	2.61	Sin manglar	0.001	-2.42	-6.39
D1	0.023	29.27	48.71	D1	0.015	21.05	37.33
D2	0.027	33.27	54.97	D2	0.020	26.35	44.55

Tabla 7.2.4 Valores promedios obtenidos para la atenuación de la altura de ola en función del periodo para la misma profundidad del agua dentro del manglar (0.18 m) y altura de ola incidente. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Los resultados encontrados son similares a los publicados por Stratigaki et al. (2011), donde encontraron que para periodos cortos se presenta una mayor disipación de la altura de ola.

7.2.3.5 Velocidades en el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo

Las velocidades dentro y fuera del modelo paramétrico fueron medidas para dos casos específicos, con el objetivo de estudiar la influencia del periodo, pues es el parámetro fundamental sobre las velocidades del flujo (Asano, Deguchi, y Kobayashi, 1991; Stratigaki et al., 2014). Los casos seleccionados se presentan en la tabla 7.2.5.

Caso	Densidad (árboles/m ²)	Ancho del bosque (m)	Altura de ola (m)	Periodo (s)	hr (m)
SM1	4,8	5	0,07	1,18	0,28
SM2	4,8	5	0,07	2	0,28

Tabla 7.2.5 Casos de propagación empleados durante las mediciones de velocidad. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

La figura 7.2.15 presenta los resultados obtenidos para la componente media de la velocidad en la dirección x-longitudinal (Uc) y z-vertical (Wc), representadas por las líneas azul y roja respectivamente. Estos valores se incrementaron cerca de la superficie, indicando la presencia de corrientes en dirección contraria a la dirección de propagación del oleaje. Cerca al lecho del canal, las velocidades fueron cercanas a cero posiblemente a causa de la fricción producida por el fondo. El perfil de velocidad de la componente transversal (Vc), representada por la línea verde, presentó valores entre 0 y 0.5 cm/s inferiores con relación a los ejes x y z y las velocidades son relativamente constantes en toda la columna de agua, como se muestra en la figura 7.2.15.

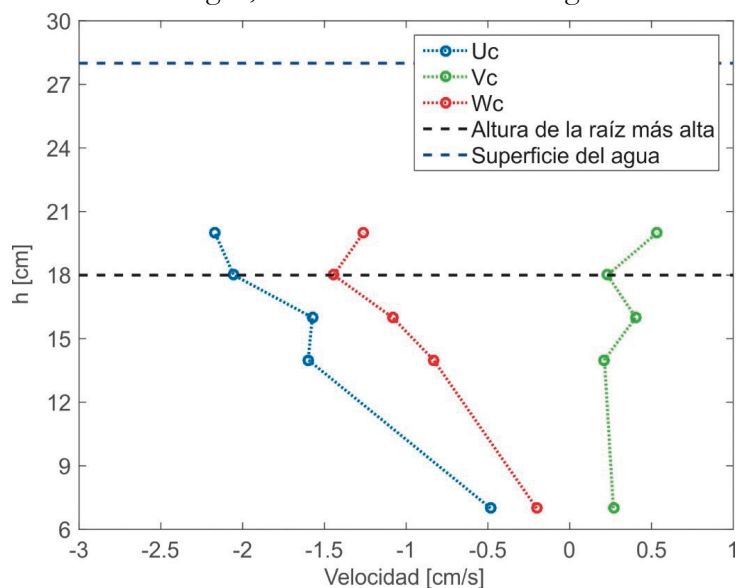


Figura 7.2.15 Perfiles de velocidad, Caso SM1 (H = 0.07 m, T = 1.18 s, h = 0.28) a 1.0 m antes del manglar (Ver figura 7.2.11 – Perfil 1). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

7.2.3.6 Influencia del periodo sobre las velocidades

Para analizar la influencia del periodo en las velocidades, se escogió el perfil ubicado a 1 m antes del modelo paramétrico (Perfil 1, ver figura 7.2.11) correspondiente al caso SM1 (línea punteada azul – Figura 7.2.16) y Caso SM2 (línea punteada roja - Figura 7.2.16). En la figura 7.2.16 se observa una mayor magnitud y variabilidad sobre el perfil correspondiente al Caso SM2 con periodo de 2 s. Para este caso, la velocidad permaneció aproximadamente constante entre las profundidades de 7 cm y 15 cm y a partir de 15 cm su magnitud se incrementa en dirección contraria a la dirección de propagación del oleaje, alcanzando una velocidad de -3 cm/s en el punto a 20 cm del lecho. Por el contrario, el perfil de velocidad para el Caso SM1 con periodo de $T=1.18$ s mostró un comportamiento más uniforme en todo el perfil y alcanzó velocidades de -2 cm/s en el punto ubicado a 20 cm. Este resultado muestra que las velocidades aumentan con periodos mayores.

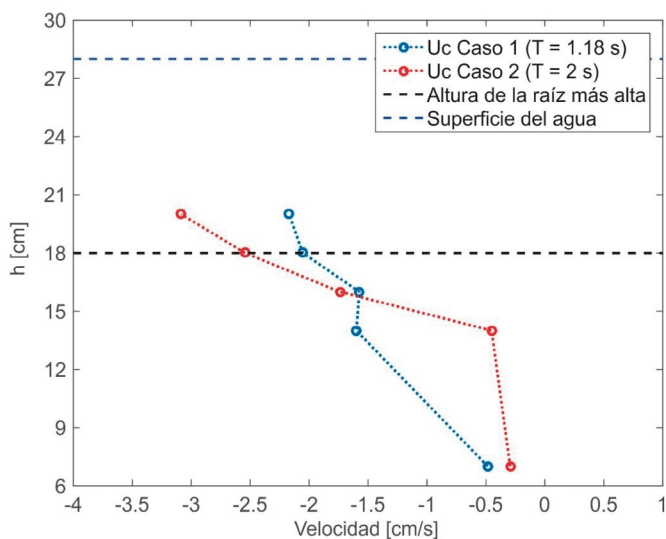


Figura 7.2.16 Perfiles de velocidad de los casos SM1 (línea punteada azul) y SM2 (línea punteada roja) con diferente periodo (Ver figura 2.69 – Perfil 1). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

7.2.3.7 Variación de las velocidades a lo largo del canal

A lo largo del canal se observó un aumento en las velocidades del flujo. Se evidenció que en el perfil 1 ubicado antes del modelo paramétrico (Figura 7.2.17 – línea azul), a una profundidad de 6 cm se presentó una disminución en las velocidades y un aumento en las mismas conforme aumenta la profundidad. Para el perfil 2 ubicado al comienzo del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo (Figura 7.2.17 – línea roja), se observó que a una profundidad de 6 cm (Ver Figura 7.2.11 – Perfil 1) las velocidades son cercanas a cero menores en comparación con los perfiles 1 y 3, conforme aumenta la profundidad las velocidades aumentan, donde el signo negativo en las velocidades indica

velocidades en dirección contraria a la dirección de propagación de la ola. Para el perfil 3 (Figura 7.2.17 – línea verde) ubicado al final del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo (Figura 7.2.11 – Perfil 3) se observó un aumento en las velocidades del flujo cerca a la profundidad de 6 cm, conforme aumenta la altura de la lámina de agua las velocidades disminuyeron aproximándose a cero, este aumento puede estar relacionado con una disminución en la sección transversal producto del bloqueo producido por los manglares.

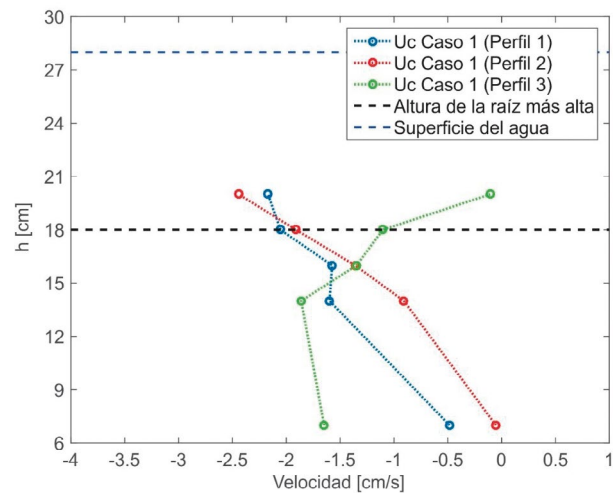


Figura 7.2.17 Variación de las velocidades a lo largo del canal, para el Caso SM1. Perfil 1 (línea punteada azul), perfil 2 (línea punteada roja), perfil 3 (línea punteada verde). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

7.2.3.8 Evolución de la ola a través de estructuras artificiales

Durante los experimentos se observó un comportamiento similar en la evolución de la altura de ola al comparar los resultados obtenidos para la estructura cóncava (estructura 1) y la estructura convexa (estructura 2). En general, se observó una atenuación inicial desde el sensor WG1 hasta el sensor WG4 (Figura 7.2.18). Esta disminución se debe a la pérdida de energía del flujo por el contacto con el falso fondo sobre el cual reposan las estructuras artificiales. Para las olas superiores a 0.1 m se observó que la atenuación es mucho mayor, ya que además de la fricción con el fondo se produce una rotura de las ondas ocasionando gran pérdida de energía. Entre el sensor WG4 y WG5 se acentúa la atenuación debido a que después de la rotura inducida por el falso fondo la ola se desplaza presentando un descrestamiento. Este comportamiento difiere en los casos donde la altura de ola es de 0.16 m y profundidades superiores a 0.57 m (Figura 7.2.19 sensores WG4 y WG5) debido a que en estos casos la ola después de romper sobre la pendiente del falso fondo logra homogenizarse y aproximarse a la estructura sin presentarse descrestamiento.

Las alturas registradas por el sensor WG5 se tomaron como las alturas de ola incidentes a la estructura artificial. Después del sensor WG5 se observó un decaimiento en la altura de ola hasta el sensor WG8. Esta atenuación se debe principalmente a que la ola al sentir la estructura artificial

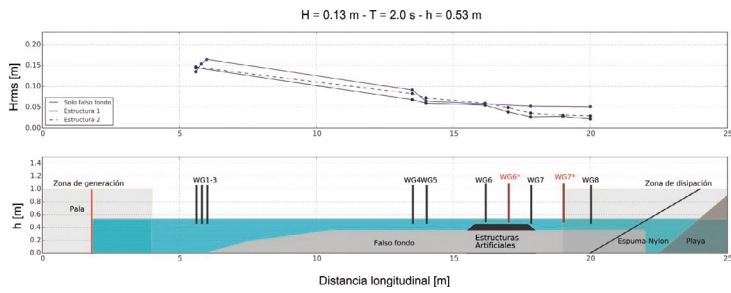


Figura 7.2.18 Evolución de la altura de ola a lo largo del canal para el Caso $H=0.13$ m, $T= 2.0$ s y $h = 0.53$ m, considerando la condición con y sin estructura (solo falso fondo). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

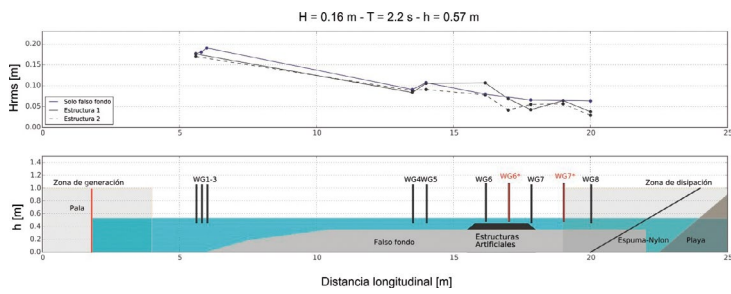


Figura 7.2.19 Evolución de la altura de ola a lo largo del canal para el Caso $H=0.16$ m, $T= 2.2$ s y $h = 0.57$ m, considerando la condición con y sin estructura (solo falso fondo). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

comienza a transformarse hasta romper sobre la estructura y disipar gran cantidad de energía.

7.2.3.9 Influencia de la altura de ola propagada en la atenuación del oleaje para la modelación con las estructuras artificiales

Según las mediciones realizadas para las dos estructuras artificiales, se encontró que en general a medida que aumenta la altura de la ola, la atenuación de la ola incidente es mayor, lo que representa un aumento en la disipación de la energía como puede observarse en la figura 7.2.20, es decir, el obstáculo ocasionó una transformación de la onda que conllevó a una fuerte rotura que se ve reflejada en una alta disipación de la energía.

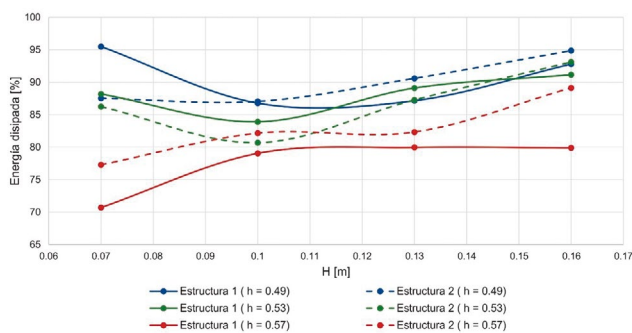


Figura 7.2.20 Cambios en la energía disipada en función de la altura de ola considerando la estructura artificial 1 (cóncava) y estructura artificial 2 (convexa). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Estos resultados son acordes con lo esperado, ya que para alturas de olas mayores ocurre una mayor transformación del oleaje debido a la interacción entre la ola y el fondo, mientras que para alturas de olas de menor tamaño esa interacción se disminuye e incluso en algunos casos la ola puede pasar por encima de las estructuras artificiales sin interactuar con el fondo ni transformarse.

Es importante resaltar que, para todo el rango de alturas de olas evaluadas, las estructuras presentaron un buen comportamiento en relación a la disipación de la energía disipada del oleaje, ya que en el peor de los escenarios (estructura 1, $H=0.07$ m y $h=0.57$ m) la disipación es del 71% aproximadamente como se observa en la figura 7.2.20.

7.2.3.10 Influencia del período en la atenuación del oleaje para las modelaciones con las estructuras artificiales

Las modelaciones efectuadas permitieron identificar que para una misma altura de ola ($H = 0.07$ m) entre mayor sea el período menor es la disipación de la energía del oleaje por parte de las estructuras artificiales como se puede observar en la tabla 7.2.6 donde se compilan los resultados obtenidos. No obstante, se debe resaltar que este comportamiento no ocurrió para el mayor calado sobre las estructuras ($h_e=0.22$ m) donde la mayor disipación se presenta para los períodos mayores.

Para los calados más bajos sobre las estructuras (h_e), se presentó la mayor disipación producto de la transformación que sufre la onda propagada al interactuar con el falso fondo y la superficie superior de la estructura artificial. A medida que aumenta el calado, la disipación disminuyó ya que la onda siente menos contacto con el fondo por lo que su transformación es menor como se evidencia en la figura 7.2.21.

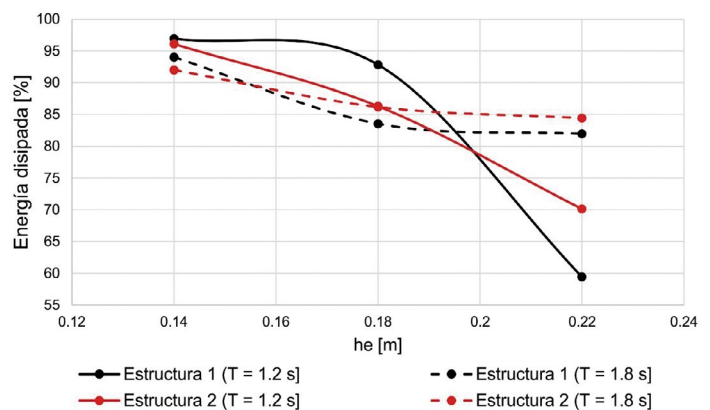


Figura 7.2.21 Cambios en la energía disipada en función del período de ola y la profundidad considerando la estructura artificial 1 (cóncava) y estructura artificial 2 (convexa). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Es importante resaltar que para todos los casos evaluados la disipación obtenida al utilizar ambas estructuras artificiales como mecanismo de protección costera es alta,

H [m]	T [s]	Disipación energía Estructura 1			Disipación energía Estructura 2		
		he = 0.14 m	he = 0.18 m	he = 0.22 m	he = 0.14 m	he = 0.18 m	he = 0.22 m
0.07	1.2	96.95	92.83	59.44	96.09	86.30	70.13
0.07	1.8	94.03	83.54	81.95	92.00	86.17	84.42
0.10	2.0	86.78	83.90	79.05	87.04	83.90	82.17
0.13	2.0	87.15	89.11	79.96	90.59	89.11	82.33
0.16	2.2	92.79	91.16	79.90	94.87	91.16	89.13

Tabla 7.2.6 Disipación de la energía del oleaje en función del periodo para la misma profundidad y altura de ola incidente para diferentes calados (he) sobre las estructuras artificiales. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

por lo cual estas presentan comportamiento adecuado para la protección costera. En la figura 7.2.22 se comparan dos casos modelados, ambos con una altura de ola 0.07 m y una profundidad del agua sobre la estructura de 0.14 m, pero con diferentes periodos, el primero con 1.2 s y el segundo con 1.8 s para las dos estructuras artificiales, cóncava (estructura 1) y convexa (estructura 2).

Como se observa en la figura 7.2.22, las dos estructuras artificiales presentan un comportamiento similar con respecto a la atenuación de la altura de la ola, donde los valores de las alturas de ola transmitidas son similares.

7.2.3.11 Influencia de la profundidad en la atenuación del oleaje para la modelación con las estructuras artificiales

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados obtenidos en la modelación indican que entre menor sea la profundidad del flujo, mayor es la disipación de la energía por parte de las estructuras artificiales como se evidencia en la figura 7.2.22.

Este comportamiento se produce, ya que para los calados sobre las estructuras (he) más bajos, la ola sufre una mayor transformación por la presencia del fondo ocasionando una mayor disipación de la energía, mientras que, para profundidades mayores, la interacción de la onda con la estructura es menor lo que disminuye la disipación de la energía. Los resultados que soportan este análisis son presentados en la tabla 7.2.6.

7.2.3.12 Comparación entre la energía disipada por el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo y las dos estructuras artificiales (cóncava y convexa)

Para todos los casos modelados se encontró que las dos estructuras artificiales presentaron un rendimiento mayor con respecto a la atenuación y la disipación de la energía del oleaje para todos los casos evaluados. Se encontró que

las diferencias disminuyeron a medida que se aumenta el calado y la altura de ola, tanto en el manglar como en la estructura artificial, tal como se observa en la siguiente tabla.

Estas diferencias anteriormente descritas también pueden observarse en la figura 7.2.23 donde se presenta el perfil de la evolución de la altura de ola para las estructuras artificiales y el modelo paramétrico (considerando las dos densidades diferentes). Se observa que los niveles registrados en el sensor WG5 en general son muy iguales, pero los registros del sensor WG8 presentan una mayor diferencia cuando el nivel del agua es de 0,49 m que cuando el calado es de 0,57 m.

También se encontró que para mayores alturas de ola las diferencias en porcentaje de disipación de la energía disminuyen como se muestra en la tabla 7.2.7. Así mismo, se encontró que no hay diferencias significativas entre las dos estructuras artificiales con relación a la disipación de la energía del oleaje.

De acuerdo a los resultados medidos, las estructuras artificiales evaluadas presentaron una mayor eficiencia en términos de disipación de energía del oleaje. Sin embargo, se debe resaltar que los valores obtenidos de disipación de la energía del oleaje para el modelo paramétrico para las dos densidades evaluadas son significativos. Además del trabajo en términos de protección de la línea de costa que brinda el manglar, se le debe sumar el servicio ecosistémico que genera, otorgando a la población costera posibilidades de sustento económico derivados de la pesca, ecoturismo, retención de CO₂, entre muchos otros. Para futuros trabajos se podría evaluar la acción conjunta que brindaría la estructura artificial y la estructura natural (manglar) como mecanismos de protección costera.

7.2.4 Conclusiones

Para lograr caracterizar el rendimiento o eficiencia que tiene el mangle o cualquier estructura de protección costera mediante modelación física, es de suma importancia que el modelo logre representar adecuadamente tanto las condiciones hidrodinámicas a las que se encuentra expuesto el modelo paramétrico, como las condiciones morfo métricas reales del manglar.

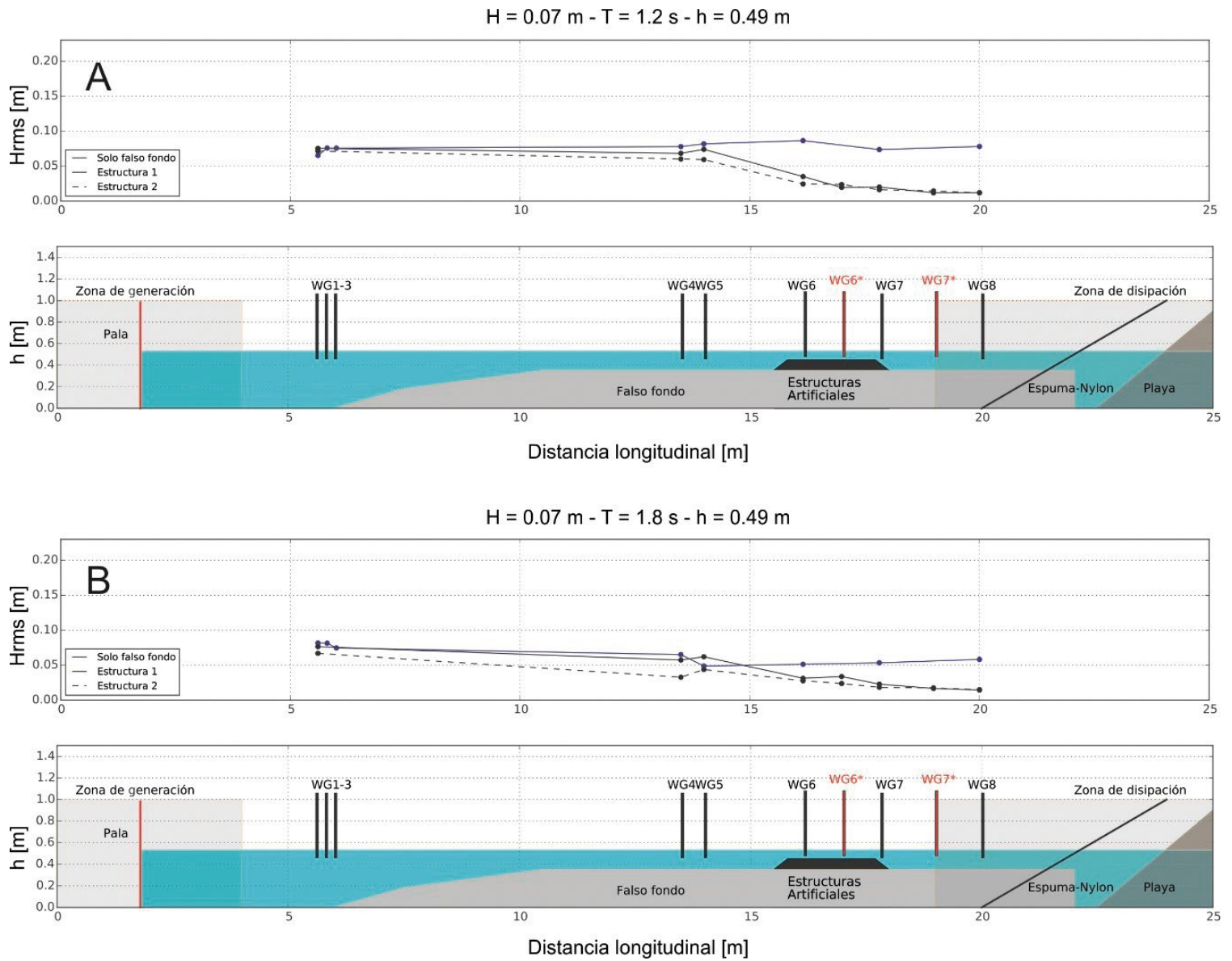


Figura 7.2.22 Atenuación de la altura de ola en función del periodo para la misma profundidad y altura de ola incidente para ambas estructuras artificiales. A) $H = 0.07 \text{ m}$; $T = 1.2 \text{ s}$; $h = 0.49 \text{ m}$. B) $H = 0.07 \text{ m}$; $T = 1.8 \text{ s}$; $h = 0.49 \text{ m}$. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

Los resultados encontrados permiten concluir que la densidad del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo (que para este caso se representó por medio de aumentar el número de árboles artificiales por metro cuadrado) puede jugar un papel importante en la disipación de la energía, donde un aumento del 20% de árboles por metro cuadrado puede propiciar una reducción de la energía del oleaje en un 5% por metro cuadrado. No obstante, estas di-

ferencias pueden ser mayores si la longitud del modelo paramétrico de mangle rojo en los casos evaluados es mayor.

Asimismo, se encontró que al aumentar la altura de ola se presenta una mayor disipación de la energía para ambas densidades evaluadas para el modelo paramétrico de mangle rojo.

Debe resaltarse que para las olas de mayor altura se

H [m]	T [s]	Manglar- D1			Manglar- D2			Estructura 1			Estructura 2		
		hr=0.1 4 [m]	hr=0.1 8 [m]	hr=0.22 22 [m]	hr=0.1 4 [m]	hr=0.1 8 [m]	hr=0.22 22 [m]	he=0.1 4 [m]	he=0.18 [m]	he=0.22 [m]	he=0.14 [m]	he=0.18 [m]	he=0.22 [m]
0.07	1.2	69.10	45.08	31.96	64.24	59.16	41.50	96.95	92.83	59.44	96.09	86.30	70.13
0.07	1.8	48.62	26.46	36.93	62.29	22.58	48.78	94.03	83.54	81.95	92.00	86.17	84.42
0.10	2.0	32.59	39.25	72.73	62.21	40.38	60.04	86.78	83.90	79.05	87.04	83.90	82.17
0.13	2.0	43.99	51.52	72.34	63.92	62.18	74.31	87.15	89.11	79.96	90.59	89.11	82.33
0.16	2.2	60.90	72.30	70.49	74.28	69.03	76.84	92.79	91.16	79.90	94.87	91.16	89.13

Tabla 7.2.7 Valores obtenidos para la disipación de la energía del oleaje en porcentaje para los diferentes casos modelados para los calados evaluados (he) sobre la estructura artificial y las profundidades sobre el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo (hr). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

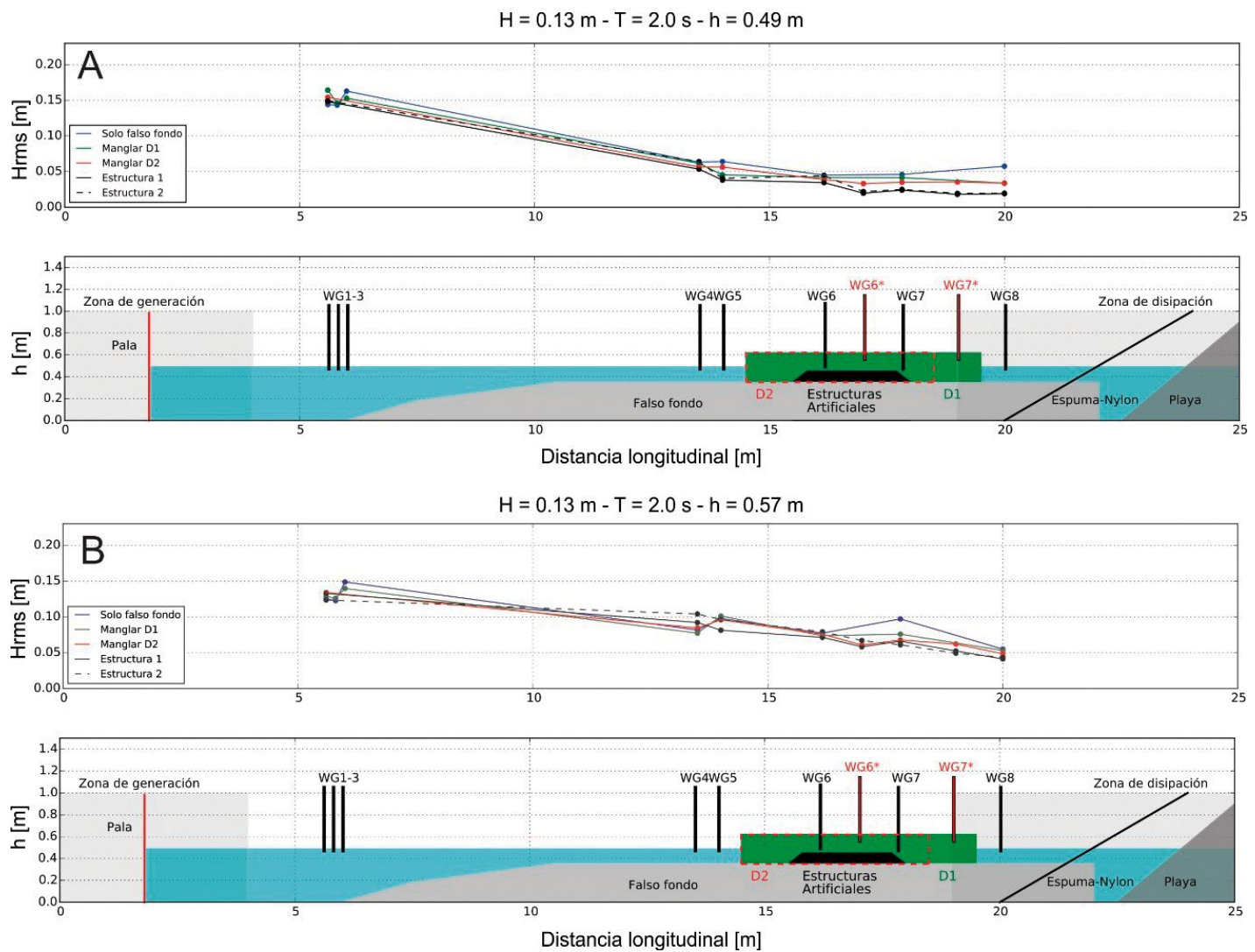


Figura 7.2.23 Comparación de la atenuación de la altura de ola a lo largo del canal considerando el manglar (dos densidades) y las estructuras artificiales para diferentes profundidades. A) $H = 0.13 \text{ m}$; $T = 2.0 \text{ s}$; $h = 0.49 \text{ m}$. B) $H = 0.13 \text{ m}$; $T = 2.0 \text{ s}$; $h = 0.57 \text{ m}$. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Mediciones en Laboratorio).

origina un rompimiento, por lo que parte de la disipación de la energía se debe a la acción conjunta de la disipación por el modelo paramétrico y por la rotura de la ola inducida por la presencia del fondo. Sin embargo, es importante anotar que estas son condiciones normales a las cuales se encuentra sometido un bosque de manglar dentro de una playa. Además, en los casos donde no se presenta rotura del oleaje la disipación debida al modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo es del 40% aproximadamente. De igual forma otro parámetro importante en la disipación de la energía es el periodo. Se encontró que al disminuir el periodo aumenta el porcentaje de disipación por parte del manglar ya que hay una mayor cantidad de ondas interactuando con el bosque.

Con respecto a las velocidades medidas dentro del modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo, se puede concluir que las velocidades de mayor influencia dentro del modelo paramétrico se presentan en los ejes longitudinal (x) y vertical (z), donde se observa que cerca al fondo hay una disminución de la velocidad (velocidades cercanas a cero) relacionadas con la fricción del lecho, mientras que cerca la superficie se observa un aumento de velocidad en dirección negativa en los ejes x y z , indicando la presencia

de corrientes en dirección contraria a la dirección de propagación de la ola.

Con respecto a las estructuras artificiales evaluadas, ambas presentaron un buen comportamiento en términos de atenuación de la altura de ola y disipación de la energía del oleaje. Los resultados obtenidos indican que en términos de disipación de la energía no hay diferencias significativas entre las dos estructuras evaluadas.

Al comparar los resultados obtenidos usando las estructuras artificiales y el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo, se observa una mayor disipación por parte de las estructuras, ya que las estructuras ocasionan una rotura adicional por fondo lo que representa una gran transformación del oleaje. Aunque para todos los casos evaluados las estructuras artificiales presentaron una mayor disipación de la energía del oleaje, se encontró que las diferencias disminuyen a medida que se aumenta el calado en el manglar y las estructuras artificiales. Sin embargo, debe resaltarse que los valores obtenidos de disipación de la energía del oleaje para el modelo paramétrico de los árboles de mangle rojo para las dos densidades evaluadas son altos.

Este Proyecto hace parte de un primer esfuerzo a nivel

departamental para estudiar procesos físicos en un canal de olas, asociados al estudio de los manglares y su papel como estructuras naturales de protección costera. Los resultados son satisfactorios en términos de ilustrar el comportamiento hidrodinámico de las estructuras naturales y la posibilidad de controlar procesos, como la erosión en las playas a partir de la disminución de la energía transmitida por el ecosistema. Se sugieren nuevos ensayos incluyendo la retención y/o el transporte de sedimentos que complementen el entendimiento de los procesos físicos y biológicos asociados a la presencia de las raíces del mangle. De igual forma se recomiendan nuevos estudios de modelación que amplíen los resultados encontrados en el presente Proyecto y permitan reafirmar el rol de los bosques de manglar como estructuras naturales de protección costera.

7.2.5 Referencias

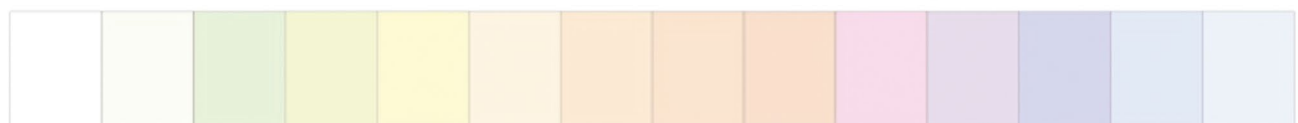
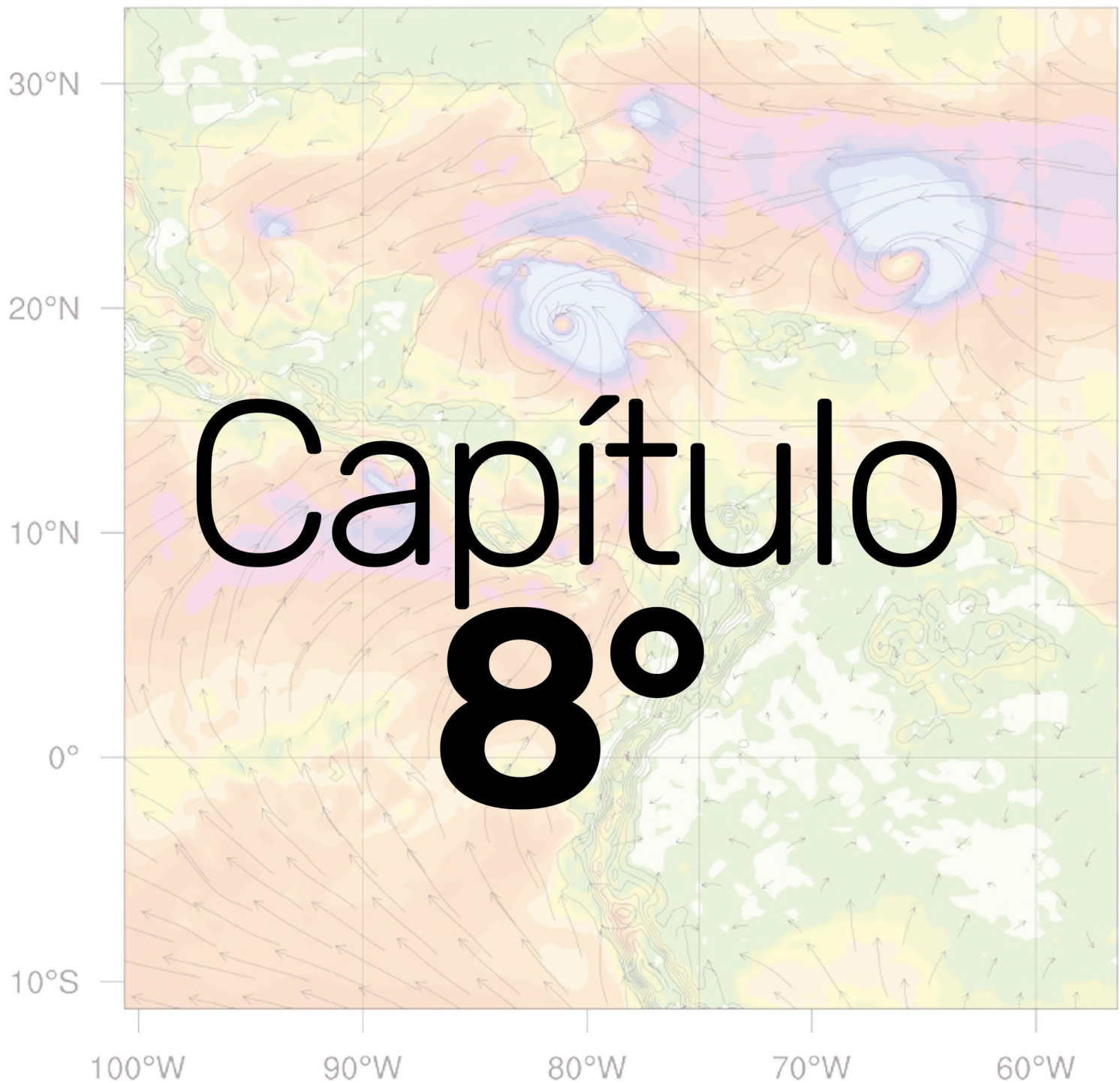
- Alongi, D. (2007). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- Asano, T., Deguchi, H., & Kobayashi, N. (1991). Interaction Between Water Waves and Vegetation. In *COASTAL ENGINEERING* (pp. 2710–2723). <http://doi.org/10.1061/9780872629332.206>
- Ashton, A., & Murray, A. B. (2006). High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. *Journal of Geophysical Research*, 111(F4), F04011. <http://doi.org/10.1029/2005JF000422>
- Ashton, A., Murray, A. B., & Arnoult, O. (2001). Formation of coastline features by large-scale instabilities induced by high-angle waves. *Nature*, 414(6861), 296–300. <http://doi.org/10.1038/35104541>
- Blanco, J. F., Estrada, E. A., Ortiz, L. F., & Urrego, L. E. (2012). Ecosystem-Wide Impacts of Deforestation in Mangroves: The Urabá Gulf (Colombian Caribbean) Case Study. *ISRN Ecology*, 2012, 1–14. <http://doi.org/10.5402/2012/958709>
- FAO. (2007). The world's mangroves 1980-2005. *FAO Forestry Paper*, 153, 89. <http://doi.org/978-92-5-105856-5>
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters* (Cambridge). Retrieved from http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/OF_files/82571738-Waves-in-Oceanic-and-Coastal-Waters.pdf
- Hughes, S. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Volume 7).
- Husrin, S., & Oumeraci, H. (2009). Parameterization of Coastal Forest Vegetation and Hydraulic Resistance Coefficients for Tsunami Modelling. 4th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery, 78–86. Retrieved from [http://atdr.unsyiah.ac.id:8080/jspui/bitstream/123456789/4845/1/Microsoft Word - TS 3A-1.pdf](http://atdr.unsyiah.ac.id:8080/jspui/bitstream/123456789/4845/1/Microsoft%20Word%20-%20TS%203A-1.pdf)
- Järvelä, J. (2004). Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation. *International Journal of River Basin Management*, 2, 61–70. <http://doi.org/10.1080/15715124.2004.9635222>
- Maza, M., Adler, K., Ramos, D., Garcia, A. M., & Nepf, H. (2017). Velocity and Drag Evolution From the Leading Edge of a Model Mangrove Forest. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(11), 9144–9159. <http://doi.org/10.1002/2017JC012945>
- Ohira, W., Honda, K., Nagai, M., & Ratanasuwan, A. (2013). Mangrove stilt root morphology modeling for estimating hydraulic drag in tsunami inundation simulation. *Trees*, 27(1), 141–148. <http://doi.org/10.1007/s00468-012-0782-8>
- Osorio, A. F., Montoya, R. D., Ortiz, J. C., & Peláez, D. (2016). Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean Coast: A wave climate analysis. *Applied Ocean Research*, 56, 119–131. <http://doi.org/10.1016/J.APOR.2016.01.004>
- Posada, B. O., & Henao, W. (2008). Diagnostico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. *IN- VEMAR, Serie Publicaciones Especiales*, 13, 200. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rangel, N., Anfuso, G., & Williams, A. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management*, 114, 129–144. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>
- Rodríguez, M., & Vázquez, A. (2007). Los manglares: Conocimiento e importancia. México. Retrieved from https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/manglares2013/pdf/Manglares_gral_web.pdf
- Sorensen, R. (2006). *Coastal Engineering*. In *Basic Coastal Engineering* (3rd Editio, p. 320). Boston: Kluwer Academic Publishers. http://doi.org/10.1007/0-387-23333-4_1
- Suarez, A., Urrego, L., Osorio, A., & Ruiz, H. (2015). Oceanic and climatic drivers of mangrove changes in the Gulf of Uraba, Colombian Caribbean. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 43(5), 972–985. <http://doi.org/10.3856/vol43-issue5-fulltext-17>
- Stratigaki, V., Manca, E., Prinos, P., Losada, I. J., Lara, J. L., Sclavo, M., ... Sánchez-Arcilla, A. (2011). Large-scale experiments on wave propagation over *Posidonia oceanica*. *Journal of Hydraulic Research*, 49(SUPPL.1), 31–43. <http://doi.org/10.1080/00221686.2011.583388>
- Stratigaki, V., Manca, E., Prinos, P., Losada, I., Lara, J., Sclavo, M., ... Snachez-Arcilla, A. (2014). Large-scale experiments on wave propagation over *Posidonia oceanica*. *Boundary Layer H4eteorology*, 49, 37–41. <http://doi.org/10.1080/00221686.2011.583388>
- Thampanya, U., Vermaat, J. E., Sinsakul, S., & Pana-

pitukkul, N. (2006). Coastal erosion and mangrove progradation of Southern Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(1), 75–85. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.01.011>

Urrego, L., Molina, E., & Suárez, J. (2014). Environmental and anthropogenic influences on the distribution, structure, and floristic composition of mangrove forests of the Gulf of Urabá (Colombian Caribbean), 114, 42–49.

WRF

6:00 GMT 2008-08-30



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Velocidad del Viento 10 m (m s^{-1})

**EROSIÓN
COSTERA**

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 8°

Componente

Modelación Numérica

8.1 Subcomponente

Modelación Atmosférica

Autores

Juan Fernando Salazar Villegas

(PhD en Recursos Hidráulicos)

Rubén Darío Molina Santamaría

(PhD en Ingeniería Ambiental)

José Andrés Posada Marín

(MSc en Ingeniería Ambiental)

8.1.1 Introducción

El viento es una variable atmosférica fundamental para el estudio de la erosión costera porque, entre otras razones, juega un papel importante en la dinámica de las olas y de las corrientes oceánicas (Nakamura et al. 2015, Gill 2016, Komar 2018). En el golfo de Urabá, la información histórica disponible sobre la variable viento es limitada. Los registros de equipos de medición de viento instalados en la región (e.g. anemómetros en tierra u océano) son bastante limitados en cuanto a su cobertura espacial y temporal. Existen algunas bases de datos globales que proporcionan información sobre el viento oceánico, pero con resoluciones espaciales muy bajas en comparación con el tamaño del golfo de Urabá. Por ejemplo, los “reanálisis” son bases de datos globales que proporcionan información sobre el estado de la atmósfera (i.e. sobre variables como la temperatura, la humedad y el viento) en todo el planeta a lo largo de las últimas décadas (típicamente desde 1979 hasta la actualidad). Uno de los reanálisis más usado en el mundo es el del centro europeo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) que se conoce como ERA y cuenta con varias versiones. Las más recientes son ERA-Interim (Dee et al. 2011) y ERA5 (Hersbach et al. 2016). La figura 8.1.1 muestra que en estos reanálisis la resolución espacial (i.e. el tamaño de las celdas usadas para dibujar los mapas) no permite representar adecuadamente la línea costera en el golfo de Urabá.

La baja resolución espacial de bases de datos como los reanálisis conduce a una representación muy simplificada no sólo de la línea costera (Figura 8.1.1), sino también de la topografía y otras características del terreno que son importantes para la dinámica atmosférica en regiones como el golfo de Urabá. Por ejemplo, una representación muy simplificada de las montañas de los Andes conduce a errores importantes en la predicción de la lluvia en algunas

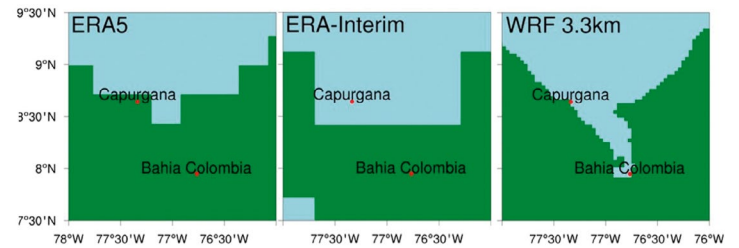


Figura 8.1.1 Golfo de Urabá visto en los reanálisis ERA 5 (Izquierda) y Era-Interim (Centro) y en el modelo WRF usado en este estudio (Derecha). La región verde describe la tierra, mientras que la región azul muestra el área cubierta por el mar. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

regiones de Colombia (Posada-Marín et al. 2019).

El objetivo central de la Subcomponente Modelación Atmosférica fue producir información sobre el viento en el golfo de Urabá, con una cobertura espacial y temporal mejor que la de las fuentes disponibles. Uno de los métodos que ofrece la ciencia moderna para lograr esto se conoce como reducción dinámica de escala (dynamical downscaling).

La idea es usar un modelo climático regional para refinar la información proveniente de bases de datos como los reanálisis, mediante la simulación de un conjunto de procesos atmosféricos (e.g. intercambios de agua y de energía entre la superficie de la tierra o el océano y la atmósfera) que son determinantes para la ocurrencia del viento (e.g. Wang et al. 2004, Warner et al. 2010). Con este fin, y considerando las características del golfo de Urabá, escogimos el modelo WRF (Weather Research & Forecasting; Skamarock et al. 2008), y lo implementamos para una región enfocada en el golfo de Urabá (Figura 8.1.2). WRF es un modelo ampliamente usado en el mundo para estudios de la atmósfera (Powers et al. 2017), incluyendo su interacción con el océano (e.g. Zambon et al. 2014, Bruneau & Toumi 2016).

Se trata de un modelo comunitario de acceso libre, que ha sido desarrollado por diversas instituciones, incluyendo la División de Meteorología de Mesoescala y Microescala –MMM– del Centro Nacional para la Investigación At-

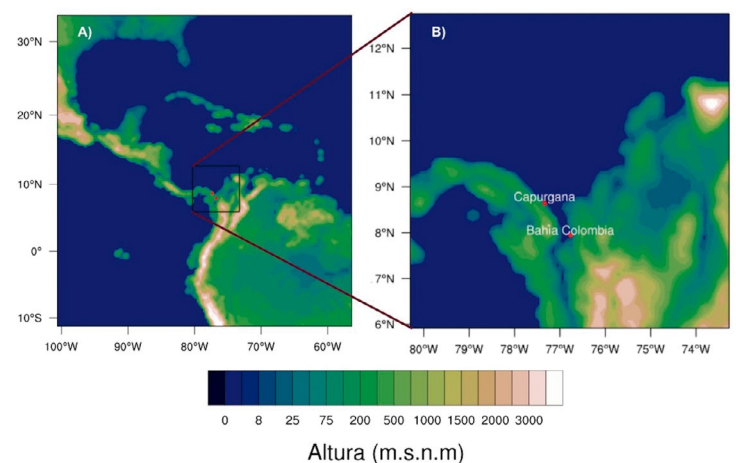


Figura 8.1.2 Localización espacial y topografía de las áreas de interés: A) Dominio mayor que incluye el mar Caribe y B) Dominio menor en donde se resalta el golfo de Urabá, y la ubicación de dos estaciones en superficie usadas en este estudio. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

mosférica –NCAR–, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica–NOAA– y el Centro Nacional para la Predicción Ambiental –NCEP–, de los Estados Unidos.

8.1.2 Métodos y resultados

Los experimentos estuvieron enfocados en simular el comportamiento de los vientos en el Caribe y en el golfo de Urabá, buscando responder cuatro preguntas principales sobre el desempeño del modelo WRF: 1) ¿Reproduce adecuadamente los vientos en el mar Caribe en comparación con datos de satélite?, 2) ¿Reproduce adecuadamente los vientos en el golfo de Urabá en comparación con datos medidos en estaciones en superficie?, 3) ¿Mejora la representación de los vientos en comparación con bases de datos globales disponibles (incluyendo los re análisis)? y 4) ¿A qué se deben estas mejoras?. En conjunto, estas preguntas están diseñadas para evaluar el desempeño del modelo WRF con el fin de ganar confianza (si dicho desempeño es bueno) en sus resultados sobre el viento en el golfo de Urabá. A continuación, se presentan los principales resultados en torno a dichas preguntas.

Con respecto a la primera pregunta, la figura 8.1.3 muestra los resultados del modelo WRF durante el viaje de los huracanes *Hanna* y *Gustav* por el mar Caribe en septiembre de 2008. La similitud de estas imágenes con información satelital (no mostrada) indica que la imple-

WRF 6:00 GMT 2008-08-30

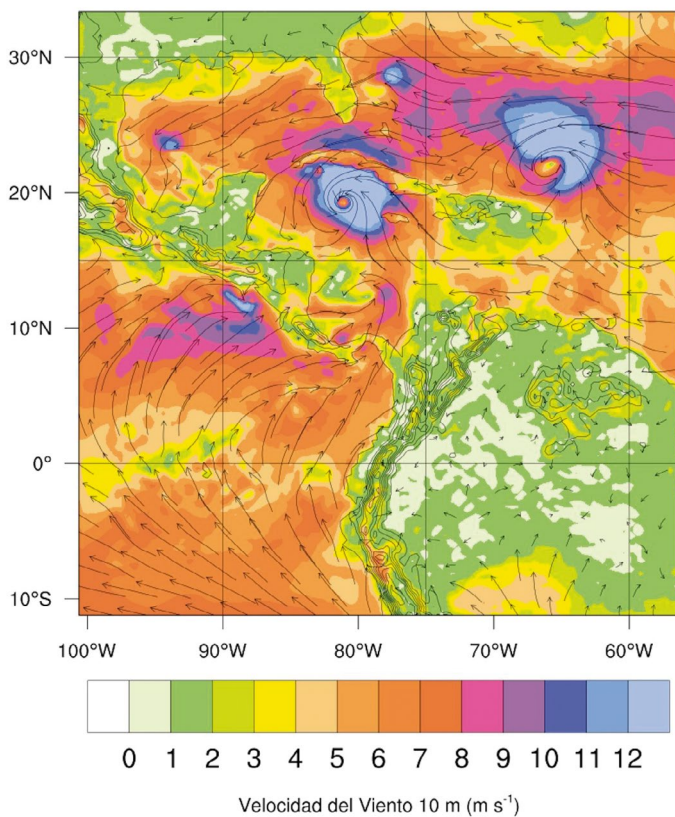


Figura 8.1.3 Un instante de tiempo del viaje de los huracanes *Gustav* y *Hanna* por el mar Caribe como se simulan con la implementación de WRF hecha en este estudio. Las flechas indican las direcciones del viento, mientras que los colores indican su velocidad. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

mentación de WRF logra reproducir características importantes de estos fenómenos atmosféricos extremos. Adicionalmente, la figura 8.1.4 muestra una comparación entre el viento superficial simulado mediante WRF (expresado por componentes zonal, U_{10} , y meridional, V_{10}), y los datos obtenidos de tres bases de datos globales: ASCAT, ERA-Interim y ERA-5. La información de ASCAT (The Advanced Scatterometer) proviene de sensores remotos a bordo de los satélites europeos de la plataforma de meteorología operacional (MetOp) diseñados para estimar la velocidad y dirección del viento sobre los océanos (Figa-Saldaña et al. 2002). De nuevo, la comparación de WRF con las observaciones satelitales de ASCAT indica que el modelo produce una representación adecuada de los vientos sobre el mar Caribe. En esta escala, la representación de los vientos en WRF es comparable con la de los re análisis.

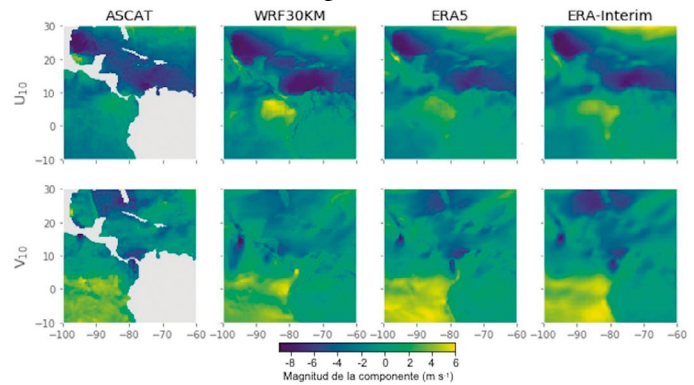


Figura 8.1.4 Comparación entre las componentes del viento superficial (U_{10} y V_{10}) medidas por ASCAT, simuladas mediante WRF, y obtenidas de los re análisis ERA-Interim y ERA5 en una región que incluye el mar Caribe. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

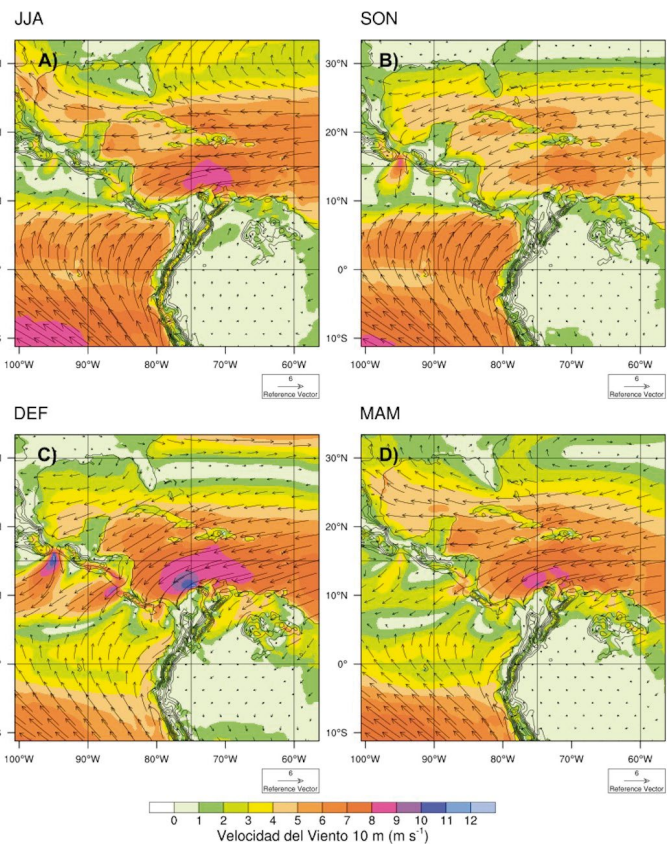


Figura 8.1.5 Ciclo anual del viento sobre el mar Caribe simulado mediante el modelo WRF implementado en este estudio. En los paneles se presentan los promedios trimestrales durante A) Junio-Julio-Agosto, JJA; B) Septiembre-Octubre-Noviembre, SON; C) Diciembre-Enero-Febrero, DEF; y D) Marzo-Abril-Mayo, MAM. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

La figura 8.1.5 muestra la variación estacional promedio de los vientos simulados mediante WRF, en donde puede verse que cerca de las costas del Caribe colombiano los vientos más intensos ocurren durante el trimestre DEF.

La segunda y tercera preguntas se refieren a la representación de los vientos en el golfo de Urabá. Para responderlas comparamos los resultados del modelo WRF implementado en este estudio y los re análisis ERA-Interim y ERA5, con observaciones disponibles en estaciones ubicadas en Capurganá (8° 38' 31" latitud y 77° 20' 11" longitud) y bahía Colombia (7° 56' 57" latitud y 76° 45' 56" longitud) (Figura 8.1.2). Las figuras 8.1.6 y 8.1.7 muestran los resultados de esas comparaciones. En ambos casos, el panel A muestra la serie de tiempo de la velocidad del viento superficial observada (Obs) en cada estación, en comparación con las series de tiempo correspondientes según los re análisis (ERA-Interim y ERA5) y el modelo WRF implementado en este estudio (WRF 3.3km). Asimismo, el panel B de ambas figuras muestra las rosas de vientos observada en las estaciones, simulada por el modelo, y obtenida de los re análisis. Estas rosas de viento son una descripción gráfica de la variabilidad temporal de la dirección del viento. La comparación entre las series de tiempo y rosas de viento mostradas en las figuras 8.1.6 y 8.1.7 indica que el modelo WRF implementado en este estudio produce una representación adecuada de la velocidad y de la dirección de los vientos en comparación con las observaciones en el golfo de Urabá, y que esta representación es, en general, mejor que la disponible en los re análisis ERA-Interim y ERA-5.

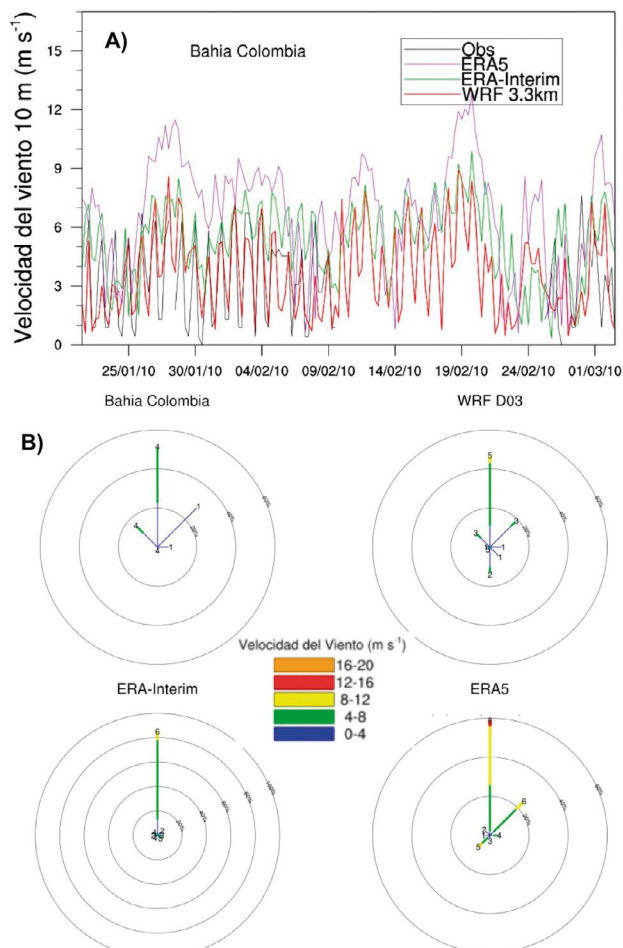


Figura 8.1.6 Comparación entre series de tiempo de la velocidad del viento (panel A) y rosas de viento (panel B) observadas en una estación en Capurganá, y aquellas simuladas por WRF y obtenidas de ERA-Interim y ERA5. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

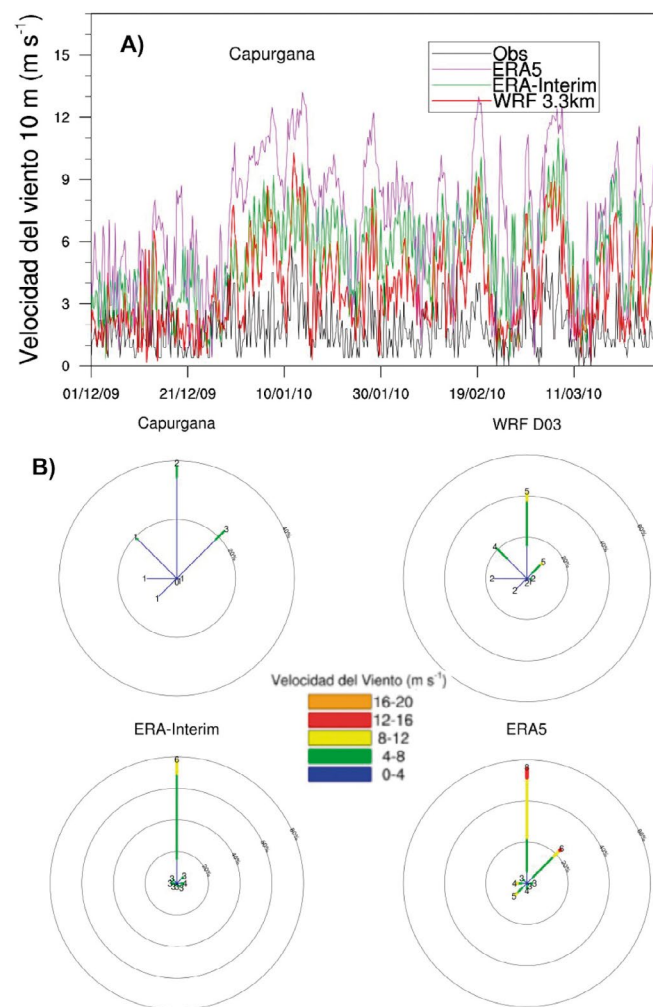


Figura 8.1.7 Igual que la figura 8.1.6 pero para una estación de medición en bahía Colombia. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Atmosférica).

Esto último responde a la tercera pregunta porque implica que el experimento de reducción dinámica de escala realizado con WRF mejora (agrega valor en) la representación del viento para el golfo de Urabá.

La cuarta pregunta apunta a explorar las razones por las cuales el modelo WRF mejora la representación de los vientos en el golfo de Urabá. Una razón fundamental es que, debido a su resolución espacial más alta en comparación con los re análisis, el modelo WRF (con resolución de 3.3 km para el área del golfo de Urabá) logra una representación más adecuada del terreno costero complejo, incluyendo una representación más refinada de la línea de costa en el golfo de Urabá (Figura 8.1.1) y la topografía circundante (Figura 8.1.2B).

Este argumento es consistente con estudios anteriores que evidencian la importancia de los experimentos de reducción dinámica de escala en la comprensión de las dinámicas atmosféricas sobre terrenos complejos (e.g. Posada-Marín et al 2019). En particular, nuestros resultados evidencian la pertinencia de la modelación climática regional en el estudio de las interacciones océano-atmósfera en el golfo de Urabá, considerando el importante papel de los vientos en los procesos de erosión costera.

8.1.3 Referencias

- Bowden, J. H., Otte, T. L., Nolte, C. G., & Otte, M. J. (2012). Examining interior grid nudging techniques using two-way nesting in the WRF model for regional climate modeling. *Journal of Climate*, 25(8), 2805-2823. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00167.1>
- Bruneau, N., & Toumi, R. (2016). A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea. *Ocean Modelling*, 107, 97-111.
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., ... & England, M. H. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature climate change*, 4(2), 111.
- Cai, W., Wang, G., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., Jin, F. F., ... & England, M. H. (2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(2), 132.
- Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Miranda, P. M. a, & Belo-Pereira, M. (2013). WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate. *International Journal of Climatology*, 33, 2591–2608. <http://doi.org/10.1002/joc.3616>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Bechtold, P. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), 553-597.
- El-Samra, R., Bou-Zeid, E., & El-Fadel, M. (2018). To what extent does high-resolution dynamical downscaling improve the representation of climatic extremes over an orographically complex terrain?. *Theoretical and applied climatology*, 134(1-2), 265-282.
- Gill, A. E. (2016). *Atmosphere—ocean dynamics*. Elsevier.
- Heikkilä, U., Sandvik, A., & Sorteberg, A. (2011). Dynamical downscaling of ERA-40 in complex terrain using the WRF regional climate model. *Climate dynamics*, 37(7-8), 1551-1564.
- Hersbach, H. (2016, December). The ERA5 Atmospheric Reanalysis. In AGU Fall Meeting Abstracts.
- Knutson, T. R., McBride, J. L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., ... & Sugi, M. (2010). Tropical cyclones and climate change. *Nature geoscience*, 3(3), 157.
- Komar, P. D. (2018). *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. CRC Press.
- Leatherman, S. P., Zhang, K., & Douglas, B. C. (2000). Sea level rise shown to drive coastal erosion. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(6), 55-57.
- Liu, B., Liu, H., Xie, L., Guan, C., & Zhao, D. (2011). A coupled atmosphere–wave–ocean modeling system: Simulation of the intensity of an idealized tropical cyclone. *Monthly Weather Review*, 139(1), 132-152.
- Liu, P., Tsimpidi, A. P., Hu, Y., Stone, B., Russell, A. G., & Nenes, A. (2012). Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(8), 3601-3610.
- Meehl, G. A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., & Whetton, P. (2000). Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 427-436.
- Montoya, L. J., & Toro, M. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (13).
- Nakamura, H., Isobe, A., Minobe, S., Mitsudera, H., Nonaka, M., & Suga, T. (2015). “Hot Spots” in the climate system—new developments in the extratropical ocean–atmosphere interaction research: a short review and an introduction. *Journal of Oceanography*, 71(5), 463-467.
- Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., & Mitchum, G. T. (2018). Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9), 2022-2025.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517-1520.
- Neumann, J. E., Price, J., Chinowsky, P., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., ... & Martinich, J. (2015). Climate change risks to US infrastructure: impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage. *Climatic Change*, 131(1), 97-109.
- Pohl, B., & Crétat, J. (2013). On the use of nudging techniques for regional climate modeling: application for tropical convection. *Climate Dynamics*, 1–22. <http://doi.org/10.1007/s00382-013-1994-3>.
- Posada-Marín, J. A., Rendón, A. M., Salazar, J. F., Mejía, J. F., & Villegas, J. C. (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52(5-6), 3609-3629.
- Poveda, G., & Mesa, O. (1999). La corriente de chorro superficial del Oeste (“del Chocó”) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO”. *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 23(89), 517-528.
- Poveda, G., Jaramillo, L., & Vallejo, L. F. (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50(1), 98-118.
- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., ... & Grell, G. A. (2017). The weather research and forecasting model: Overview, system

efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717-1737.

Ricchi, A., Miglietta, M. M., Falco, P. P., Benetazzo, A., Bonaldo, D., Bergamasco, A., ... & Carniel, S. (2016). On the use of a coupled ocean-atmosphere-wave model during an extreme cold air outbreak over the Adriatic Sea. *Atmospheric Research*, 172, 48-65.

Rueda, O., & Poveda, G. (2006). Variabilidad espacial y temporal del chorro del "Chocó" y su efecto en la hidroclimatología de la región del pacífico colombiano. *Meteorol. Col*, 10, 132-145.

Ruiz-Ochoa, M. A.; Bernal, G. (2008) Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, mar Caribe. *Avances en recursos hidráulicos*, no 20.

Samala, B. K., Nagaraju, C., Banerjee, S., Kaginalkar, A., & Dalvi, M. (2013). Study of the Indian summer monsoon using WRF-ROMS regional coupled model simulations. *Atmospheric Science Letters*, 14(1), 20-27.

Saulo, A. C., Cardazzo, S., Ruiz, J., Campetella, C., & Rolla, A. (2008). Experimental forecast system at the Research Center for the sea and the atmosphere. *Meteorologica*, 33, 83-97.

Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., ... & Reichstein, M. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 109-230). Cambridge University Press.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA.

Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Miranda, P. M. a, de Medeiros, J., Belo-Pereira, M., & Espirito-Santo, F., (2012). WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics*, 39, 2497-2522. <http://doi.org/10.1007/s00382-012-1315-2>.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., & Marquis, M. (Eds.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press.

Wang, Z., Duan, C., & Dong, S. (2018). Long-term wind and wave energy resource assessment in the South China sea based on 30-year hindcast data. *Ocean Engineering*, 163, 58-75.

Warrach-Sagi, K., Schwitalla, T., Wulfmeyer, V., & Bauer, H. S., (2013). Evaluation of a climate simulation in Europe based on the WRF-NOAH model system: Precipitation

in Germany. *Climate Dynamics*, 41, 755-774. <http://doi.org/10.1007/s00382-013-1727-7>.

Zambon, J. B., He, R., & Warner, J. C. (2014). Tropical to extratropical: Marine environmental changes associated with Superstorm Sandy prior to its landfall. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8935-8943.

8.2 Subcomponente Modelación Oleaje

Autores

Andrés Fernando Osorio Arias

(PhD en Ciencias y Tecnologías Marinas)

Rubén Darío Montoya Ramírez

(PhD en Recursos Hidráulicos)

Víctor José Saavedra Mejía

(MSc en Recursos Hidráulicos)

8.2.1 Introducción

En el marco del convenio interadministrativo de colaboración No 2017-SS-20-004 "*Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*", la Subcomponente Modelación Oleaje tuvo como propósito generar la información requerida para el diseño y la construcción de las obras de protección para diferentes puntos estratégicos en el golfo de Urabá como alternativa de solución al problema erosivo presentado en la actualidad en el litoral antioqueño.

Para esto se implementaron diferentes estrategias metodológicas con la finalidad de obtener los mejores campos de oleaje en la zona de estudio. Inicialmente fue necesario realizar la modelación de oleaje con el modelo WAVEWATCH III (Tolman, 2002, 2009, 2014) desde el mar Caribe hasta el golfo de Urabá mediante el anidamiento de mallas telescópicas de doble vía (Multigrid), para obtener las mejores condiciones de frontera para realizar la modelación de oleaje a escala local usando el modelo SWAN (Booij et al., 1999) realizando un proceso riguroso de calibración y de validación por etapas. Inicialmente se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de los resultados para la región del mar Caribe considerando diferentes combinaciones de resoluciones y dominios espaciales para las mallas de modelación empleadas para la modelación con WAVEWATCH III, con el objetivo de analizar la influencia energética del oleaje proveniente del Atlántico Norte y Este al interior del Caribe y de manera más específica su influencia en los resultados obtenidos para el golfo de Urabá. Posteriormente a partir de trabajos previos realizados en el mar Caribe, se realizó la identificación de la parametrización más adecuada que se debería utilizar en la modelación con WAVEWATCH III para obtener los mejores resultados; así

como definir una metodología de optimización de los parámetros físicos asociados a la parametrización seleccionada. Desde este análisis se definió la mejor configuración para la modelación de oleaje en aguas profundas a partir del modelo WAVEWATCH III (mallas, dominio, parametrización física, resolución espectral y direccional, pasos de tiempo, etc) lo cual permitió garantizar la mejor descripción energética del oleaje en la zona de aguas profundas del golfo de Urabá.

Finalmente, una vez calibrado y validado el modelo WAVEWATCH III, se obtuvieron las condiciones de frontera que fueron empleadas en la modelación local del oleaje empleando el modelo SWAN, el cual fue calibrado y validado empleando mediciones *in situ*. A partir de esta información se caracterizó el oleaje en el litoral antioqueño.

8.2.2 Zona de estudio

El golfo de Urabá es el más grande y meridional del Caribe colombiano; su extremo noroeste, conocido como cabo Tiburón, mar al límite con la República de Panamá y el inicio de Sur América; su ancho varía entre 48.5 y 5.9 Km (Velásquez, 2013). Los ríos como Atrato, León, Mulatos y San Juan entre otros, hacen parte de un rasgo ca-

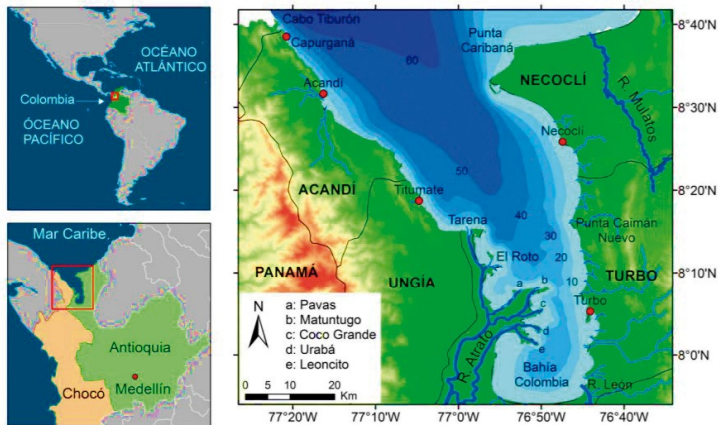


Figura 8.2.1 Localización zona de estudio. (Fuente: Modificado de Velásquez, 2013).

característico importante del golfo y el litoral antioqueño que además cuenta con una línea de costa que ha sido levantada y deformada, afectando la plataforma marina, cuyas olas en pleamar atacan directamente el escarpe de la terraza marina causando la erosión (Correa & Vernet, 2004).

La acción del viento es un condicionante importante del oleaje en el golfo, este varía en magnitud y dirección entre la época lluviosa y la época seca; pero también cambia entre la parte ubicada al norte del delta del río Atrato y la más al sur, hasta bahía Colombia. La primera zona es dominada fuertemente por oleaje de fondo o *Swell* proveniente del mar Caribe, y la segunda zona es dominada fuertemente por oleaje local (sea) originado por el efecto del viento local.

8.2.3 Modelación de oleaje

8.2.3.1 Recopilación de información secundaria

Para la modelación de oleaje en la región del golfo de Urabá se recopiló la información disponible en la zona.

A continuación, se hace una breve descripción de la información recopilada para la zona de estudio.

Información batimétrica

Se recopilaron y se digitalizaron las cartas náuticas 412 y 043 elaboradas por el *Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas* (CIOH). Para complementar la información batimétrica obtenida a partir de las cartas náuticas se descargó la información de la batimetría proporcionada por la base de datos de relieve mundial ETOPO1 (Amante, C., & Eakins, B., 2016).

Datos de oleaje

Se recopiló toda la información disponible de proyectos especiales realizados en la zona de estudio al interior del golfo, así como las boyas de aguas profundas del National Data Buoy Center (NDBC). Dentro de la información de proyectos especiales se encuentra la información obtenida durante las campañas de campo realizadas en el marco del Proyecto

“*Expedición estuarina golfo de Urabá, fase 1*” (proyecto de la Universidad de Antioquia en asociación con las universidades EAFIT y Nacional) (Blanco-Libreros y Londoño-Mesa, 2016), los cuales corresponden a mediciones de oleaje realizadas con tres sensores de presión distribuidos de la siguiente manera a lo largo del golfo: sensor Aquadopp Current Meter 3D (Nortek) ubicado en Capurganá en las coordenadas 8°38'31" latitud norte – 77°20'11" longitud oeste, sensor Midas WTR (Valeport) ubicado en Necoclí en las coordenadas 8°22'6.86" latitud norte – 76°48'12.78" longitud oeste, sensor Midas WTR, ubicado a 660 m de la línea de costa de punta Yarumal a una profundidad de 5.82 m. En la figura 8.2.2 se muestran los puntos de ubicación de las boyas de la NDBC y los puntos con información adicional de proyectos especiales.

En la tabla 8.2.1 se presentan las fechas en las cuales se cuenta con esta información.

Datos vientos

Se recopiló información de magnitud y dirección del viento de la estación meteorológica Turbo_CIOH_AUT 12021001 propiedad del CIOH (Ver figura 8.2.2). Esta estación cuenta con registro desde el 1 de enero de 2016 hasta el 17 de noviembre de 2018. También, se descargaron campos de vientos usados como forzador para los modelos de oleaje a escala local y regional, estos campos de vientos pertenecen a la base de datos del Climate Forecast System

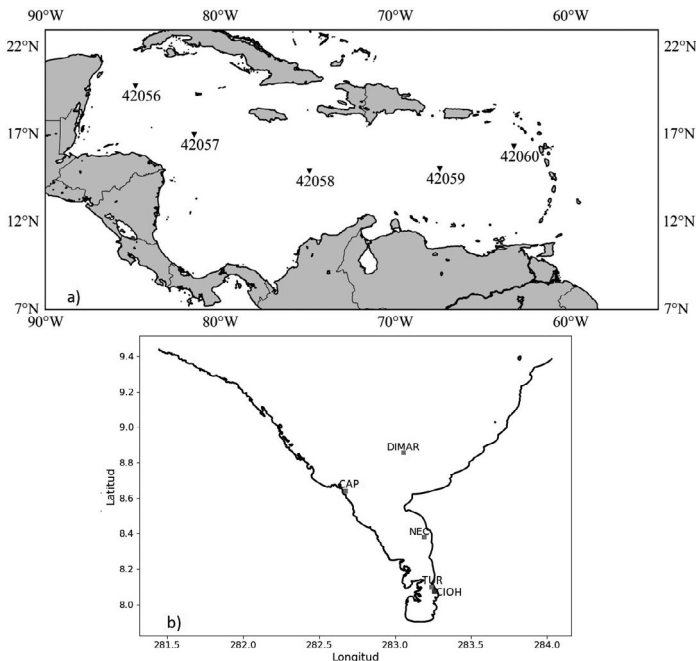


Figura 8.2.2 A) Boyas con información disponible en el Caribe, B) Localización series de oleaje (cuadrados rojos) medidas al interior del golfo y estación meteorológica Turbo_CIOH_AUT (Cuadrado azul). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

Lugar	Coordenadas	Pseudónimo	Fecha inial	Fecha final
Capurganá	8°38'31" N	CAP	2010/03/27/21	2010/03/25/15
	77°20'11" W			
Necoclí	8°22'6.86"N	NEC	2010/02/22/6	2010/02/28/12
	76°48'12.78"W			
Turbo	8°22'19.08" N	TUR	2009/03/27/14	2009/03/31/5
	76°48'13.89" W			
DIMAR	8°50'59" N	DIMAR	2010/10/01/0	2010/12/31/18

Tabla 8.2.1 Características principales de los puntos con información disponible de oleaje en el golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

Reanalysis (CFSR (Kalnay, 1996)) del National Center for Atmospheric Research (NCAR). Los productos de CFSR están disponibles con resolución horaria y una resolución espacial de 0.5 grados desde 1979-01-01 00:00 hasta 2011-01-01 00:00 y de 2011-01-01 hasta el presente en su segunda versión CFSRv2. Los datos están disponibles en <http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr>. (Saha et al., 2010).

8.2.3.2 Metodología de modelación

Para obtener los mejores campos de oleaje en la zona de estudio, se empleó un acople espectral entre dos modelos de tercera generación, WAVEWATCH III (Tolman, 2002, 2009, 2014) y SWAN (Booij et al., 1999). El primero es usado mediante un esquema de anidamiento telescópico de doble vía llamado multigrad para realizar una simulación a escala regional (mar Caribe) e ir aumentando la resolución a medida que se acerca al litoral antioqueño; El segundo modelo (SWAN) (Booij et al., 1999), fue empleado para la modelación de oleaje a escala local en el golfo de Urabá. En la figura 8.2.3, se presenta el esquema de anidamiento aplicado para el modelo WAVEWATCH III, así como las mallas de detalles para el golfo de Urabá del modelo SWAN, mientras que en la tabla 8.2.2 son presentadas las características generales de las mallas empleadas en el anidamiento

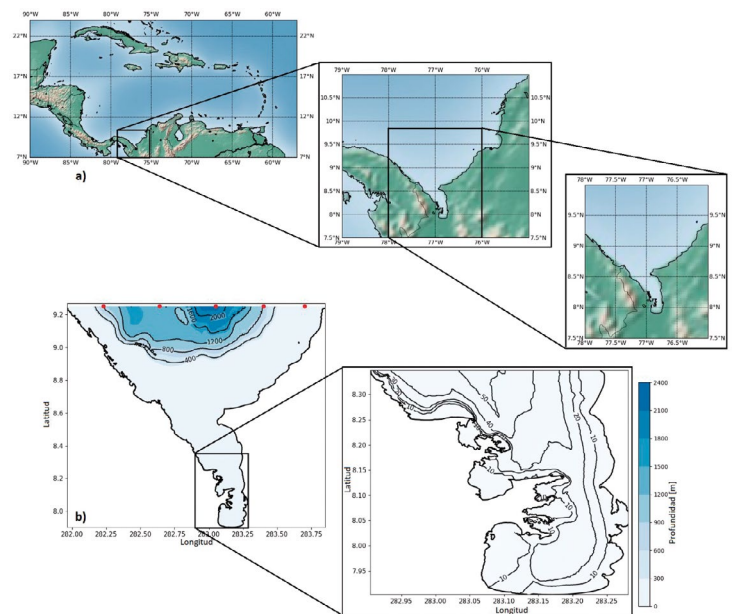


Figura 8.2.3 A) Mallas de modelación de oleaje a escala regional. B) Mallas de modelación de oleaje a escala local (SWAN), los puntos rojos indican la ubicación de las condiciones de fronteras usadas en el modelo. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

ID Malla	Latitud min-max	Longitud min-max	Resolución [°]	Resolución [Km]
Caribe	7° - 24°	270° - 303°	1/6	18,5
Colombia	7.5° - 11°	281° - 285°	1/12	9,25
Urabá	7.5° - 10°	282° - 284°	1/60	1,85

Tabla 8.2.2 Especificaciones de las áreas y resolución de las mallas de cálculo para las simulaciones a escala oceánica con el modelo WWI-II. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

telescópico de doble vía en el modelo WAVEWATCH III.

8.2.3.2.1 Estrategia de modelación escala oceánica

La estrategia de modelación implementada garantiza en primer lugar una descripción adecuada de la energía del oleaje a escalas oceánicas en el Caribe, y posteriormente para la zona de influencia del golfo de Urabá a partir del modelo WAVEWATCH III para obtener una mejor estimación del oleaje en el golfo de Urabá.

Calibración y validación del modelo

WAVEWATCH III

Dada la complejidad del modelo WWIII, el proceso de calibración se realizó en varios pasos considerando aspectos como dominio de simulación, paso de tiempo, resolución espacial, condiciones de contorno, resolución espectral y direccional, parametrizaciones físicas, análisis de sensibilidad, optimización de parámetros. Dado que el Caribe colombiano está fuertemente influenciado por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y

fenómenos locales de corto plazo que originar condiciones extremas de vientos y oleaje como los frentes húmedos y los huracanes, se propuso implementar la metodología de calibración y validación propuesto por Montoya (2014), sin embargo, se omiten las actividades correspondientes a la calibración individual durante condiciones de Huracanes. Esta suposición está basada en el artículo de Osorio et al. (2016), donde demuestran la poca influencia de la energía generada durante condiciones de huracanes hacia el sur oeste del Caribe colombiano y más aún en la región de la zona de influencia del golfo de Urabá. Adicionalmente el

hace que durante la ocurrencia de huracanes la magnitud de los vientos, así como el patrón espacial de estos sean completamente diferentes a los ocurrios durante las condiciones medias u otros fenómenos como los frentes fríos. Esto significa que para ser rigurosos la calibración del modelo debe hacerse de manera independiente para condiciones medias y extremas (Montoya et al., 2018).

A partir de esta metodología se plantearon las siguientes etapas y simplificaciones.

- **Fase I:** Análisis de sensibilidad de las condiciones de frontera, tamaños de malla y dominios. En esta fase se determinó la importancia para efectos de modelación del oleaje en el Caribe de la energía entrante proveniente del Atlántico a través de las Antillas mayores y menores.

- **Fase II:** En esta fase, se seleccionaron las parametrizaciones físicas más adecuadas a partir de la recopilación de información de artículos científicos, documentos y demás referencias que discuten sobre las mejores parametrizaciones obtenidas para el Caribe.

- **Fase III:** Optimización de Parámetros. En esta fase a partir de la parametrización seleccionada se realizó un proceso de optimización de parámetros a partir de información de campo. Esta etapa se desarrolló de manera secuencial en cada una de las mallas empleadas para la modelación.

A continuación, se describen cada una de las fases del proceso de Calibración y validación.

Fase I: Análisis de sensibilidad de las condiciones de frontera, tamaños de malla y dominios.

En esta fase de la simulación se estudió la sensibilidad del modelo a escala oceánica ante factores como el dominio de simulación, las condiciones de frontera y la resolución de las mallas propuestas. En esta fase inicial de calibración no se incluyeron las mallas de detalle en la zona del golfo de Urabá en primera instancia ya que se quería determinar la mejor configuración de mallas y resoluciones a escala oceánica.

Este análisis permitió determinar la influencia de la energía entrante por las Antillas menores y mayores para lo cual se realiza la implementación de diferentes áreas de generación de oleaje en la región del Atlántico Norte y este, donde se tiene la influencia de los vientos alisios del noreste y del sureste. Como dominios para el análisis se seleccionaron a) Entre 7°N-60°N y entre 18°W-90°W, b) 7°N-40°N y entre 40°W-90°W, c) 7°N-40°N y entre 18°W-90°W por último el dominio para la región del Caribe seleccionado se encuentra entre 7°N-23°N y 58°W-90°W.

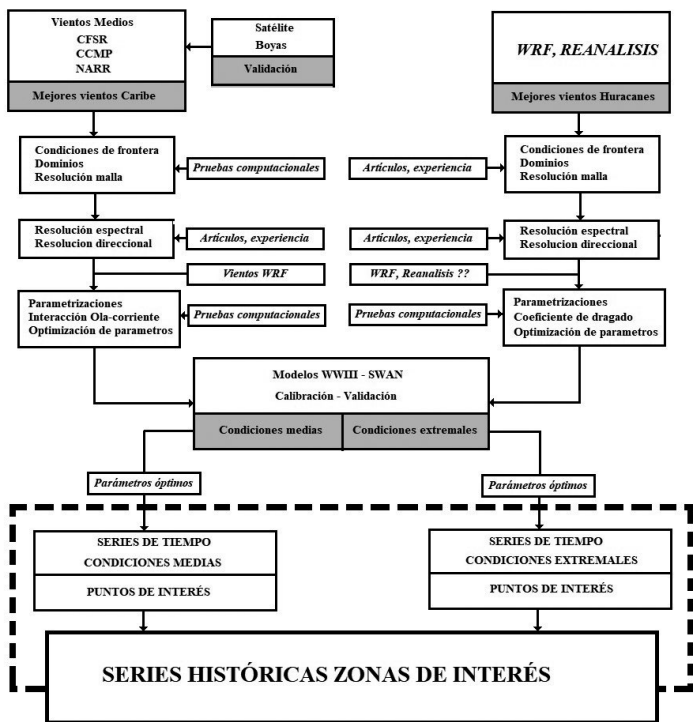


Figura 8.2.4 Esquema propuesto de validación para un modelo de oleaje durante condiciones medias y extrémas. (Fuente: Montoya, 2014 y Osorio et al. 2016).

artículo de Montoya et al. (2013), indica como la componente más energética del oleaje se encuentra en la parte frontal derecha del huracán y dichas olas se propagan en la dirección predominante de la dirección del huracán (hacia el norte del Caribe en las regiones costeras de Cuba, Haití, República Dominicana, Puerto Rico). La figura 8.2.4, muestra un esquema general de dicha metodología en condiciones medias y extremas para escalas oceánicas.

Según Montoya et al. (2018), hay una diferencia significativa entre las condiciones atmosféricas durante la ocurrencia de huracanes y las llamadas condiciones medias en el mar Caribe gobernadas principalmente por el paso de la Zona

Intertropical de Convergencia (ZCIT). Las condiciones de huracán incluyen fuertes gradientes de presión, fuerte convección entre la atmósfera y la superficie del mar, vorticidad y alteraciones verticales de la velocidad del viento moderadas principalmente por las ondas del este (AEWs, Agudelo et al., 2011). Por el contrario, las llamadas condiciones medias se ven principalmente afectadas por el movimiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y los vientos alisios del noreste en la región ecuatorial. Esto

Para la selección del caso a modelar se consideraron los resultados presentados por Osorio et al., (2016) y Montoya (2014) quienes presentan el ciclo anual del oleaje para algunos puntos del Caribe colombiano durante las diferentes fases del fenómeno ENSO (Fase fría- *La Niña*, fase cálida *El Niño* y fase normal). Los resultados muestran como durante la ocurrencia de la fase fría (*La Niña*) el oleaje tiende a presentar valores más energéticos durante el trimestre Diciembre-Enero-Febrero (DEF) a los observados durante las condiciones *del Niño* y condiciones normales para la mayor parte de la región del Caribe.

Basados en la disponibilidad de información para las boyas del Caribe (Figura 2.90b) se seleccionó como período de análisis el período correspondiente a la ocurrencia del fenómeno de la *Niña* durante los años 2010 – 2011 para la temporada de Diciembre-Enero- Febrero (DEF). Para considerar la transición de condiciones fuertemente energéticas a débiles de los vientos alisios del noreste y del sureste en el Caribe se seleccionó como período definitivo para el análisis de sensibilidad de mallas y dominios al correspondiente de los meses de diciembre de 2010 a marzo de 2011. Para verificar la sensibilidad se emplearon una serie de boyas virtuales en lugares estratégicos del Caribe que permitieran verificar el comportamiento de las principales variables del oleaje y de la disipación de la energía para las diferentes configuraciones propuestas. A continuación, se describen las zonas seleccionadas para la localización de boyas virtuales.

Zona 1: Corresponde a la región central del Caribe entre los 14°N y los 16°N. Esta región se extiende hacia la parte exterior del Caribe hacia el oeste de las Antillas menores. Su objetivo era verificar la sensibilidad del modelo ante la energía entrante al Caribe y la disipación de energía causada por el efecto de las Antillas menores hacia la parte este, centro y oeste del Caribe Central.

Zona 2: Corresponde a la zona norte entre los 17°N y los 19°N al este y centro del Caribe. Su objetivo fue verificar la sensibilidad del modelo ante la entrada de energía del oleaje proveniente del oleaje del Atlántico Norte y su disipación al entrar al Caribe.

Zona 3: Corresponde a la región del área de influencia del golfo de Urabá, entre las latitudes 9°N a 11°N. Su objetivo fue evaluar la sensibilidad del modelo ante la energía que se genera al interior del Caribe (sea y swell local) y la energía proveniente del Atlántico Norte y Este que pueda

$$\Delta t_{x,y} = \frac{40 * 10^6}{360} \frac{\Delta x * \cos(maxlat)}{1.15 * \frac{g}{4\pi} \frac{1}{f}} = 123766 * \Delta x * \cos(maxlat) * f_{min}$$

afectar dicha región. A partir de los dominios definidos se plantearon 7 casos de simulación, los cuales se resumen en la tabla 8.2.3.

Caso	Dominio	Δt_g	$\Delta t_{x,y}$	Δt_k	Δt_s	Observaciones
		[s]	[s]	[s]	[s]	
1	Malla 3	240 0	1200	1200	30	1/3°X1/3° (Atlántico Norte 7°N a 40°N- Atlántico Este lejano 90°W -18°W)- 1/6°X1/6° (Caribe resolución media).
	Malla 13	120 0	900	600	30	
2	Malla 7	180 0	900	900	30	1/3°X1/3°(Atlántico Norte lejano 7°N a 60°N- Atlántico Este lejano 90°W-18°W)- 1/6°X1/6° (Caribe resolución media) .
	Malla 13	900	900	450	30	
3	Malla 3	240 0	1200	1200	30	1/3°X1/3°(Atlántico Norte 7°N a 40°N – Atlántico Este lejano 90°W -18°W)- 1/12°X1/12° (Caribe alta resolución)
	Malla 14	120 0	480	600	30	
4	Malla 11	240 0	1200	1200	30	1/3°X1/3°(Atlántico Norte 7°N a 40°N – Atlántico Este 90°W - 40°W)- 1/6°X1/6° (Caribe resolución media)
	Malla 13	120 0	900	600	30	
5	Malla 11	180 0	1200	900	30	1/3°X1/3°(Atlántico Norte 7°N a 40°N – Atlántico Este 90°W - 40°W)- 1/12°X1/12° (Caribe alta resolución)
	Malla 14	900	480	450	30	
6	Malla 4	180 0	600	900	30	1/6°X1/6°(Atlántico Norte 7°N a 40°N – Atlántico Este lejano 90°W -18°W)- 1/12°X1/12° (Caribe alta resolución)
	Malla 14	900	480	450	30	
7	Malla 4	720	600	360	30	1/6°X1/6°(Atlántico Norte 7°N a 40°N – Atlántico Este lejano 90°W -18°W)- 1/24°X1/24° (Caribe alta resolución)

Tabla 8.2.3 Escenarios definidos y tiempos de modelación con base a las mallas y dominios definidos en la tabla 8.2.2. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

Para la estimación de los pasos de tiempo y el tamaño de mallas de cada uno de los dominios presentados en la tabla 8.2.3, se empleó la ecuación propuesta por Spindler and Tolman (2008), dada por la siguiente expresión.

En esta f es la frecuencia mínima empleada para la simulación [Hz], $maxlat$ es la máxima latitud de la malla [Grados] y ΔX es la resolución espacial [metros].

Para la estimación se tomó una frecuencia mínima de 0.04118 Hz, correspondiente a un período de aproximadamente 24 segundos lo cual cubre completamente el rango de ocurrencia de las olas más grandes posibles durante condiciones extremas de huracanes. Según, Spindler and Tolman (2008), el paso de tiempo Δt_g para el cual se integra la solución global, puede tomarse como dos o tres veces el tiempo $\Delta t_{x,y}$.

Las combinaciones, de casos permitieron el análisis de la sensibilidad del dominio y la resolución de la malla.

La comparación del caso 1 y 3 da cuenta de la sensibilidad ante la resolución de la malla para condiciones similares de energía del oleaje entrantes al Caribe. La comparación del caso 1 y 4 da cuenta de la sensibilidad ante el dominio se-

leccionado en la parte oeste de las Antillas menores a través de la zona de generación oleaje de swell proveniente del Atlántico Este hacia el Oeste de África. La comparación del caso 4 y 5 da cuenta de la sensibilidad ante una mayor resolución de la malla para condiciones similares de energía del oleaje entrantes al Caribe. La comparación del caso 3 y 6 da cuenta de la sensibilidad ante una mayor resolución de la malla en el Atlántico Norte subtropical para condiciones similares de energía del oleaje entrantes al Caribe.

Para el análisis de los resultados de la combinación de casos propuestos se asume como hipótesis básica que los mejores resultados desde el punto de vista físico son obtenidos a partir de mallas de más alta resolución cuando otros aspectos como las parametrizaciones físicas, la resolución espectral y direccional, entre otros son mantenidos constantes. Teniendo en cuenta esto se emplearon los siguientes análisis espaciales y puntuales.

- Presentación de series de tiempo para los diferentes parámetros del oleaje (Hs, Tp, PDir) para todas las boyas virtuales seleccionadas para los casos comparativos en el caribe.
- Estimación de errores porcentuales espaciales para el dominio del Caribe.

Los casos de igual resolución para la malla del Caribe fueron empleados para medir la sensibilidad del dominio externo en el Atlántico (Energía entrante al Caribe) y los casos para los cuales se tiene diferente resolución de la malla en el Caribe son empleados para medir la sensibilidad al tamaño de malla.

Los resultados para ambos análisis se discuten a continuación:

Resultados Fase I

El análisis de resultados se concentró en determinar la sensibilidad de la influencia del dominio y la generación de energía tipo Swell proveniente del Atlántico Norte y Este y su influencia en la energía entrante al Caribe por la parte Norte y Este; así como la influencia en los resultados obtenidos para las zonas principales para el Caribe (Zona norte, zona centro y la zona de influencia del golfo de Urabá).

CASO	Tiempo (seg)	Tiempo (horas)	Tiempo (días)
CASO 1	18925,94	5,26	0,22
CASO 2	21420,73	5,95	0,25
CASO 3	45572,72	12,66	0,53
CASO 4	13359,44	3,71	0,15
CASO 5	83091,53	23,08	0,96
CASO 6	97716,98	27,14	1,13
CASO 7	630969,5109	175,27	7,3

Tabla 8.2.4 Tiempos de cómputo para los casos presentados en la tabla 8.2.3. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

Para presentar las conclusiones más importantes relacionadas con el análisis de sensibilidad de los tamaños de malla, dominios y condiciones de frontera generada por las diferencias entre los dominios hacia el Atlántico Norte y Este. La tabla 8.2.4, muestra los tiempos de cómputo obtenidos para cada uno de los casos con un período de simulación entre principios de diciembre de 2010 hasta finales abril de 2011 (4 meses).

Para el caso de los dominios se hizo una comparación entre el caso 1 con una malla exterior de 1/3° entre 90°W-18°W y entre 7°N- 40°N y una malla local del Caribe con una resolución de 1/6° comparado contra el caso 2 con mayor resolución en el Atlántico Norte entre 90°W-18°W y entre 7°N- 60°N y los mismos tamaños de malla. Los resultados muestran diferencias porcentuales más altas, pero relativamente bajas para las zonas del Caribe exterior hacia el Atlántico Norte con una pequeña disminución hacia el este de las Antillas menores y en los puntos al interior del Caribe cercanos a las Antillas menores. A pesar de esto los resultados al interior del Caribe hacia el Oeste, Noroeste y Suroeste en la zona de influencia del golfo de Urabá donde se encuentran los puntos de interés para el presente estudio presentan diferencias porcentuales muy bajas que oscilan entre el 1% y 2%. Al comparar los resultados obtenidos para los tiempos de simulación pueden observarse diferencias muy pequeñas en los tiempos de simulación para ambos casos (5.95h contra 5.26 h) lo cual indica un mayor beneficio en considerar toda la energía proveniente del Atlántico para dicha resolución externa de 1/3°. Aunque no se diseñó un experimento para dicho dominio extendido (60°N) con mayor resolución y una mayor resolución al interior del Caribe, al comparar con los tiempo de simulación obtenidos para resoluciones mayores con dominios inclusive más pequeños como el caso 6 para el cual se tiene un dominio hacia el Este exactamente igual pero con un dominio menor hacia el Atlántico Norte y resoluciones mayores de 1/6° para el Atlántico y 1/12° para el interior del Caribe se observa el aumento significativo en los tiempos de cómputo (5.95 horas para el caso 2 contra 27.14 horas para el caso 6) para un período de simulación de tan solo cuatro meses.

Para el caso 1 y el caso 4 los resultados muestran de manera similar diferencias porcentuales mayores para las regiones localizadas en el Atlántico Norte y Este por fuera del Caribe y en cercanías de las Antillas menores al interior del Caribe cuando se comparan con los resultados obtenidos al interior del Caribe hacia el Oeste, Noroeste, centro y Suroeste del Caribe con valores de diferencias porcentuales muy bajas (inferiores al 2%). Los tiempos de simulación para ambos casos son muy similares con un valor de 5.26 h para el dominio más extendido hacia el Este del Atlántico y de 3.71 h para un menor dominio hacia el Atlántico Este para los mismos tamaños de malla. Las diferencias más altas obtenidas en el exterior del Caribe y en zonas al interior del Caribe en zonas cercanas a las Antillas menores y en menor proporción en las Antillas mayores parecen indicar la importancia de considerar la energía proveniente de las zonas más lejanas del Atlántico Este ante un bajo costo computacional (diferencia de 1.55 horas).

Dado que los resultados para las zonas más importantes del Proyecto se encuentran al interior en la zona suroeste

donde los errores porcentuales para todos los análisis realizados de los dominios extendidos hacia el Atlántico Norte y Este presentan resultados muy bajos, para simulaciones de largo plazo puede ser recomendable emplear un dominio más reducido hacia el Atlántico Este y el Atlántico Norte para las mismas resoluciones de mallas (1/3° Atlántico) y un (1/6° Caribe). Complementando estos resultados con los obtenidos para los tamaños de malla donde se tienen diferencias porcentuales muy bajas para las resoluciones de 1/6°, 1/12° y 1/24° de los casos 6 y 7 y 1 y 3, con tiempos computacionales de 5.26 horas para el caso 1; 12.6 horas para el caso 3, 27.1 horas para el caso 6 y 175.3 horas para el caso 7, parece claro que el aumento en los tiempos computacionales para mallas de 1/12° y un 1/24° para el Caribe e inclusive 1/6° para el Atlántico no son necesarias dados los altos costos computacionales y las bajas reducciones en las diferencias porcentuales para ejecuciones con más baja resolución de 1/3° en el Atlántico y 1/6° para el Caribe.

Como conclusión general del análisis de sensibilidad de mallas y de dominios es recomendable emplear una resolución de 1/3° para todo el Atlántico y una resolución de 1/6° para el Caribe colombiano. La extensión del dominio se recomienda emplear entre los 7°N – 40°N y los 90°W y 40°W, para simulaciones continuas de largo plazo.

Considerando que los resultados muestran poca influencia hacia el oeste y el suroeste del Caribe en la zona de influencia del golfo de Urabá (región de aguas profundas cercanas a la entrada) de la energía entrante al Caribe proveniente del Atlántico Este a través de las Antillas menores y del Atlántico Norte a través de las Antillas mayores, así como los mayores requerimientos computacionales, se realizará la modelación para las escalas oceánicas con una resolución de 1/6°, sin dominio extendido para la región del Atlántico.

Fases II y III: Parametrizaciones y análisis de sensibilidad – Optimización de parámetros físicos (Fase II y III)-Escala Oceánica y local

Para efectos del cumplimiento de la Fase II de calibración, se usaron los resultados presentados en estudios previos como los de Osorio et al. (2016) y Montoya et al. (2018), los cuales se han basado en el trabajo de Montoya (2014). En estos estudios se empleó como mejor parametrización en el Caribe la presentada por Tolman y Chalikov (1996). Los resultados muestran como parámetro más sensible de la parametrización de TC (1996), al Coeficiente de velocidad efectiva del viento STABSH (C0).

Para la Fase II de optimización de parámetros se procedió a realizar la optimización de dicho parámetro empleando el método de Adaptive Random Search (ARS). Hay muchos métodos propuestos para el desarrollo de ARS (Búsqueda aleatoria adaptativa), sin embargo, para el presente estudio se realizó una búsqueda simple del parámetro óptimo contrastando los datos simulados F (x) con los datos experimentales, variando sistemáticamente cada parámetro X La función a empleada fue el Error Cuadrático Medio (RMSE) entre los datos modelados in

$$RMSEm = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(Hsm - Hso)^2}{Hso} \right] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(Tpm - Tpo)^2}{Tpo} \right]}$$

Donde, N: Número de datos disponibles

Hsm: Altura de ola significante para los datos modelados [m]

Hso: Altura de ola significante para los datos observados [m]

Tpm: Período Pico modelado [s]

Tpo= Período Pico observado [s]

Hso: Altura de ola significante media obtenida a partir de los datos observados

Tpo: Período Pico medio obtenido a partir de los datos observados

situ, debido a que para los parámetros escalares del oleaje como altura de ola significante (Hs) y el Período Pico (Tp) o medio (Tm) por lo general el valor óptimo obtenido de forma independiente al minimizar el valor de RMSE difiere entre ambos, se propuso una modificación al método tradicional para el cual se optimiza el RMSE normalizado considerando ambas variables: altura de ola significante (Hs) y Período Pico (Tp).

La anterior expresión puede emplearse cuando se tiene una única malla con información y más de una boya *in situ* de dos formas diferentes. La primera de ellas es tomar la sumatoria de la altura de ola significante para todos los valores de todas las boyas y estimar el valor medio de todas las boyas (Hso) y de forma similar para el Período pico. La otra opción es aplicar las sumatorias internas de Hs y Tp de manera independiente para cada boya y estimar de manera independiente para cada boya (Hso y Tpo).

Para ejecuciones en la versión multigrad del modelo WWIII, se propone la utilización de la ecuación de manera independiente para cada malla. Es decir, para cada malla se emplearon las boyas localizadas en cada una de dichas mallas de manera independiente. Para la información disponible se empleará la Boya 42056 (Figura 8.2.2A) para la optimización del parámetro STABSH para la malla del Caribe y la boya de Capurganá (CAP) para la optimización de la malla Urabá (Ver tabla 8.2.1 y figura 8.2.2). Para empezar con el proceso de optimización se realizó una modelación de prueba para verificar el comportamiento de los parámetros, en dicha modelación se emplearon las mallas, do-

AREA	Latitud (grados)	Resolución (grados)	Valor STABSH (Co)
CARIBE	(7-23)	(1/4 - 1/4)	1.38 (Default)
Colombia	(7.5-14)	(1/12 - 1/12)	1.38 (Default)
Urabá	(7.5-10)	(1/60 - 1/60)	STABSH= 1.80

Tabla 8.2.5 Valores iniciales de prueba para el proceso de optimización de parámetros. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

minios y parámetros para el Caribe y la zona del golfo de Urabá presentadas en la tabla 8.2.5 y la figura 8.2.3A. Las batimetrías de las tres mallas fueron obtenidas de la base de datos ETOPO1 (gridgen) y los vientos corresponden a los empleados para el proceso de sensibilidad de mallas y dominios (CFSR). La malla del Caribe fue seleccionada en

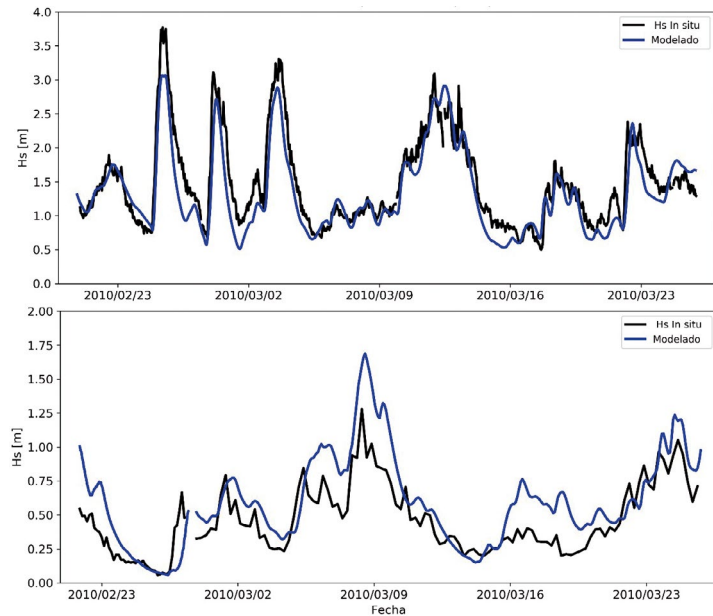


Figura 8.2.5 Serie de tiempo modelada y medida para la boya 42056 de la National Data Buoy Center (NDBC) (Arriba) y (Abajo) la boya de Capurganá, durante el proceso inicial de optimización. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

proceso de sensibilidad de dominios, tamaños de mallas y pasos de tiempo presentados en la sección anterior.

La figura 8.2.5, presenta los resultados obtenidos para esta simulación.

Después de aplicar un proceso de optimización combinado de los parámetros para las tres mallas empleadas, los resultados de la calibración para la malla del Caribe dataron un valor óptimo para el Caribe de 1.52, no obstante, para tener resultados con menor error cuadrático medio en la malla del golfo de Urabá (donde se ubican las zonas de estudio) el parámetro óptimo para el Caribe se tomó como 1.368. Para la malla del golfo de Urabá se tienen que la diferencia de valores de RMSE son mínimos cuando el parámetro STABSH alcanza valores <1, lo que indica que darle valores más bajos no implicaría errores proporcionalmente menores.

Como se mencionó anteriormente, para no forzar demás la física del modelo y caer en procesos contraproducentes al efecto de la calibración (mejorar los resultados), se opta por tomar un valor de STABSH de 0.912 para la malla intermedia y del golfo de Urabá.

8.2.3.2.2 Modelación de oleaje (Escala Local-golfo de Urabá)

Como fue mencionado anteriormente para la modelación a escala local se usó el modelo SWAN, considerando la alta complejidad que comprende realizar una simulación del golfo de Urabá. Los procesos que se consideraron en las simulaciones practicadas con SWAN son: generación de oleaje por el viento (Komen y otros., 1984 y Cavaleri y Rizzoli 1981), whitecapping (Komen y otros., 1984), fricción del fondo (Hasselmann y otros., 1973), rotura del oleaje inducida por la profundidad (Battjes y Janssen, 1978), in-

teracciones no lineales onda-onda (cuadrupletas y triadas, Hasselmann y otros., 1985 y Eldeberky y Battjes (1995) y difracción.

Se usó una discretización espectral con 30 frecuencias y 36 direcciones usando una frecuencia inicial de 0.042, con un factor de incremento de la frecuencia igual a 1.1 y un paso de tiempo de cálculo de 30 minutos. En relación con la malla batimétrica empleada para la simulación con el modelo SWAN, se utilizaron los datos proporcionados por la base de datos de relieve mundial ETOPO1 (Amante, C., y Eakins, B., 2009) y las cartas náuticas 043 y 412 de DIMAR digitalizadas, para la primera malla, la cual cuenta con una resolución espacial de 0.0045° x 0.0045° equivalente a una resolución de 500m x 500m.

Para las simulaciones empleando la malla de SWAN, se usaron campos de vientos proporcionados por la reanálisis CFSR con una resolución espacial de 0.5° X 0.5° y como condición de frontera espectros direccionales de oleaje calculados con el modelo WAVEWATCH III. En esta malla inicial de simulación se realizó el proceso de calibración

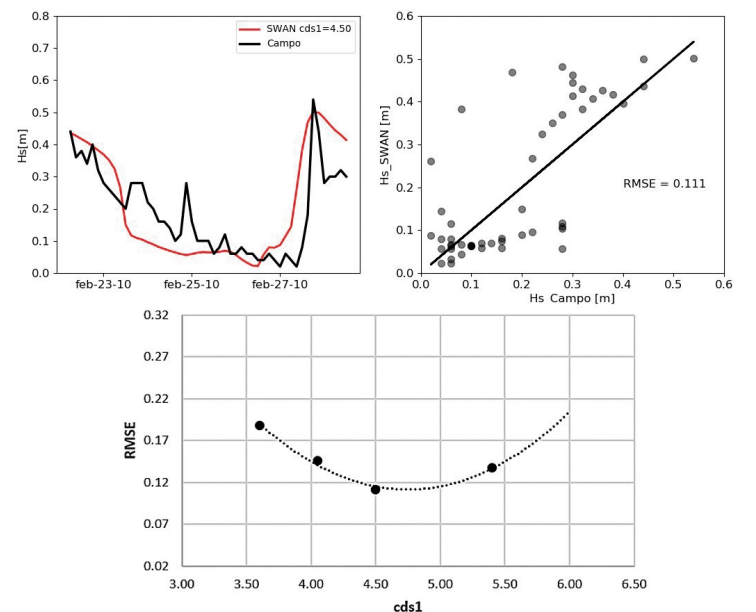


Figura 8.2.6 Serie de tiempo obtenida para el parámetro óptimo de cds1 (arriba), curva de optimización del parámetro cds1. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

usando la serie de altura de ola significativa medida en Necolí (NEC) (Ver figura 290A), a partir de la cual se aplicó un proceso de optimización del parámetro de la tasa de disipación por whitecapping cds1, cuyo valor por defecto es de 4.5. En la figura 8.2.6 se presenta la validación de la serie de altura de ola significativa obtenida para el valor óptimo del coeficiente cds1, así como la curva de optimización para dicho parámetro.

Para realizar el proceso de validación se compararon las salidas de los modelos WAVEWATCH III y SWAN con los datos proporcionados por la DIMAR (ver figura 8.2.2A), localizada en las coordenadas 76°56'55"W y 8°50'59"N, este punto tiene una profundidad aproximada de 30 m. El período de comparación es tres meses (Oct, Nov, Dic) del

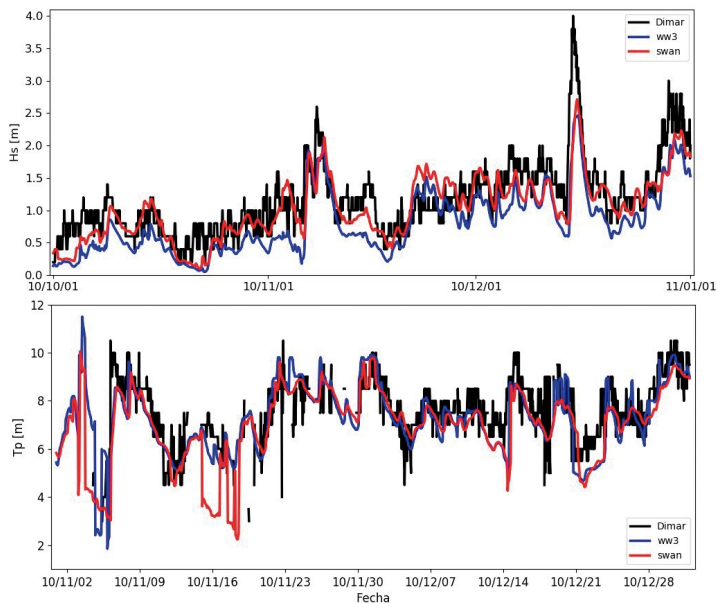


Figura 8.2.7 Validación del modelo SWAN y WAVEWATCH III contra mediciones in situ boya DIMAR. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

2010. La figura 8.2.7, muestra los resultados obtenidos para la altura de ola significativa H_s y el período pico (T_p).

Los resultados muestran un mejor ajuste para el período Pico y una leve disminución en la calidad de los datos obtenidos para la altura de ola significativa para el modelo SWAN. A partir de los parámetros óptimos, y los tamaños de malla, y el dominio definido en el proceso de calibración y validación, se procedió a la modelación del oleaje para un período comprendido entre enero de 1999 a diciembre de 2017 (19 años). A continuación, se presentan los resultados

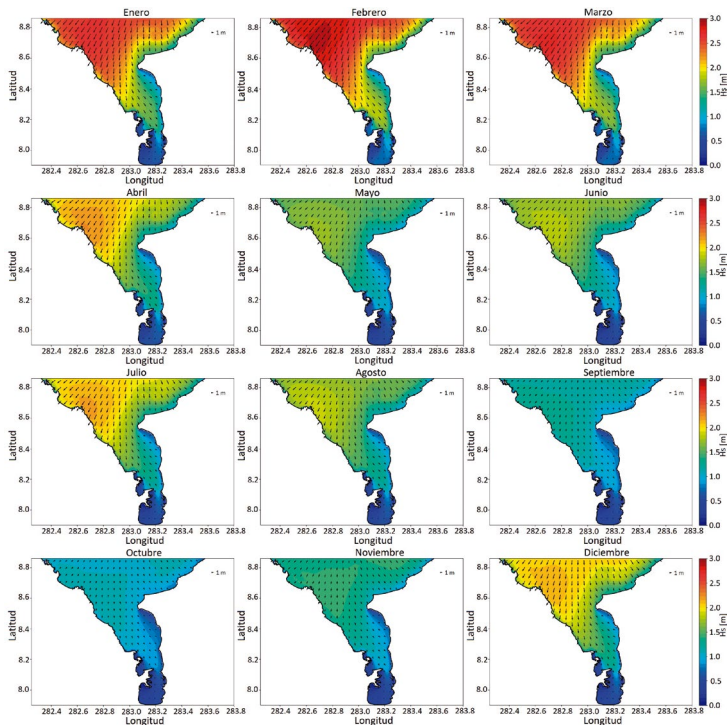


Figura 8.2.8 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (H_s) para la región del golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

obtenidos a partir de la parametrización de Tolman y Chalikov (1996).

Análisis espacial del oleaje – golfo de Urabá

Se presenta el patrón espacial del ciclo anual de la altura de ola significativa H_s (Figura 8.2.8) y período pico (T_p) (Figura 8.2.9), para la región asociada al golfo de Urabá.

En el gráfico del ciclo anual se observan para la altura de ola significativa (H_s) los dos periodos de máximas alturas durante los meses de Diciembre-Enero-Febrero-Marzo (época seca) y Junio-Julio-Agosto (época transición) con valores significativamente más altos durante el primer trimestre del año como lo han reportado diferentes autores para el Caribe (Osorio et al., 2016). Sin embargo, es importante destacar que, para la zona, de forma diferente a lo observado para la mayor parte del Caribe por otros autores, se observa un máximo durante el mes de Julio más marcado respecto a los meses de Junio y Agosto. Los períodos de mínimos valores se observan durante los meses de Mayo y Junio y Septiembre-Octubre-Noviembre (época húmeda) como se presenta para la mayor parte del Caribe, asociado con el debilitamiento de los vientos alisios del noreste. Dicho patrón es observado en general para la parte central y Oeste del Caribe, y se preserva para la mayor parte del golfo de Urabá. Este patrón del ciclo anual es coherente con los valores observados hacia la parte este del Caribe. Dicho ciclo anual presenta variaciones importantes según la región del Caribe tal como lo muestran Osorio et al., (2016).

El mes con valores más altos de oleaje corresponde al mes de Febrero con valores promedios del orden de los tres m hacia el noroeste del golfo hacia el Norte en cercanías de Capurganá. El oleaje para dicho mes disminuye gradualmente hacia el Este y hacia el Sur del golfo conservando en dicho patrón valores más altos de oleaje hacia la parte Noroeste a la entrada del golfo y hacia la parte Oeste al interior de este bordeando toda la costa. Para la región Este se observan los menores valores del oleaje bordeando la región costera a lo largo del golfo con valores que van desde los dos m hasta valores inferiores a un m para la región más cercana a aguas someras de la costa Este del golfo. Hacia la parte centro se presentan valores medios que alcanzan los dos m para disminuir gradualmente hacia la región más hacia el Sur con oleajes más débiles para la región de Turbo y bahía Colombia.

Para los diferentes meses del año, la dirección predominante media del oleaje en la parte Norte a la entrada del golfo es del Noreste en dirección Suroeste y va girando de manera gradual hacia la parte este del golfo donde presenta oleajes provenientes del Noroeste hacia el Sureste. El oleaje va cambiando de dirección media hacia el centro y Sur del golfo presentando ahora una dirección media hacia el Sureste. Dicho patrón general de circulación del oleaje medio se conserva para casi todos los meses del año, inclusive para aquellos con oleajes más débiles durante los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre, con valores ligeramente más hacia el Sur. En la figura 8.2.9, se muestran los resultados obtenidos para el período pico (T_p).

Para el período pico (T_p), el patrón espacial presenta

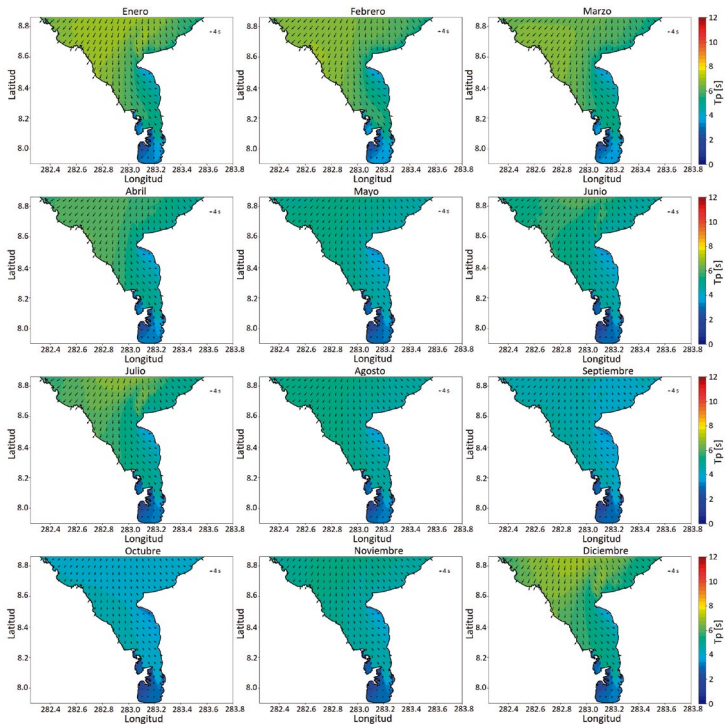


Figura 8.2.9 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (T_p) para la región del golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

valores más uniformes para todo el dominio verificando la menor variabilidad del período pico (T_p), lo cual es coherente con la física del oleaje para la zona de estudio. De manera similar al oleaje se presentan valores máximos para los meses de Diciembre-Enero-Febrero y Junio y Julio. Y valores mínimos durante los meses de Abril-Mayo y Septiembre-Octubre y Noviembre. Los patrones de valores mínimos se observan para los meses de Septiembre y Octubre cuando se presentan oleajes muy débiles. La variación espacial presenta un comportamiento similar a la obtenida para la altura de ola significativa, pero con variaciones espaciales más suaves con valores del orden de los 8 o 9 segundos hacia la parte norte para los meses más energéticos de Diciembre-Enero-Febrero y valores del orden de los cinco segundos para los oleajes más débiles durante los meses de Septiembre-Octubre y Noviembre.

Más hacia el Sur el oleaje presenta los valores más bajos del período pico que oscilan durante los diferentes meses del año entre los cinco a seis segundos.

Para una caracterización espacial y temporal más de-

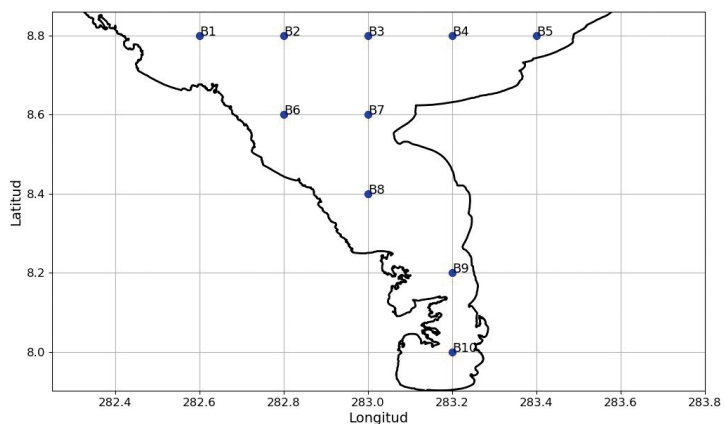


Figura 8.2.10 Ubicación espacial de las boyas virtuales en el golfo de Urabá. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

tallada de la dinámica del oleaje en el golfo de Urabá, se definieron una serie de boyas virtuales a lo largo del golfo de manera que se tuviera una representación espacial del

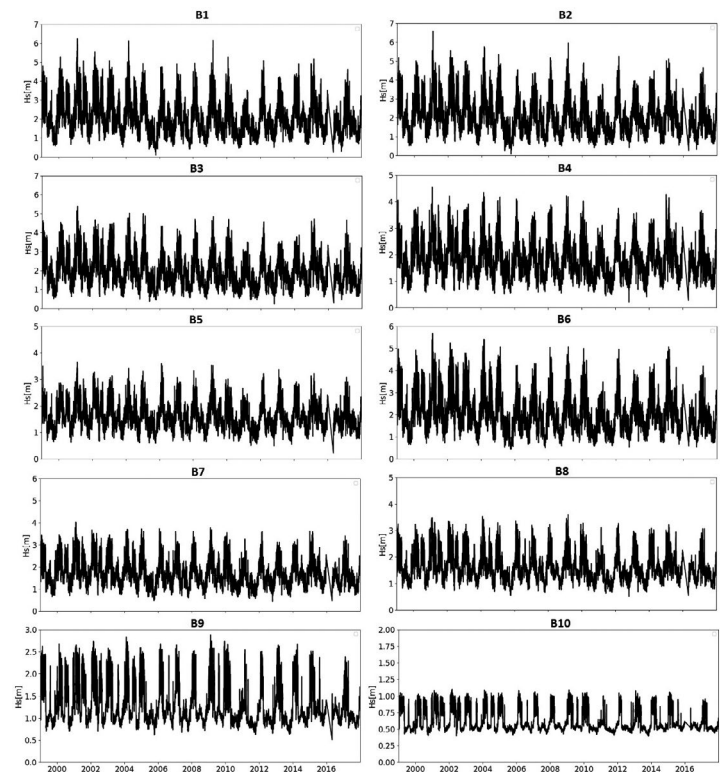


Figura 8.2.11 Series de altura de ola significativa (H_s) para las boyas virtuales designadas. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

dominio aproximadamente uniforme. Las boyas virtuales seleccionadas a lo largo del golfo de Urabá se presentan en la figura 8.2.10.

En las figuras 8.2.11 y 8.2.12 se presentan las series de H_s y T_p obtenidas de las boyas virtuales datadas anteriormente para todo el periodo de simulación.

Los resultados obtenidos para las series históricas de altura significativa (H_s) a lo largo del golfo de Urabá, muestran alta variabilidad con valores que oscilan entre H_s muy bajos inferiores a 0.5 metros para la zona interna a valores máximos del orden de los 6.5~ metros para la parte noroeste del golfo, lo cual es coherente con los valores observados promedios del patrón espacial (Figura 2.97). Se observa un ciclo de máximos valores repetitivo en la serie durante los meses de Diciembre, Enero y Febrero y Junio-Julio y Agosto que se conserva para todas las boyas seleccionadas.

Las boyas virtuales B1, B2 y B3 presentan los valores más altos de altura de ola significativa debido que se encuentran en aguas profundas hacia el noroeste a la entrada, mientras que las boyas B4 y B5 a pesar de estar en la zona externa del golfo se encuentran en aguas más someras, lo que produce pérdidas en la altura del oleaje por efectos de asomeramiento. Otro factor influyente en dicho patrón espacial puede ser debido a la variabilidad espacial del patrón de vientos cercanos a la zona de entrada al golfo hacia el Suroeste del Caribe. Las boyas virtuales B6, B7 y B8 al estar en aguas profundas presentan valores cercanos a un metro

hasta valores de 5.5 metros, con valores más altos para la boya B6 localizada hacia el Oeste lo cual es coherente con los resultados promedios presentados en el patrón espacial. Cabe resaltar que la boya B6 y B7 están en profundidades similares (-55 y -51 respectivamente) pero la boya B6 presenta mayores alturas de ola respecto a B7, esto puede ser producido por la conformación batimétrica del golfo de Urabá, teniéndose a B7 más cerca a punta Caribana, la cual es un cabo que puede estar modulando el proceso de disipación de energía del oleaje al propagarse al interior del golfo de Urabá. Para las boyas B9 y B10 se presentan las alturas de oleaje menores respecto a las demás boyas virtuales con valores que oscilan entre los 0.9 m y los 2.8 m para la boya B9 más hacia el Norte y entre los 0.5 y los 1.2 m para la boya B10 más hacia el Sur. Es importante resaltar que el patrón de oleaje hacia el Sur en cercanías de la zona de Turbo y bahía Colombia puede presentar alteraciones asociadas a la pobre resolución disponible de los vientos de

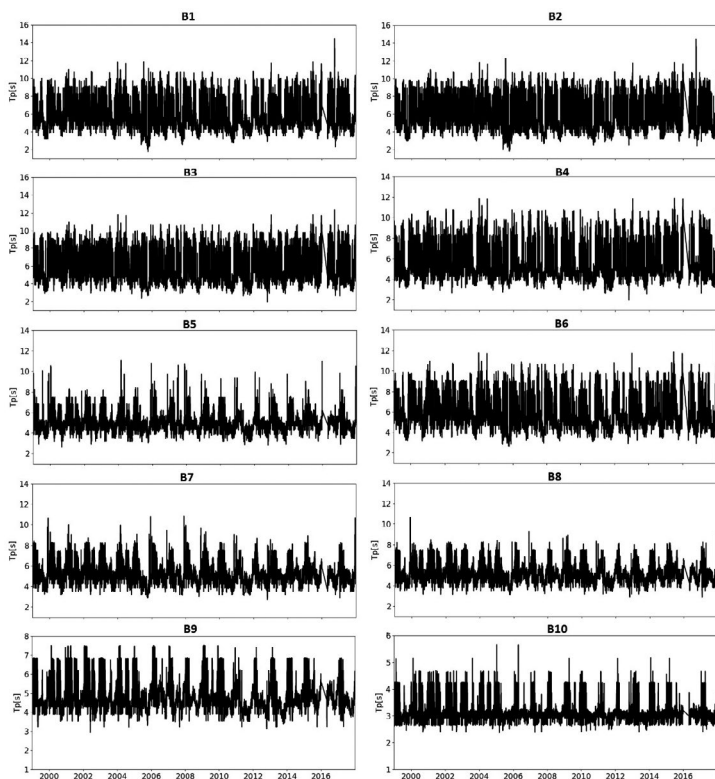


Figura 8.2.12 Series de periodo pico (T_p) para las boyas virtuales designadas. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

CFSR para dicha zona.

Otro aspecto asociado a la variabilidad espacial es que el golfo de Urabá puede estar seccionado en dos zonas espaciales: una es la zona norte exterior, marcada por oleajes tipo *swell*, propagados desde el Caribe y la otra es la zona interna, abrigada por las distintas geformas como cabos y deltas y modificaciones batimétricas que originan una mayor disipación del oleaje.

Para el período Pico (T_p), se observan valores que oscilan predominantemente entre los 3 y los 13 segundos. Los valores más altos presentan variaciones entre los 8 y 12 segundos durante los meses de oleaje más energético de Diciembre-Enero- Febrero. Es importante mencionar que la aparente tendencia observada para los datos de altura

de ola significativa no aparece tan marcada en los registros observados para la serie de Período Pico.

De forma similar se presentan los resultados a nivel direccional del oleaje en la figura 8.2.13, se presentan las rosas de oleaje para todas las boyas virtuales definidas en la figura 8.2.10.

Los resultados obtenidos para la rosa de oleaje muestran como el oleaje predominante del Caribe proviene de la dirección Noreste (NE) y Norte-Noreste (NNE) con probabilidades de ocurrencia de alrededor del 56% y 26% respectivamente para (B1). Para las boyas B2, B3, B4 y B5 se puede notar como el oleaje swell generado en el Caribe se modula en la dirección en función de la conformación batimétrica y los vientos alisios predominantes en la zona. Para la boya B2 se presenta un componente de mayor recurrencia proveniente de la dirección (NNE) con porcentajes de ocurrencia del 37.6% y una disminución en el porcentaje de ocurrencia en la componente (NE) con un valor de 33.9%. Para las boyas más hacia el Este se verifica el giro gradual del oleaje al observar componentes predominantes más hacia el Sur o inclusive hacia el Sureste, con aumentos en la componente (N) para la boya virtual B3 con valores de 28% de probabilidad de ocurrencia en dicha dirección (mayor al observado para las boyas B1 y B2 de 27% y 19% respectivamente), para dicha boya se conserva un mayor porcentaje de ocurrencia del orden de 42%. Para las boyas localizadas hacia la parte Este del dominio B4 y B5, se presenta una componente de gran probabilidad de ocurrencia

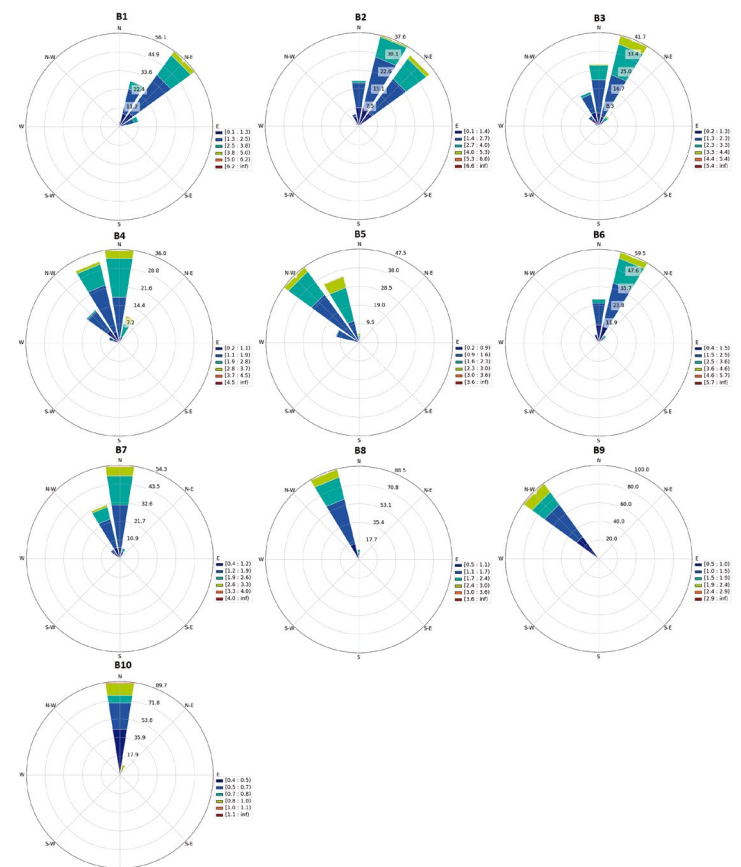


Figura 8.2.13 Rosas de oleaje para las boyas virtuales definidas en la figura 8.2.10. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

(36%) y (47.5%) provenientes del NNW y NW respectivamente en dirección Sur-Este hacia el interior del golfo. Para todas las boyas localizadas al Norte a la entrada del golfo, las olas más energéticas disminuyen en la dirección Este presentando porcentajes de recurrencia inferiores al 5% para todas las boyas y valores que van desde 3.8 a 5 m, 4 a 5.3 m, 3.3 a 4.4m, 2.8 a 3.7 y 2.3 m a 3m para las boyas B1 a B5 respectivamente, verificando la disminución de la magnitud del oleaje hacia el Este.

Para las boyas B6, B7 y B8 puede observarse el proceso de propagación del oleaje al adentrarse dentro del golfo, generando una menor distribución direccional con un oleaje más organizando con direcciones predominantes más hacia el Suroeste para la boya más hacia el Este del golfo y más hacia Sureste para la boya más cercana al Este. Estos resultados corroboran los resultados obtenidos en el análisis espacial donde la dirección media predominante hacia el Oeste del golfo presenta una dirección media hacia el Suroeste para posteriormente girar hacia el Sur y el Sureste en la región Este del golfo. Las direcciones predominantes para estas boyas corresponden a las direcciones (NNE) con un porcentaje de ocurrencia de 59.5%, hacia el Norte (N) con un porcentaje de ocurrencia del 27% aproximadamente para la boya B6, dirección Norte (N) con un porcentaje de recurrencia del 54.3% y Norte-Norte-Oeste (NNW) con un porcentaje de ocurrencia de 32% aproximadamente para la boya B7, y por último una dirección del oleaje altamente recurrente con una probabilidad de exce-

dencia de 88.5% hacia el Norte-Norte – Oeste (NNW), verificando nuevamente el giro de la dirección predominante del oleaje al interior del golfo más hacia el Sureste.

Para las boyas más hacia el Sur en la región al Norte de Turbo y bahía Colombia el oleaje medio proviene de la dirección Norte-West (NW) en dirección Sureste con un 100% de probabilidad para la boya B9 y con un 89.1% de probabilidad de ocurrencia en dirección Norte (N) para la boya B10.

Para mejorar la estadística descriptiva del oleaje del área de estudio y determinar condiciones probabilísticas de ocurrencia de los parámetros integrales del oleaje. Se presenta en la figura 8.2.14 la probabilidad conjunta H_s y T_p en la boya virtual designada.

Se presentan las gráficas de probabilidad conjunta, con el eje de las abscisas como la altura de ola significativa y el eje de las ordenadas como el período pico. Los resultados obtenidos muestran como los datos más predominantes para la zona externa del golfo de Urabá y en aguas profundas durante el período de simulación corresponden a oleajes alrededor de los 0.3 m para periodos pico cercanos a los 2 segundos y hasta una altura de ola significativa entre 5 y 6 metros y periodos entre los 12 y los 14 segundos.

Para las boyas más hacia el Norte las mayores probabilidades de ocurrencia se presentan entre los uno y tres metros para periodos pico entre 2.5 segundos y siete segundos (Boyas B1, B2, B3). Más hacia el Noreste donde el oleaje se debilita la boya B4 muestra valores con las mayores probabilidades de ocurrencia para alturas de ola significativa entre 0.7 m y 2.5 m para periodos de 4 segundos y 8 segundos respectivamente y para B5 y entre 0.6m y 1.6 m para periodos de 3 segundos y 7 segundos. Estos valores disminuyen gradualmente hasta valores de 0.5 a 0.7 m para periodos de 2.5 segundos hasta 3.5 segundos para la boya más hacia el Sur en bahía Colombia (B10).

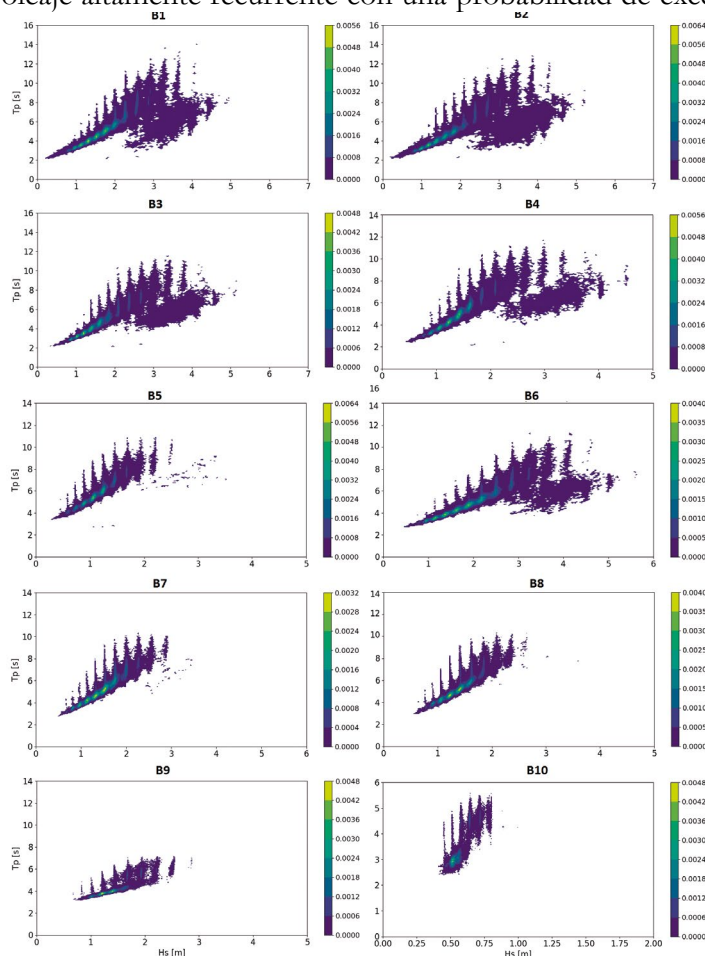


Figura 8.2.14 Probabilidad conjunta $H_s - T_p$, para las boyas virtuales definidas en la figura 8.2.10. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

8.2.3.2.3 Variabilidad del oleaje para condiciones ENSO (Fase fría la Niña y cálida el Niño)

Según Montoya et al. (2015) en el trimestre EFM (época seca) y durante la fase fría del ENSO (La Niña), se presenta una intensificación de los vientos Alisios debido a la presencia del chorro de bajo nivel de San Andrés.

Este chorro se presenta principalmente en la parte central del Caribe entre los 13° y los 14° de latitud norte, y entre los 79°W y los 73°W. Para analizar la distribución espacial del oleaje para las diferentes fases del ENSO (La Niña, El Niño y Normal) se presentan las gráficas de promedios mensuales multianuales de la altura de ola significativa para las fases del ENSO *Niño*, *Niña* y normal en las figuras 8.2.15, 8.2.16, y 8.2.17 se presentan los mapas espaciales de variación de altura de ola para las diferentes fases del ENSO.

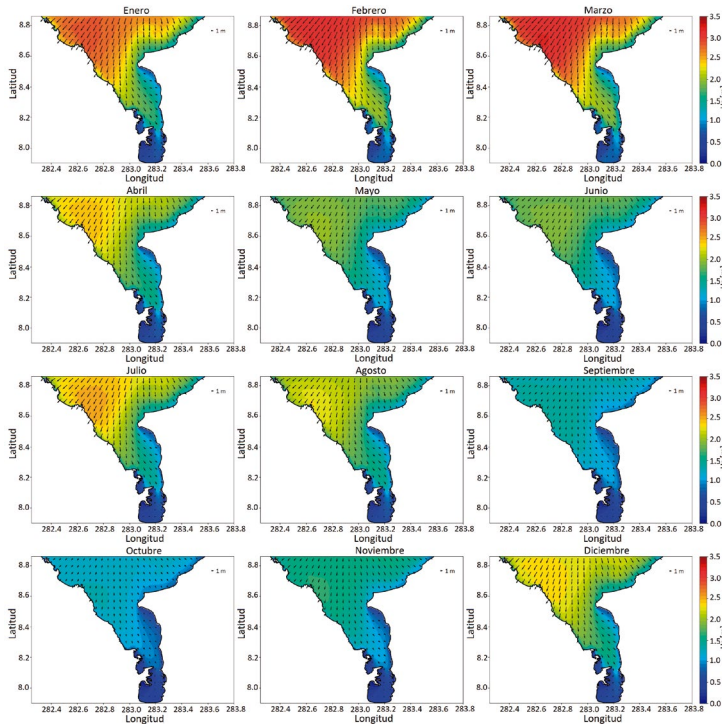


Figura 8.2.15 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (H_s) para la región del golfo de Urabá, caso Niño. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

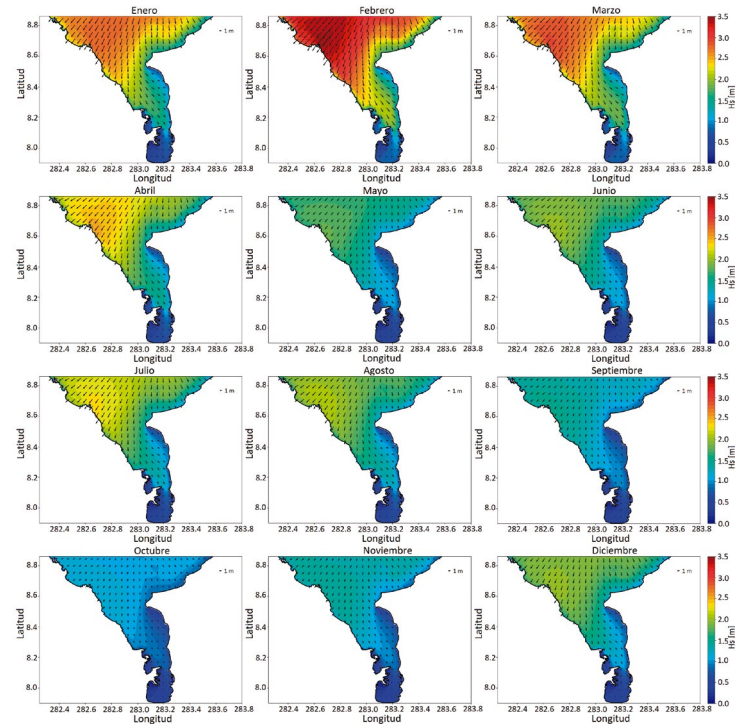


Figura 8.2.17 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (H_s) para la región del golfo de Urabá, caso Normal. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

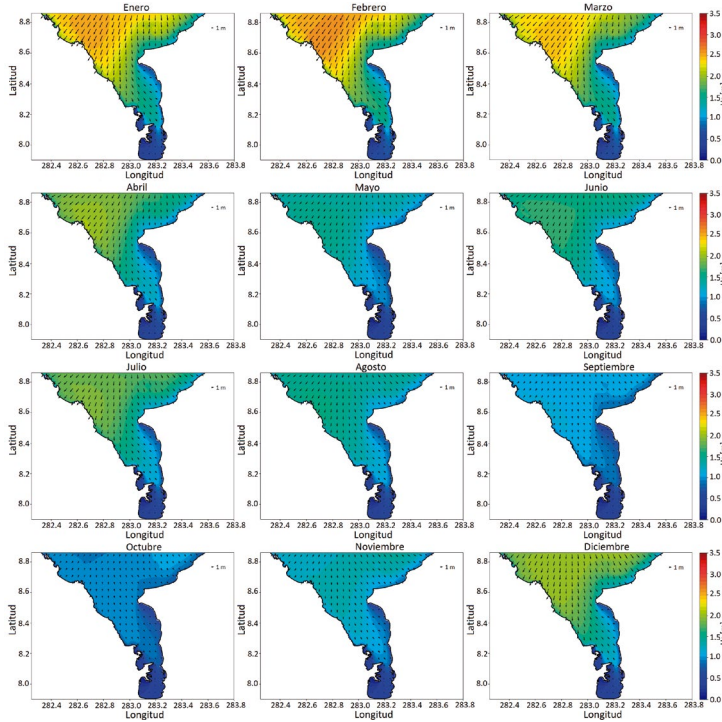


Figura 8.2.16 Patrón espacial para el ciclo anual de la altura de ola significativa (H_s) para la región del golfo de Urabá, caso Niña. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

De igual manera se presentan el ciclo anual del período pico del oleaje (T_p) para las fases del ENSO Niño, Niña y normal en las figuras 8.2.18, 8.2.19 y 8.2.20, respectivamente.

El clima del Caribe es ampliamente dependiente de las condiciones climáticas generadas por fenómenos macro climáticos de gran escala como el ENSO, durante sus fases fría (*La Niña*) y la fase cálida (*El Niño*). El conocimiento de la variabilidad espacial del oleaje para dichas condiciones es de vital importancia para diferentes aplicaciones científicas e ingenieriles. El conocimiento de las diferencias existentes

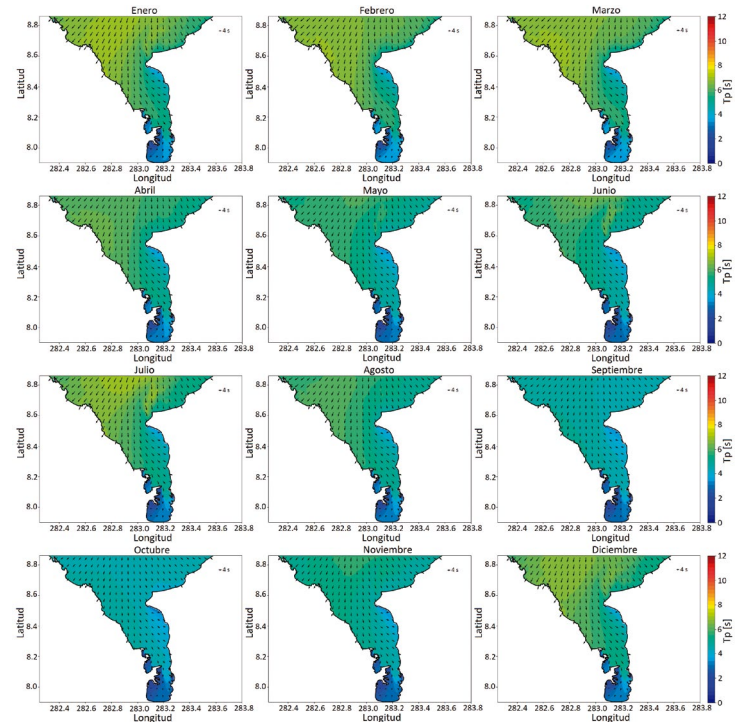


Figura 8.2.18 Patrón espacial para el ciclo anual del período pico (T_p) para la región del golfo de Urabá, caso Niño. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

entre ambas fases de una zona o región puede dar una idea más adecuada de las estrategias para mitigar los impactos causados por la una o la otra. Permite entender la magnitud de los eventos asociados a cada una de dichas fases del ENSO y los órdenes de magnitud generados.

Montoya y otros., (2016), muestran como para la parte-suroeste del Caribe en la región del golfo de Morrosquillo se presentan valores ligeramente más altos de altura de ola significativa del ciclo anual durante los meses de Febrero-Marzo- Abril (FMA) durante la fase fría del ENSO

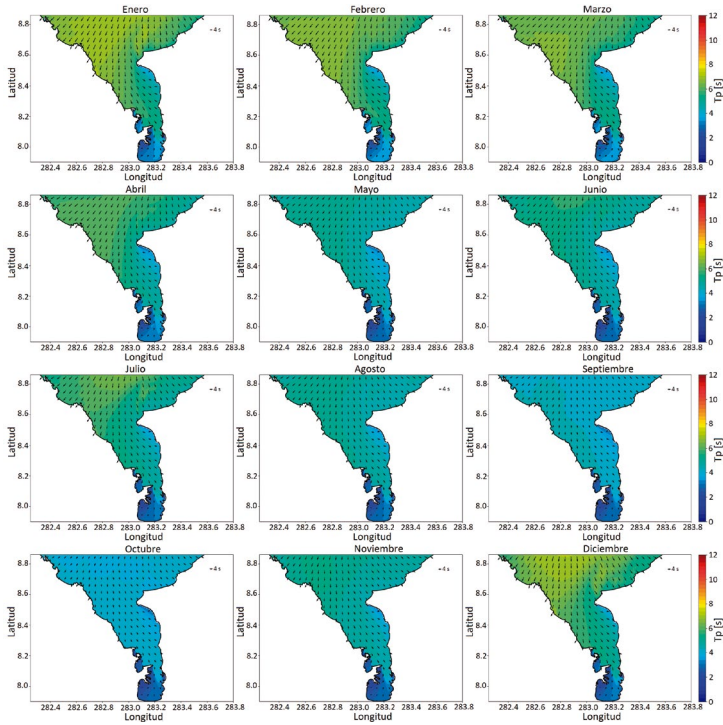


Figura 8.2.19 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (T_p) para la región del golfo de Urabá, caso Niña. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

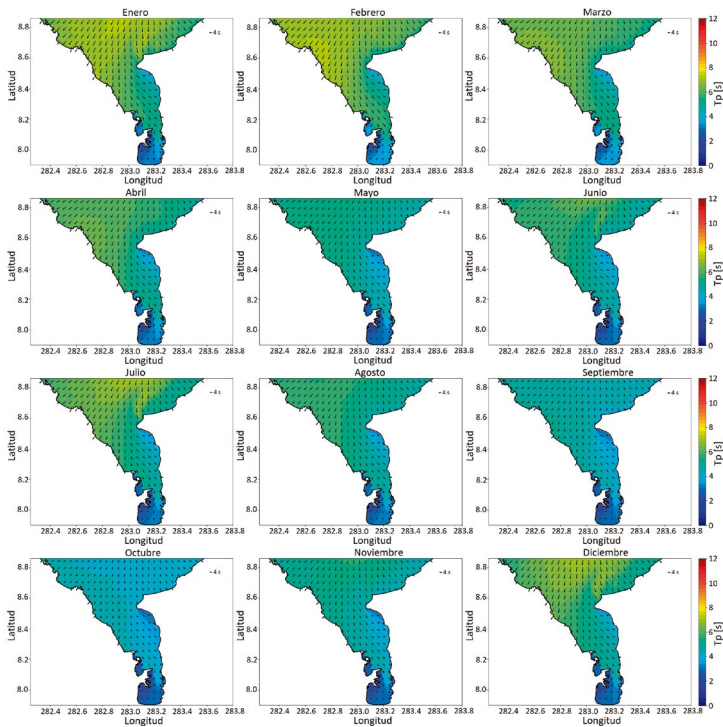


Figura 8.2.20 Patrón espacial para el ciclo anual del periodo pico (T_p) para la región del golfo de Urabá, caso Normal. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Oleaje).

(La Niña) e inclusive para condiciones normales para los mismos meses. Posteriormente durante los meses de Julio-Agosto – Septiembre dicha situación se invierte mostrando mayores valores de altura de ola significativa durante la fase cálida del ENSO (El Niño).

Para los meses de Febrero-Marzo y Abril, para el golfo de Urabá la distribución espacial del oleaje durante la ocurrencia de la fase cálida del ENSO (*El Niño*) parece contradecir el comportamiento observado por Osorio et

al, (2016) pues se observan valores mayores de altura de ola significativa durante la ocurrencia de la fase cálida del ENSO (*El Niño*) para casi toda la zona de estudio con diferencias más significativas hacia el Oeste y Noroeste del golfo (valores alrededor de 2.5 m a 3.2 m hacia el Noroeste y entre 1.0 m hasta 2.5 m hacia la parte centro y este del golfo durante el *Niño* y valores alrededor de 2.2 a 2.7 m hacia el Noroeste y entre 1.0 m hasta 2.2 m hacia la parte centro y este del golfo durante el *Niño*).

Para los meses de Junio-Julio y Agosto se presenta el mismo comportamiento al descrito por Osorio et al., (2016), con valores más altos para gran parte de la zona de estudio durante las condiciones del Niño. Durante los meses de Septiembre-Octubre y Noviembre (SON) los resultados obtenidos durante la fase fría del ENSO (*La Niña*) presentan alturas de ola significativa inferiores a las obtenidas durante las condiciones de la fase cálida del ENSO (*El Niño*) con valores entre 1.0 m y 1.2 m hacia el Norte y valores inferiores a un metro hacia el Sur del golfo.

Durante las condiciones normales, los patrones espaciales muestran resultados muy similares a los obtenidos durante la fase Cálida del ENSO (*El Niño*), con mayores valores durante el mes de Febrero para casi toda la zona de estudio (Valores máximos medios alrededor de 3.5 para la zona más energética al oeste y noroeste del golfo).

Para los meses de Diciembre, Enero y Marzo se presenta una ligera disminución en la altura de ola promedio durante condiciones normales cuando se compara con el análisis durante la fase cálida (*El Niño*).

8.2.4 Referencias

Agudelo, P.A., Hoyos, C.D., Curry, J.A., Webster, P.J. (2011). Probabilistic discrimination between large-scale environments of intensifying and decaying African Easterly Waves. *Clim Dyn* (2011) 36:1379–1401.

Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random wave. *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, Hamburg*, 569-587.

Eldeberky, Y. and Battjes, J.A. (1995). “Parameterization of triad interactions in wave energy models”, *Proc. of Coastal Dynamics Conf. 95, Gdansk, Poland*, pp. 140-148.

Amante C and Eakins B W. (2009). ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division.

Blanco-Libreros, J. F., y Londoño-Mesa, M. H. (Eds.). (2016). *Expedición Caribe sur: Antioquia y Chocó costeros*. Bogotá: Secretaría Ejecutiva de la Comisión Colombiana del Océano.

- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). A third generation wave model for coastal regions, part I: model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, vol. no C4, 104, 1999, pp.7649-7666.
- Cavaleri, L., Rizzoli, P.M. (1981). Wind wave prediction in Shallow water – theory and applications. *J.Geoph.Res.*,-8b,CII:10961 -10973.
- Correa, I., & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo), costa Caribe colombiana.
- Galloway WE (1975) Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In: Broussard ML (ed) *Deltas: models of exploration*. Houston Geological Society, Houston, pp 87– 98.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1369-1377.
- Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the JointNorth SeaWave Project (JONSWAP). *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8)*, 12, 95 pp.
- Komen, G. J., Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1984). On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Phys. Oceanogr.*, 14, 1271-1285.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press. 532 pp.
- Montoya RD, Osorio AF, Ortiz-Royero, Ocampo-Torres FJ. (2013). A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds. *Ocean Eng* 2013; 67:100–18.
- Montoya, R.D. (2014). Study of the interactions between large scale climate phenomena and waves in the Caribbean Sea: Methodologies to correct wind speed during average and hurricane conditions for wave climate analysis. Tesis doctored Posgrado recursos hidráulicos. Universidad Nacional. 362p.
- Montoya, R.D., Menendez, M., Osorio, A.F. (2018). Exploring changes in Caribbean hurricane-induced wave heights. *Ocean Engineering* 163 (2018) 126–135.
- Osorio, A.F., Montoya, R.D., Ortiz, J.C., Pelaez, D. (2016). Construction of synthetic ocean wave series along the Colombian Caribbean Coast: A wave climate analysis. *Applied Ocean Research* 56 (2016) 119–131.
- Saha, S., and Coauthors (2006). The NCEP Climate Forecast System. *J. Climate*, 19, 3483–3517.
- Saha, and Coauthors (2010). The NCEP Climate Forecast System reanalyses. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1015–1057.
- Tolman, H. L., Chalikov, D.V. (1996). Source terms in a third-generation wind-wave model. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2497-2518.
- Tolman, H.L. (2002). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III versión 2.22. Technical Note. Available from: <<http://polar.ncep.noaa.gov/waves>>.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp.
- Tolman, H. L. (2014). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp.
- Velásquez, L. (2013). Modelación del transporte de sedimentos tipo en el Golfo de Urabá. Trabajo de grado. Universidad EAFIT. 132p.

8.3 Subcomponente Modelación Circulación Oceánica

Autoras

Yuley Cardona Orozco

(PhD en Ciencias Atmosféricas y Oceánicas)

Luisa Fernanda Gutiérrez Acosta

(MSc en Ingeniería - Recursos Hidráulicos)

8.3.1 Introducción

Los procesos físicos que tienen mayor influencia en la dinámica oceánica al interior del golfo de Urabá son las descargas de los ríos, el esfuerzo del viento y las diferencias de densidad (Lonin y Vasquez, 2005; Montoya, 2010). Los ríos León, Atrato y Turbo descargan sus aguas en el golfo de Urabá causando una alta estratificación salina. El río Atrato es el de mayor relevancia en la modulación de los patrones de circulación en el golfo, con caudales entre 2500 m³/s y 5000 m³/s (Escobar, Velásquez y Posada, 2015). La influencia del río Atrato en la circulación se ve afectada por la dinámica de los vientos, que responden a la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que da lugar a dos épocas climáticas: época seca y época lluviosa (Velásquez, 2013).

Durante la época seca (entre diciembre y abril) los vientos provienen del Norte y del Noreste con velocidades medias de 4 m/s que se intensifican en febrero y pueden superar los 9 m/s al interior del golfo (Chevillot, Molina A., Giraldo y Molina C., 1993; García, 2007, Velásquez, 2013) y en la zona externa del golfo en contacto con el mar Caribe las velocidades medias son de 8 m/s (Restrepo y López, 2008) y pueden superar los 12 m/s y alcanzar hasta 14 m/s como fue encontrado mediante las simulaciones por parte de la Subcomponente Modelación Atmosférica.

Debido a que los vientos son intensos y se dirigen al interior del golfo, producen el desvío hacia el Sur de las aguas menos salinas del río Atrato acumulando grandes volúmenes de agua dulce en el extremo sur del golfo (Chevillot et al., 1993; García, 2007). En la época húmeda o de lluvias (entre agosto y noviembre) los vientos inciden desde el Sur y el Suroeste con velocidades promedio de 2 m/s (Roldan, 2008; García, 2007) promoviendo la salida del agua dulce del río, lo que produce un aumento de la salinidad de hasta 30 psu en el extremo sur del golfo, en bahía Colombia (Chevillot et al., 1993).

En ambas épocas la mayor parte del golfo contiene aguas oceánicas y las aguas dulces se restringen a las des-

embocaduras de los ríos Atrato y León; y al Suroeste de bahía Colombia y permanecen sólo en los niveles superficiales (Chevillot et al., 1993).

Al interior del golfo las corrientes superficiales en la época húmeda se dirigen principalmente hacia el Norte y en el fondo hacia el Sur, presentándose así un patrón de dos capas que puede ser alterado en algunas áreas por la descarga del río Atrato, la marea viva y la interacción con el mar Caribe (Escobar et al., 2015).

Durante la época seca los vientos alisios del Noreste conducen las corrientes superficiales en la dirección Sur, y las corrientes profundas mantienen su dirección hacia el Sur, pero a una profundidad intermedia (aproximadamente a 5 m) las corrientes se dirigen al Norte (García, 2007; Escobar et al., 2015).

Las mayores velocidades se encuentran cerca de los principales tributarios del Atrato con valores hasta de 1.2 m/s y en la costa noreste cerca de punta Caribana. A partir de mediciones (desde agosto 15 hasta noviembre 7 de 2010 en punta Caribana), Escobar et al., (2015) encontraron que en la época de lluvias la parte más externa del golfo presenta corrientes superficiales fuertes, alcanzando valores máximos de 1.12 m/s y promedios de 0.34 m/s, mientras que las corrientes en el fondo alcanzan velocidades máximas y medias de 0.56 y 0.1 m/s respectivamente. La dirección predominante de las corrientes durante esta época es al Noreste.

En general la magnitud de las corrientes al interior del golfo tiene una velocidad inferior a 0.4 m/s con velocidades cerca del fondo que no superan los 0.1 m/s (mediciones de corrientes presentadas por Chevillot y Molina, 1989; CIOH, 1990, 1993); Molina. A., Molina, C., & Chevillot, P., 1992).

8.3.2 Metodología

Para la representación de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá y el litoral antioqueño, se llevaron a cabo simulaciones numéricas, empleando el modelo oceánico regional CROCO²³ (Coastal and Regional Ocean COMMunity model). El pre procesamiento del modelo fue llevado a cabo mediante el uso de CROCO_TOOLS¹. La metodología seguida se resume en la figura 8.3.1.

CROCO es un nuevo modelo oceánico construido con ROMS-AGRIF y el núcleo no-hidrostático de SNH que busca resolver escalas muy finas, especialmente en el área costera y su interacción con escalas mayores. Tiene capacidades de anidamiento bidireccional que permiten la conexión entre la dinámica cercana a la costa y la dinámica costa afuera.

Este modelo resuelve las aproximaciones de diferencias finitas del promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS), utilizando la aproximación hidrostática y de Boussinesq con un algoritmo de paso de tiempo dividido-explicito. Utiliza también una malla horizontal curvilínea Arakawa C y coordenadas verticales que siguen la batimetría (coordenadas sigma). CROCO es un sistema flexible que permite escoger entre varias opciones para muchos de los componentes del modelo como, por ejemplo, diferentes esquemas de advección, sub modelos de turbulencia y condiciones de frontera.

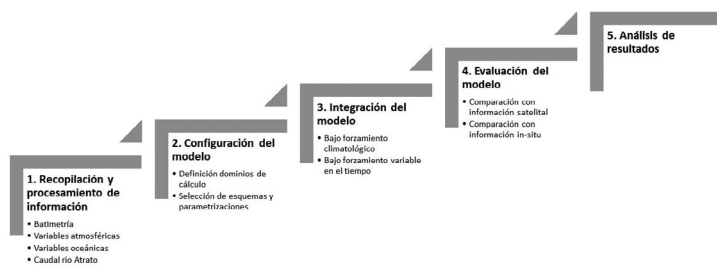


Figura 8.3.1 Esquema metodológico para la representación de las corrientes oceánicas en el golfo de Urabá y el litoral antioqueño. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

8.3.2.1 Recopilación y procesamiento de información

Se compiló la información necesaria para la integración del modelo CROCO: batimetría, caudal del río Atrato, forzadores atmosféricos (flujos de calor, flujos de humedad y esfuerzo del viento) y condiciones de frontera e iniciales oceánicas (temperatura, salinidad, altura del océano y velocidades en la columna de agua). Estos datos fueron procesados y llevados a los formatos requeridos para el preprocesamiento del modelo con CROCO_TOOLS. En la tabla 8.3.1 se presentan las características de las bases de datos recolectadas.

8.3.2.2 Configuración del modelo

Dominio de cálculo

Fueron seleccionados dos dominios de cálculo (Figura 8.3.2): (1) un dominio principal o dominio padre con una resolución horizontal de 2 km que abarca todo el golfo de Urabá y se extiende al Norte hasta la latitud 10.7°N, al Este hasta Cartagena y al Oeste hasta el golfo de Guna Yala en Panamá, el cual incluye fronteras abiertas en el Oeste y Norte, y (2) un dominio anidado con una resolución horizontal de 700 m aproximadamente que se extiende al Este hasta Moñitos en Córdoba y al Oeste hasta Ustupo en Panamá, con frontera abierta en el Norte.

La extensión del dominio padre se seleccionó de tal forma que pudiera capturarse la variabilidad de la Contra Corriente Panamá – Colombia (CCPC), ya que su variabi-

Base de datos	Variables	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo disponible
ETOPO2 + CARTA 412	• Profundidad	1/30° (Aprox. 4 km)	-	-
Estación 11077010 BELLAVISTA (IDEAM)	• Caudal	-	1 día	1970/01/01-2015/12/31
COADS5	• Estrés del viento zonal y meridional • Velocidad del viento y componentes zonal y meridional • Precipitación • Radiación de onda corta • Flujos de calor latente y sensible • Radiación de onda larga • Densidad del aire a nivel del mar • Evaporación menos precipitación • Humedad específica • Humedad relativa • Temperatura del aire en superficie • Salinidad superficial del mar • Temperatura superficial del mar	1/2° (Aprox. 55 km)	Mensual	Climatología
ERA5	• Velocidad del viento y componentes zonal y meridional • Precipitación • Radiación de onda corta • Flujos de calor latente y sensible • Radiación de onda larga • Evaporación • Temperatura del aire en superficie	1/4° (Aprox. 28 km)	1 hora	2009/01/01-2018/05/31
GLORYS12V1	• Temperatura • Salinidad • Componente zonal y meridional de las corrientes • Altura de la superficie del mar	1/12° (Aprox. 9 km)	1 día	1993/01/01-2016/12/29

Tabla 8.3.1 Características de las bases de datos utilizadas para la configuración del modelo oceánico de circulación. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

lidad se relaciona con la magnitud de las corrientes en el golfo de Urabá y en el litoral antioqueño, presentándose corrientes intensas cerca de las costas de Antioquia cuando la CCPC es más pronunciada y cercana a la costa colombiana y menos intensas cuando la CCPC se desplaza al Noroeste. El dominio anidado se definió de modo que fueran incluidos los puntos de interés al interior del golfo (Punta Las Vacas, Zapata, Uveros, Damaquiel, río Hobo y volcán de lodo).

Se seleccionó una resolución de 700 m para el dominio anidado debido a que con esta se obtuvo una solución estable y adecuada para representar los rasgos principales de la circulación en la zona de estudio en inmediaciones de la costa. No se llegó a una resolución más alta, ya que a pesar de que el modelo permite establecer resoluciones mayores, la información atmosférica y oceánica utilizada para el forzamiento cuenta con una resolución muy baja, por lo cual no se obtendrían mejores resultados con el modelo al aumentar la resolución espacial y por el contrario el modelo podría generar datos erróneos. La resolución de dos km para el dominio padre fue seleccionada de tal modo que el factor de refinamiento fuera máximo de 1:3, es decir, tres celdas del dominio anidado por cada celda del dominio padre, ya que diferencias espaciales dema-

siado grandes entre ambas mallas podrían agregar ruido y provocar inestabilidades (Debreu, Marchesiello, Penven, y Cambon, 2012).

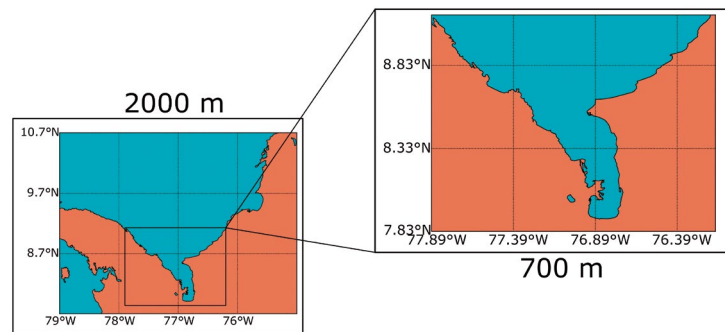


Figura 8.3.2 Dominios de cálculo. Izquierda: dominio principal con resolución espacial de 2km. Derecha: dominio anidado con resolución espacial de 700 m. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

En cada dominio se establecieron 32 niveles verticales con refinamiento en superficie. La distribución de estos niveles fue definida a partir de la batimetría de la base de datos ETOPO2 corregida al interior del golfo de Urabá usando la carta náutica 412. Esta base de datos cuenta con una resolución horizontal de 30 segundos de arco ($0.0083^\circ \sim 925$ m) (Figura 8.3.3). Debido a que los niveles verticales siguen la forma del terreno (niveles sigma), se suavizó la batimetría para evitar inestabilidades por gradientes de presión fuertes; para esto fue definido un parámetro de pendiente $r=0.25$.

Con esta discretización vertical fue posible obtener una separación máxima entre los niveles del fondo de 2.25 m y entre los niveles superficiales de 1.35 m en la parte más profunda del golfo, mientras que cerca del litoral la separación entre niveles fue de aproximadamente 0.15 m.

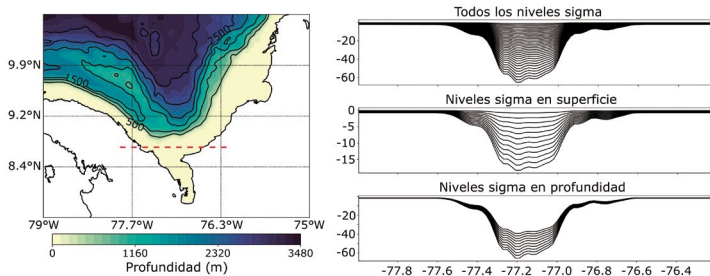


Figura 8.3.3 Batimetría en el golfo de Urabá de la base de datos ETOPO2+URABÁ (izquierda) y Distribución de los niveles verticales a lo largo del transecto (línea roja) ubicado en la latitud 8.7°N (derecha). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Selección de esquemas y parametrizaciones

El modelo fue configurado para resolver las ecuaciones primitivas en 3D incluyendo los términos de coriolis y los términos de advección. CROCO incorpora múltiples esquemas numéricos de alto orden y parametrizaciones físicas para resolver la advección y la mezcla. Para la simulación de la dinámica oceánica fueron seleccionados los esquemas y parametrizaciones detallados en la tabla 8.3.2,

los cuales fueron elegidos con base en los experimentos realizados anteriormente en el Caribe colombiano por el grupo OCEANICOS, los cuales han mostrado un buen desempeño del modelo CROCO.

El modelo fue ejecutado con un paso de tiempo de 120 s para el dominio principal y 40 s para el dominio anidado. Los resultados fueron almacenados con una resolución temporal diaria.

Lateral Momentum Advection	3rd-order upstream biased advection scheme
Lateral Tracer Advection	5th-order WENOZ quasi-monotone advection scheme for all tracers
Vertical Mixing	Generic Length Scale scheme (k-epsilon, Canuto Δ)
Equation of state	Nonlinear equation of state with salinity as an active tracer
Surface forcing	Bulk formulation for Surface heat fluxes
Lateral forcing	Processing of 2D/3D climatological data for nudging layers and open boundary forcing

Tabla 8.3.2 Principales esquemas, parametrizaciones y tipos de fronteras. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

8.3.2.3 Integración del modelo

Se llevaron a cabo simulaciones en dos escenarios principales: (1) bajo forzamiento climatológico, y (2) bajo forzamiento variable en el tiempo

La integración del modelo incluyó el forzamiento debido al viento, los flujos de calor y humedad y el caudal del río Atrato en sus principales bocas (Roto, Matuntugo, Coco Grande y Leoncito), el cual fue estimado a partir de los datos en la estación Bellavista de IDEAM usando la descripción realizada por Escobar et al., 2015. El forzamiento debido a la marea no fue tenido en cuenta debido a su efecto relativamente bajo en la hidrodinámica del golfo (Escobar et al., 2011; Montoya y Toro, 2006).

Integración bajo forzamiento climatológico

El modelo fue ejecutado bajo forzamiento climatológico durante un periodo de 15 años, con el fin de reproducir las condiciones medias de la zona e identificar la configuración más adecuada para la cual el modelo fuera numéricamente estable. Los forzadores atmosféricos y las condiciones de frontera fueron definidas con una frecuencia mensual y fueron construidos utilizando las bases de datos COADS5 y GLORYS12V1, respectivamente. El caudal del río Atrato fue definido a partir de los datos de la estación Bellavista de IDEAM.

Integración bajo forzamiento variable en el tiempo

Se aplicó la integración del modelo bajo forzamiento en tiempo variable para el periodo 2009/01/01 – 2017/12/31. El periodo de simulación fue seleccionado según la disponibilidad de información de la base de datos ERA5 con la que se construyeron las condiciones de frontera y buscando tener al menos un periodo con las tres fases del ENSO (El

Niño, La Niña, Neutro).

Los forzadores atmosféricos fueron construidos a partir de la base de datos ERA5 y fueron definidos con una frecuencia de 3 h. Las condiciones de frontera oceánicas se construyeron con la base de datos GLORYS12V1 y se definieron con una frecuencia diaria. El caudal del río Atrato en cada una de sus bocas principales fue definido con una frecuencia diaria.

En este escenario el periodo de simulación ha incluido dos años (2016 y 2017) periodos en los que no se cuenta con la información completa para la integración. Para el año 2016 los caudales del río Atrato fueron definidos a partir de la climatología de los datos en la estación Bellavista. Para el año 2017, las condiciones de frontera y los caudales del río fueron definidos a partir de valores climatológicos de las bases de datos GLORYS12V1 y estación Bellavista, respectivamente.

8.3.2.4 Evaluación del modelo

Los resultados obtenidos con el modelo bajo forzamiento climatológico fueron comparados con la climatología de las corrientes de la base de datos AVISO, encontrando que este representa las condiciones medias de la zona, por lo que se consideró que estos resultados eran una condición inicial adecuada para la ejecución del modelo bajo forzamiento variable en el tiempo (Figura 8.3.4).

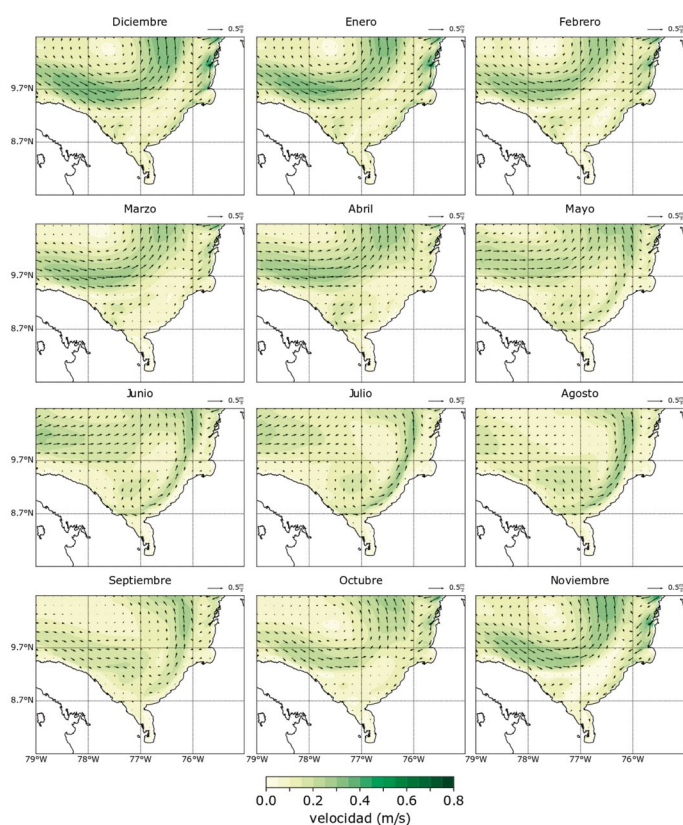


Figura 8.3.4 Climatología de las corrientes obtenida con los resultados de los últimos 13 años de la integración bajo forzamiento climatológico. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Los resultados obtenidos con el modelo integrado bajo forzamiento variable en el tiempo (en adelante M1) fueron evaluados para el golfo de Urabá y el litoral antioqueño, así como los resultados de las simulaciones realizadas por el investigador Julien Jouanno (LEGOS) (en adelante M2), quien en colaboración con el grupo de investigación de la Universidad de Antioquia en la sede de Ciencias del Mar y el grupo de investigación OCEANICOS de la Universidad Nacional de Colombia, realizó simulaciones con el propósito de entender la dinámica oceánica al interior del golfo de Urabá.

Estas simulaciones fueron realizadas para el periodo 01/01/2010 – 31/10/2015, mediante el anidamiento de dos mallas: una malla principal a 2 km y una malla anidada a 500 m y con una resolución temporal de un día.

La evaluación de los resultados producidos por M1 y M2 se realizó utilizando información satelital para los datos en superficie y para los datos en profundidad se utilizó información in situ.

Comparación con información satelital

Los resultados obtenidos con los modelos M1 y M2 fueron comparados con datos de altura de la superficie del mar de la base de datos AVISO, que se relacionan con la componente geostrofica de las corrientes, y con datos de temperatura superficial de la base de datos Reynolds, cuyas características principales se resumen en la tabla 8.3.3.

Base de datos	Variables	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo disponible
Reynolds	Temperatura superficial del mar (SST)	1/4° (Aprox. 28 km)	1 día	1982-presente
AVISO	Altura de la superficie del mar (SSH)	1/4° (Aprox. 28 km)	1 día	1993-presente

Tabla 8.3.3 Características de las bases de datos utilizadas para la evaluación de los modelos M1 y M2 en superficie. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Para esta evaluación se utilizaron los resultados en superficie obtenidos en el dominio padre, debido a la baja resolución espacial y poca cobertura de los datos satelitales.

Para esto se calcularon los promedios mensuales de la altura de la superficie del mar y de la temperatura en las cuatro fuentes de información (M1, M2, AVISO y Reynolds) (Figuras 8.3.5 y 8.3.6). También se calculó el error cuadrático medio (RMSE - root-mean-square error - por sus siglas en inglés) para los datos de temperatura, con los datos promediados cada cinco días (Figura 8.3.7), debido a que, aunque la información de Reynolds está disponible con una frecuencia diaria, el paso de los satélites por un mismo punto es al menos cada tres días.

En las figuras 8.3.5 y 8.3.6 se muestran los promedios

mensuales de la altura de la superficie del mar y la temperatura superficial obtenida por cada modelo y tomada de la base de datos. En estas figuras se observa que el modelo representa de forma acertada la variabilidad espacial y temporal.

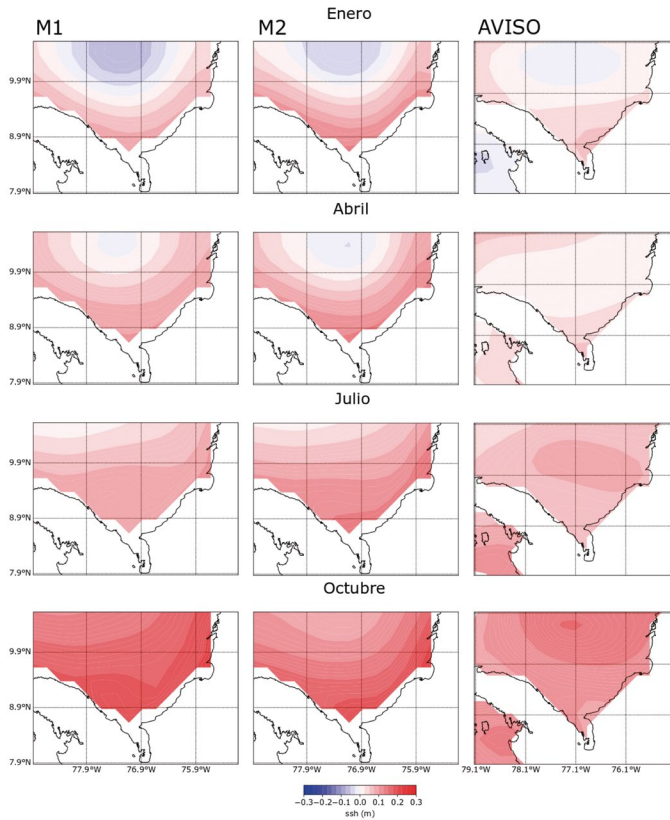


Figura 8.3.5 Altura superficial del mar mensual, obtenida con los modelos M1 (izquierda) y M2 (centro) y tomada de la base de datos AVISO (derecha). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

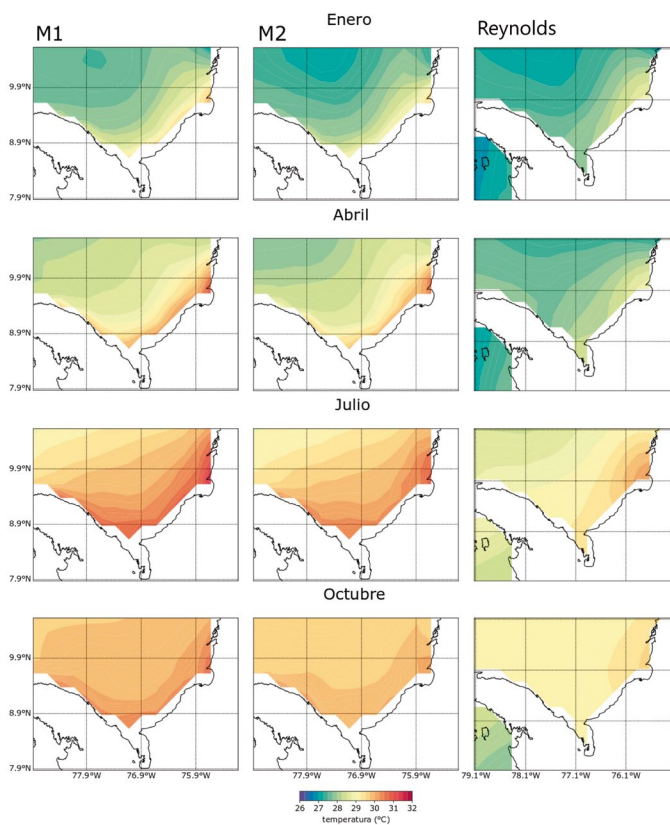


Figura 8.3.6 Temperatura superficial del mar mensual, obtenida con los modelos M1 (izquierda) y M2 (centro) y tomados de la base de datos Reynolds (derecha). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

La figura 8.3.7 muestra el RMSE para la temperatura superficial, calculado para cada modelo en comparación con la información satelital. En esta se observa que los mayores errores se encuentran cerca de la costa, debido a que la información satelital presenta algunos inconvenientes cerca del litoral. Sin embargo, los errores son inferiores al 5 %.

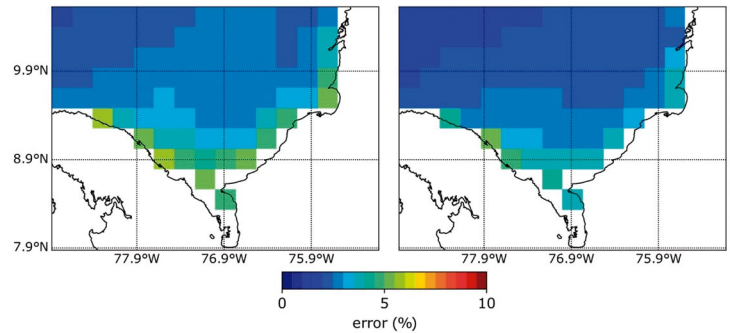


Figura 8.3.7 Error cuadrático medio (RMSE) de la temperatura superficial del mar obtenido de la comparación de los resultados de los modelos M1 (izquierda) y M2 (derecha) con los datos de Reynolds. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Comparación con información in situ

Los resultados de los modelos fueron evaluados en profundidad con información *in situ* de corrientes, temperatura y salinidad. Esta información pertenece a tres fuentes de información: (1) perfiles de corrientes en los sitios de interés del proyecto, medidos por parte de la Subcomponente Mediciones In Situ (Gobernación de Antioquia, Universidad del Norte y Universidad de Antioquia, 2018a), (2) corrientes en un nivel en dos sitios dentro del golfo de Urabá, medidas por la Subcomponente Mediciones In Situ (Gobernación de Antioquia, Universidad del Norte y Universidad de Antioquia, 2018b), (3) transectos de temperatura y salinidad al interior del golfo medidos por Velásquez y Guevara (2018).

* Evaluación con perfiles de corrientes

Durante el mes de enero del 2019 la Subcomponente Mediciones In Situ realizó mediciones continuas de corrientes, oleaje y presión en las zonas de Turbo, Zapata, Uveros y Arboletes (Gobernación de Antioquia et al., 2018a). Para las mediciones de corrientes se utilizaron dos correntómetros que fueron ubicados en dos puntos cercanos a la costa. Los perfiles de velocidad obtenidos cuentan con una resolución temporal de 10 min, una resolución espacial de 0.1 m y un periodo de registro aproximado de 24 horas. En la tabla 8.3.4 se muestra la localización de los puntos donde se ubicaron los correntómetros en cada zona, así como la profundidad y las fechas de inicio y fin del registro de información. También se muestran las coordenadas de donde se tomaron los resultados de M1 y M2 para las comparaciones.

Se calculó la desviación estándar de los datos medidos

Zona	Punto	Mediciones		Modelos M1 y M2		Profundidad	Hora y fecha Inicio	Hora y fecha Fin
		Latitud	Longitud	Latitud	Longitud			
Turbo	1	8.0813°N	76.7417°W	8.0791°N	76.7421°W	1.41 m	9:00 a.m. 21/01/19	9:00 a.m. 22/01/19
	2	8.0744°N	76.7414°W			1.39 m	10:00 a.m. 21/01/19	10:00 a.m. 22/01/19
Zapata	1	8.6865°N	76.6450°W	8.7103°N	76.6666°W	4.20 m	7:20 a.m. 23/01/19	8:00 a.m. 24/01/19
	2	8.6908°N	76.6409°W			4.45 m	7:20 a.m. 23/01/19	7:40 a.m. 24/01/19
Uveros	1	8.7531°N	76.5743°W	8.7927°N	76.5833°W	4.18 m	7:20 a.m. 25/01/19	6:40 a.m. 26/01/19
	2	8.7512°N	76.5801°W			4.34 m	7:20 a.m. 25/01/19	4:40 a.m. 26/01/19
Arboletes	1	8.856361°N	76.4330°W	8.8751°N	76.4583°W	5.42 m	6:40 a.m. 27/01/19	6:50 a.m. 28/01/19
	2	8.8608°N	76.4280°W			5.19 m	6:40 a.m. 27/01/19	7:00 a.m. 28/01/19

Tabla 8.3.4 Puntos de medición de perfiles de corrientes por zona. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

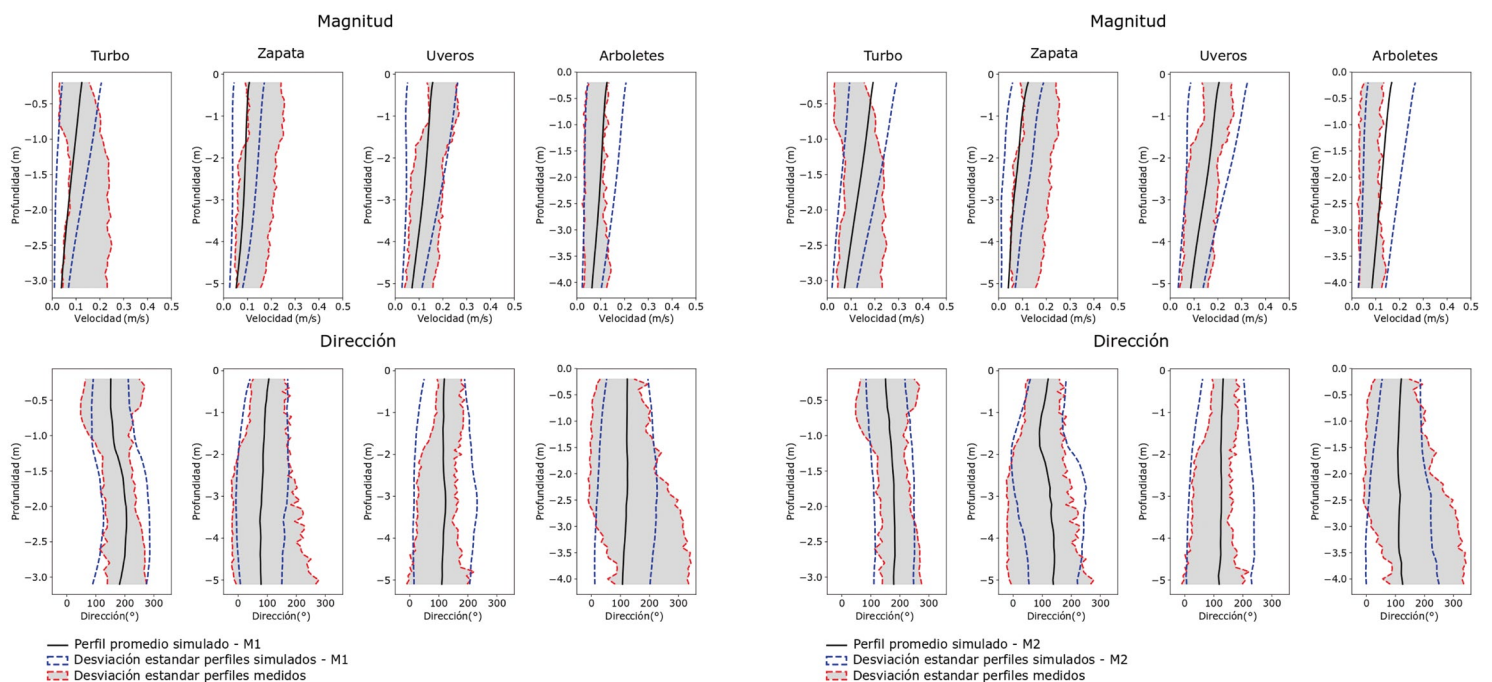


Figura 8.3.8 Comparación de la magnitud (superior) y dirección (inferior) de las corrientes en profundidad, medida y simulada con M1 en cada sitio de interés. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Figura 8.3.9 Comparación de la magnitud (superior) y dirección (inferior) de las corrientes en profundidad, medida y simulada con M2 en cada sitio de interés. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

y se comparó con el perfil medio y la desviación estándar obtenidos con los resultados diarios de los modelos M1 y M2 en los meses de enero. En las figuras 8.3.8 y 8.3.9 se muestran las comparaciones en la magnitud y la dirección para cada sector. En estas se observa que ambos modelos representan adecuadamente la variabilidad de la magnitud y dirección en todos los sitios, aunque, en Turbo y en Zapata la varianza de la magnitud de los datos observados se desfasa un poco de la varianza de los resultados de los modelos M1 y M2.

No obstante, se resalta que el periodo de tiempo de las mediciones es muy corto y no es suficiente para caracterizar la variabilidad de las corrientes durante todo el mes de enero.

* Evaluación con corrientes en un nivel

Durante el mes de febrero de 2019 la Subcomponente Mediciones *In Situ* tomó datos de corrientes en un nivel

con el correntómetro de la Universidad de Antioquia en un sitio cercano a la playa *La Martina* por un periodo de siete días con una resolución temporal de cinco minutos (Gobernación de Antioquia, Universidad del Norte y Universidad de Antioquia (2018b) (Tabla 8.3.5). Durante el mes de abril de 2019, se tomaron mediciones con este mismo correntómetro cerca de la boya *Akuara* por un periodo de 22 días con una resolución temporal de una hora.

La tabla 8.3.5 resume las características de estas mediciones y muestra las coordenadas de donde se tomaron los resultados de M1 y M2 para las comparaciones.

Sitio	Mediciones		Modelos M1 y M2		Profundidad	Hora y fecha Inicio	Hora y fecha Fin
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud			
Playa La Martina	8.1696°N	76.7508°W	8.1720°N	76.7526°W	2.875 m - 3.625 m	11:00 a.m. 21/02/19	1:00 p.m. 27/02/19
Boya Akuara	8.4599°N	76.8383°W	8.4606°N	76.8359°W	6.625 m - 7.375 m	11:00 a.m. 02/04/19	7:00 a.m. 25/04/19

Tabla 8.3.5 Puntos de medición de corrientes. Subcomponente circulación oceánica. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

De los modelos M1 y M2 se seleccionaron los resultados en los meses de febrero y abril de todo el periodo de modelación para compararlos con las observaciones, ya que las mediciones fueron realizadas en estos meses en *La Martina* y *Akuara*, respectivamente. Esta selección se utilizó para construir las rosas de corrientes mostradas en la figura 8.3.10, que indican las magnitudes y direcciones predominantes. Las rosas de corrientes también fueron construidas con los datos medidos, llevando estos datos a una resolución diaria, para que concordaran con la resolución temporal de los modelos.

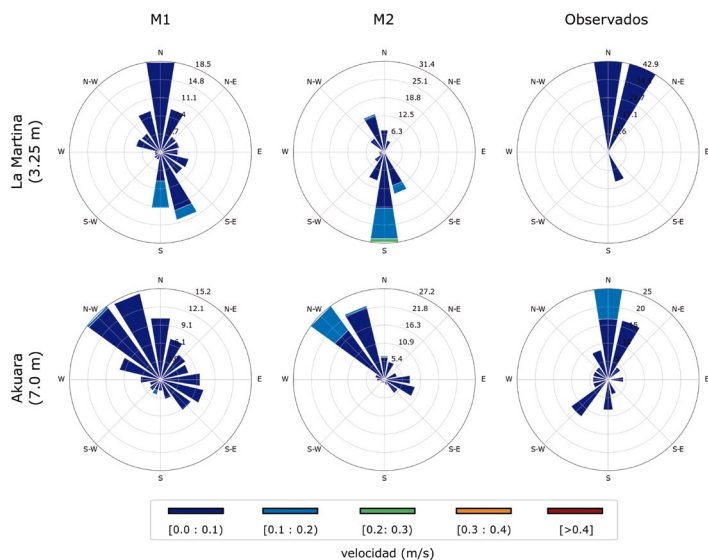


Figura 8.3.10 Rosas de corrientes para los dos sitios de medición (playa La Martina y Akuara), construidas con datos diarios de las salidas de los modelos M1 (izquierda) y M2 (centro) y de la información medida en campo (derecha). (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Las magnitudes y direcciones predominantes de las corrientes modeladas con M1 y M2 difieren de las observadas en los dos puntos de medición.

*Transectos de temperatura y salinidad

Velásquez y Guevara (2018) realizaron mediciones de temperatura y salinidad a lo largo de seis transectos al interior del golfo de Urabá el 13 de julio de 2017 utilizando una sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD). La ubicación de dichos transectos se muestra en la figura 8.3.11 Esta información fue comparada de forma cualitativa con los perfiles obtenidos a partir de los resultados de M1 y M2.

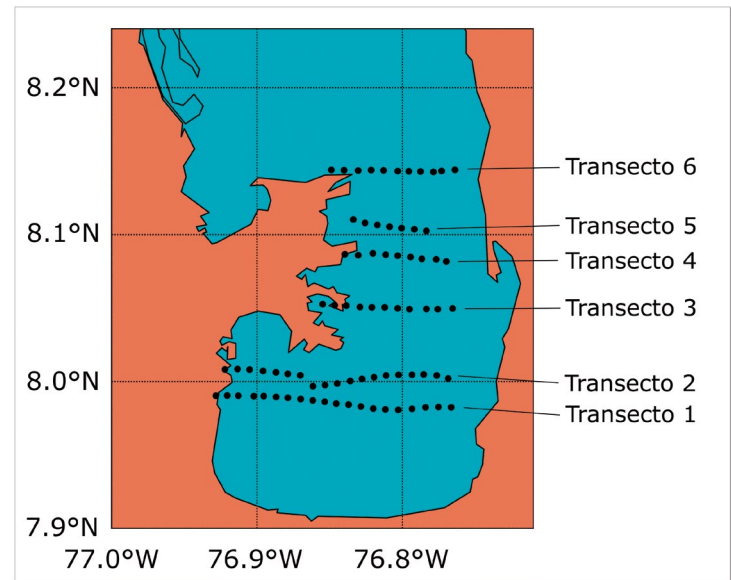


Figura 8.3.11 Ubicación de los transectos donde se realizaron mediciones de temperatura y salinidad. Universidad de Antioquia. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Debido a que los transectos fueron medidos durante el mes de julio de 2017, se tomó el promedio del mes de julio en todo el periodo de modelación para comparar la distribución de la temperatura y salinidad con las observaciones.

En la figura 8.3.12 puede observarse cómo los modelos M1 y M2 presentan una distribución coherente de la salinidad, con valores bajos en superficie que aumentan en profundidad. Sin embargo, el modelo M2 es el que presenta mayor concordancia con la magnitud en las observaciones. Lo contrario ocurre con la temperatura (Figura 8.3.13). El modelo M1 presenta magnitudes similares a las observadas, mientras que el modelo M2 subestima los valores de temperatura.

8.3.3 Análisis de resultados en el golfo de Urabá y el litoral antioqueño

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la integración del modelo CROCO bajo forzamiento en tiempo variable (M1), los cuales fueron extraídos del dominio anidado (700 m de resolución).

Debido a que los procesos físicos que determinan la circulación tienen un comportamiento bimodal correspondiente a las épocas climáticas, el análisis de la circulación

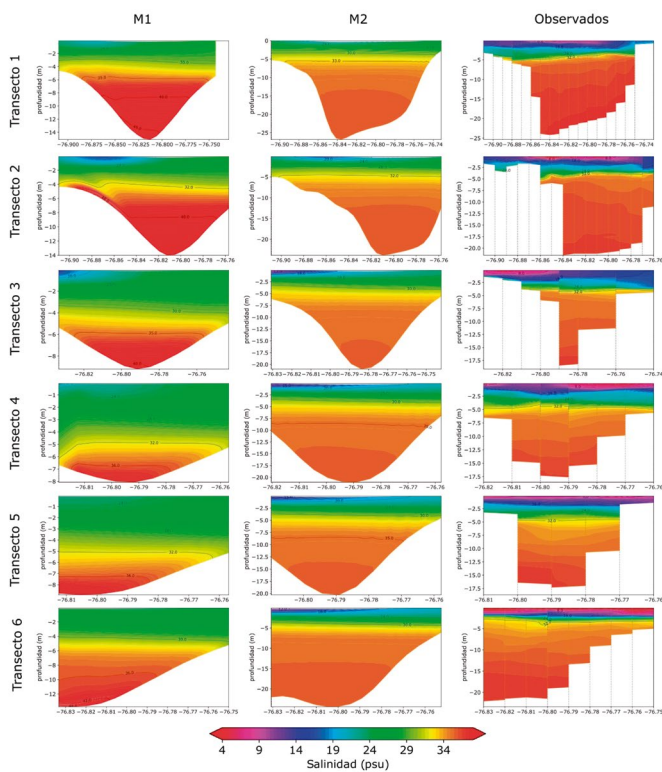


Figura 8.3.12 Transectos de salinidad, izquierda: resultados del modelo M1; centro: resultados del modelo M2; derecha: medidos con CTD. (Fuente: Elaboración propia–Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

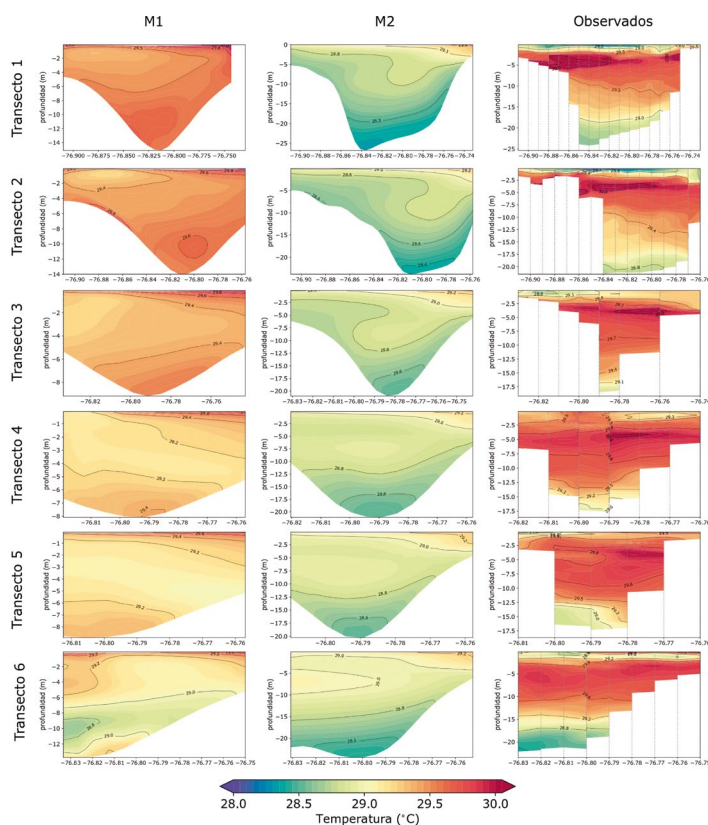


Figura 8.3.13 Transectos de temperatura, izquierda: resultados del modelo M1; centro: resultados del modelo M2; derecha: medidos con CTD. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019), se aplicó para cada una de ellas: la época seca (diciembre a abril) y la época húmeda (mayo a noviembre).

En la figura 8.3.14 se muestran las corrientes marinas y la salinidad promedio para la capa superficial y la capa del

fondo en cada época climática. Los colores indican el valor de la salinidad, mientras que las líneas indican la dirección y magnitud de las corrientes.

En la época húmeda los vientos provenientes del Sur y Suroeste favorecen la formación de corrientes superficiales al interior del golfo que se dirigen hacia el Noreste con magnitudes de hasta 0.2 m/s cerca de punta Caribana y cerca de las costas orientales. Estas corrientes facilitan el transporte hacia el Norte de las aguas dulces del río Atrato, por lo que la salinidad presenta valores entre 25 psu y 32 psu al interior del golfo que se extienden por todo el extremo oriental del dominio, lo que concuerda con las descripciones realizadas por Chevillot et al. (1993). Por fuera del golfo, en la parte central y occidental del dominio (Figura 8.3.14) la salinidad es de 35 psu correspondiente a aguas oceánicas. Las corrientes en la parte central se dirigen al Sur, mientras que hacia la parte occidental se curvan hacia el Oeste y toman una dirección Noroeste cerca de la costa con magnitudes inferiores a 0.1 m/s.

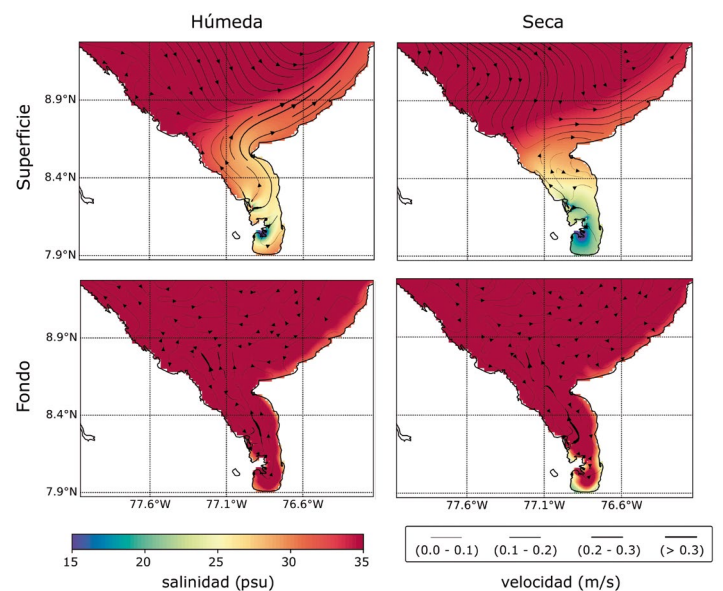


Figura 8.3.14 Salinidad y corrientes promedio en la capa superficial (superior) y en la capa del fondo (inferior) para las dos épocas climáticas características. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

En la capa del fondo, en ambas temporadas, se presenta una corriente de más de 0.3 m/s en la parte central el golfo que se dirige al Noreste, mientras que en el extremo sur del golfo las corrientes se dirigen hacia el Noroeste en la época húmeda y hacia el Sureste durante la época seca con magnitudes inferiores a los 0.1 m/s. La salinidad es mayor a 34 psu en todo el dominio, excepto en la época seca donde se presentan bajas salinidades cerca de las bocas del río Atrato y de la costa de la bahía Colombia.

La dinámica de las corrientes difiere en cada sitio de interés del proyecto (Punta Las Vacas – Turbo, Zapata – Necoclí, Uveros y Damaquiel – San Juan de Urabá, río Hobo y volcán de lodo – Arboletes), sin embargo, los sectores que se encuentran por fuera del golfo de Urabá y que tienen contacto directo con el mar Caribe presentan patrones en superficie similares entre sí y diferentes a los que tienen

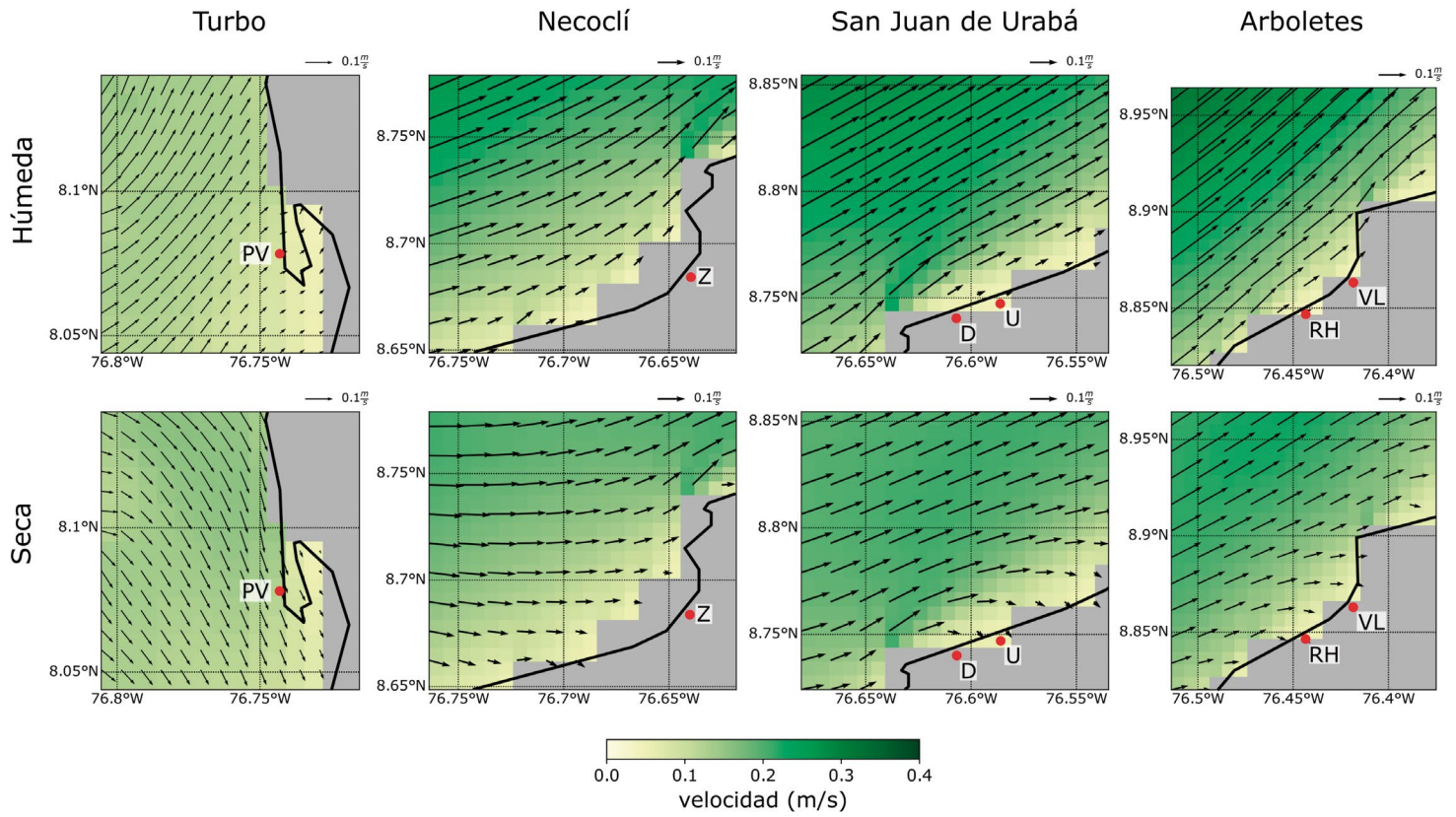


Figura 8.3.15 Campo promedio de las corrientes en la capa superficial durante la época húmeda (superior) y la época seca (inferior) para los diferentes sitios de estudio. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

lugar al interior del golfo como se puede apreciar en las figuras 8.3.15 y 8.3.16. En la capa del fondo la dinámica es diferente en cada sitio de estudio.

se encuentran fuera del golfo tienen a dirigirse perpendicularmente a la costa (ver figura 8.3.15, imágenes de la parte inferior).

Corrientes superficiales

Las corrientes en superficie son fuertemente moduladas por la época climática. En el sector de punta Las Vacas (Turbo) las corrientes se dirigen al Norte y Noreste en la época húmeda y al Sureste en la época seca, lo que concuerda con lo encontrado por Escobar et al. (2015). Estas direcciones predominantes también son evidentes en la figura 8.3.15, donde la rosa de corrientes indica que las direcciones Nor-Noreste y Sureste se presentan el 29.6 % y el 23.1 % del tiempo, respectivamente. Las magnitudes en este sector son menores que en los demás sitios con valores promedio de 0.12 m/s y máximos de hasta 0.31 m/s.

En los corregimientos de Zapata (Necoclí), Uveros y Damaquié (San Juan de Urabá) y en los sectores de río Hobo y volcán de lodo (Arboletes), las corrientes durante la época húmeda se dirigen principalmente al Noreste con magnitudes mayores que en la época seca. Durante la época seca, en Necoclí y San Juan de Urabá las corrientes toman una dirección Este-Noreste, mientras que en Arboletes conservan su dirección predominante hacia el Noreste. Este comportamiento también puede notarse en las rosas de corrientes de la figura 8.3.16, donde para Necoclí y San Juan de Urabá se presentan dos direcciones predominantes (Noreste y Este-Noreste) y para Arboletes sólo aparece una dirección principal (Noreste). Además, durante la época seca las corrientes cercanas a los diferentes sitios que

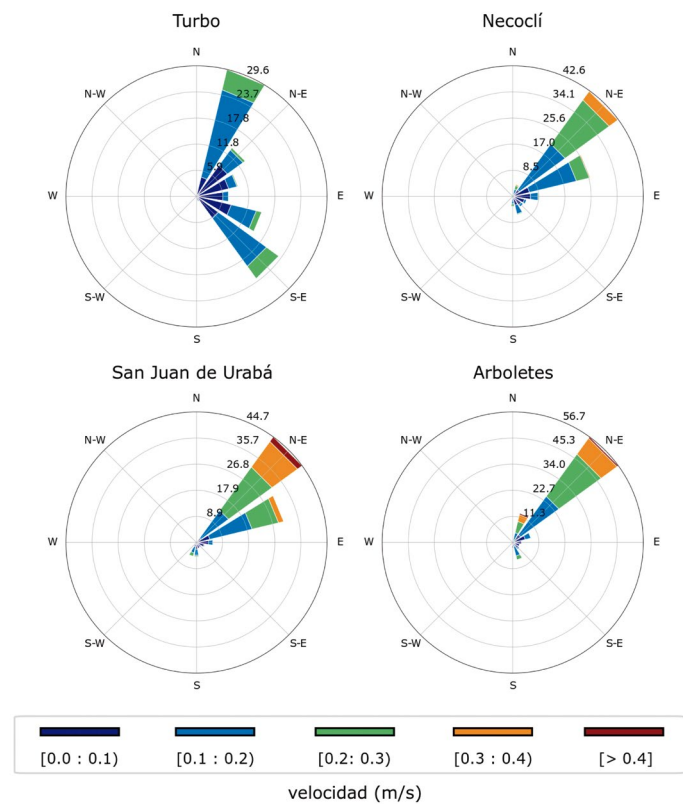


Figura 8.3.16 Rosas de corrientes en la capa superficial para cada sector. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

En la tabla 8.3.6 se resumen las principales características de las corrientes superficiales en cada sitio.

Sector	Direcciones predominantes	velocidad media	Velocidad máxima
Turbo (Punta Las Vacas)	NNE (29.6%) SE (23.1%)	0.12 m/s	0.31 m/s
Necoclí (Zapata)	NE (42.6%) ENE (26.0%)	0.16 m/s	0.43 m/s
San Juan de Urabá (Damaquiel y Uveros)	NE (44.7%) ENE (30.7%)	0.19 m/s	0.55 m/s
Arboletes (Río Hobo y Volcán de lodo)	NE (56.7%)	0.19 m/s	0.53 m/s

Tabla 8.3.6 Principales características de las corrientes superficiales en cada sitio de estudio: direcciones predominantes (con porcentaje de ocurrencia), velocidad media y velocidad máxima. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Corrientes en la capa del fondo

En el sector de Turbo las velocidades en la capa del fondo superan los 0.1 m/s cerca de las bocas del río Atrato y se dirigen predominantemente hacia el Norte. Cerca de punta *Las Vacas* las velocidades tienen una magnitud promedio de 0.02 m/s con una dirección predominante Este-Sureste.

Cerca de Zapata las velocidades promedio son de 0.01 m/s y alcanzan hasta 0.14 m/s. La dirección promedio en la época húmeda es Sureste, mientras que durante la época seca es Noreste (ver figura 8.3.17), sin embargo, la rosa de corrientes en la figura 8.3.18 indica que la dirección predominante en este sector es hacia el Sureste. En la figura 8.3.17 se observa que las mayores velocidades se presentan cerca de punta Sabanilla.

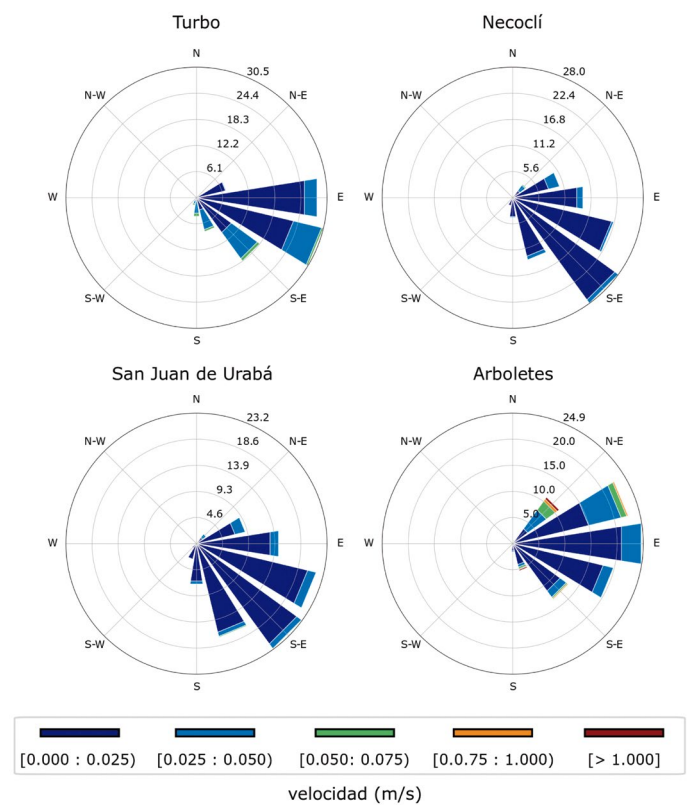


Figura 8.3.18 Rosas de corrientes en la capa del fondo para cada sector. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

Para los sectores de Damaquiel y Uveros (en San Juan de Urabá) los patrones de circulación oceánica son similares a los de Zapata, con velocidades medias de 0.01 m/s y máximas de 0.17 m/s y con dirección predominante al Sureste.

En Arboletes, donde se encuentran los sitios de estudio río Hobo y volcán de lodo las velocidades promedio son de

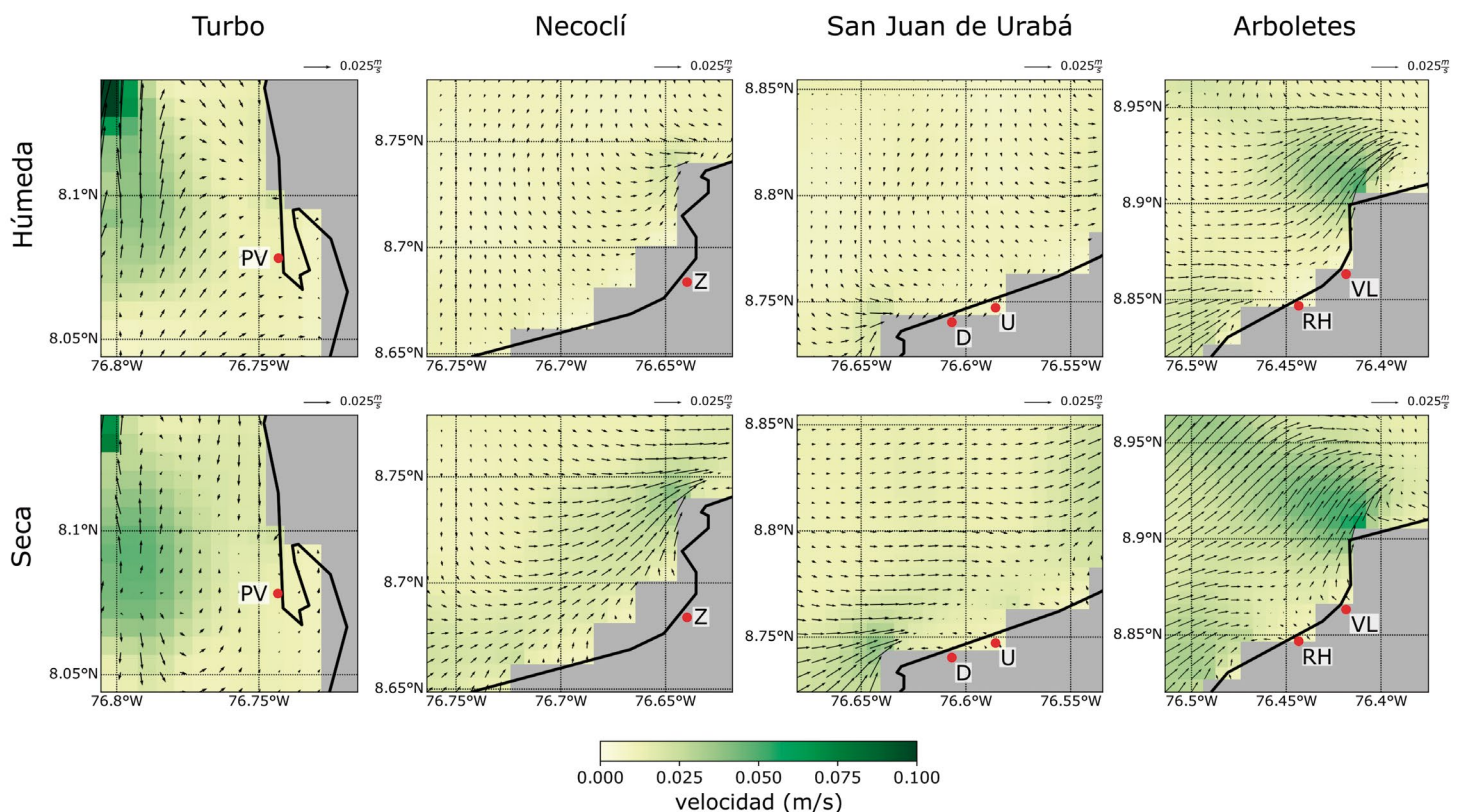


Figura 8.3.17 Campo promedio de las corrientes en la capa del fondo durante la época húmeda (superior) y la época seca (inferior) para los diferentes sitios de estudio. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

0.02 m/s con valores de hasta 0.26 m/s cerca de punta Rey, donde las corrientes son más energéticas como se observa en la figura 8.3.17. Durante la época húmeda las corrientes se dirigen principalmente hacia el Este-Noreste, mientras que en la época seca predomina la dirección Este.

En la tabla 8.3.7 se resumen las principales caracterís-

Sector	Direcciones predominantes	Velocidad media	Velocidad máxima
Turbo (Punta Las Vacas)	ESE (30.5 %)	0.02 m/s	0.11 m/s
Necoclí (Zapata)	SE (28.0 %)	0.01 m/s	0.14 m/s
San Juan de Urabá (Damaquiel y Uveros)	SE (23.7 %)	0.01 m/s	0.17 m/s
Arboletes (Río Hobo y Volcán de lodo)	ENE (22.8 %) E (25.0 %)	0.02 m/s	1.26 /s

Tabla 8.3.7 Principales características de las corrientes en la capa del fondo en cada sitio de estudio: direcciones predominantes (con porcentaje de ocurrencia), velocidad media y velocidad máxima. (Fuente: Elaboración propia – Subcomponente Modelación Circulación Oceánica, 2019).

ticas de las corrientes en el fondo para cada sitio.

8.3.4 Conclusiones

Se practicaron simulaciones con el modelo oceánico regional CROCO para la representación de las corrientes en el golfo de Urabá y el litoral antioqueño. Los resultados obtenidos con los modelos fueron evaluados con información satelital en superficie y con información *in situ* en profundidad. Estas comparaciones mostraron que el modelo representa bien los patrones espaciales y las variaciones temporales tanto para la altura de la superficie del mar como para la temperatura superficial. Además, se obtuvieron errores máximos de 5 % en los resultados de temperatura superficial en comparación con los datos satelitales (Figura 8.3.7).

Las comparaciones con los perfiles de corrientes medidos en campo (Figuras 8.3.8 y 8.3.9) mostraron que la varianza de los datos observados se encuentra, en general, contenida en la variabilidad obtenida con los modelos. La comparación con los transectos de temperatura y salinidad mostró que el modelo representa una distribución coherente de estas variables en la vertical, aunque sobrestima los valores de salinidad.

Hay que resaltar que los perfiles de corrientes medidos en los sitios de interés tienen un registro temporal muy corto (24 h) y puede no ser suficiente para caracterizar la dinámica en estas zonas, lo que explica las diferencias encontradas entre estos datos y los resultados del modelo. También, hay que tener en cuenta que la resolución espacial de los datos satelitales es muy baja, comparada con la del modelo y esto puede tener relación con los errores hallados, ya que como se observa en las figuras 8.3.5 y 8.3.6 el modelo representa adecuadamente la variabilidad espacial y temporal.

La dinámica de las corrientes en superficie presenta un

comportamiento similar en ambas épocas climáticas en los sitios de estudio que se encuentran por fuera del golfo de Urabá, con direcciones predominantes hacia el Noreste y el Este-Noreste y magnitudes promedio de 0.2 m/s. Al interior del golfo los patrones de circulación responden principalmente a la descarga del río Atrato y la interacción de este con el esfuerzo del viento, presentándose corrientes con magnitudes promedio de 0.12 m/s con dirección Sureste durante la época seca y con dirección Noreste, durante la época húmeda.

Los sitios que se encuentran fuera del golfo presentan diferencias en las corrientes superficiales cercanas a la costa entre las dos épocas climáticas. En la época seca las corrientes inciden perpendiculares a la costa, mientras que en la época húmeda se dirigen al Noreste.

8.3.5 Referencias

AVISO, The altimeter products were produced by Ssalto/Duacs and distributed by AVISO MADT, with support from Cnes (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

Chevillot, P. & Molina, A. (1989). Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), Cartagena de Indias, Colombia. 73 p. + 2 anexos.

Chevillot, P., Molina, A., Giraldo, L., & Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. Boletín científico CIOH, 14 (Julio).

CIOH. (1993). Estudio hidrodinámico del golfo de Urabá. Informe final. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Cartagena de Indias, Colombia. 68 p.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Correa, I.D. & Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), 33, 7–28.

Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P. & Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49-50, 1-21. [CROCO: ROMS-AGRIF]

Escobar, C. A., Velásquez, L., & Posada, F. (2015). Marine Currents in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. *Journal of Coastal Research*, 31(6).

García, C. (2007). Atlas del Golfo de Urabá: Una Mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras–Invemar and Gobernación de Antioquia.

Gobernación de Antioquia, Universidad del Norte y

Universidad de Antioquia (2018a). Informe de la Componente de mediciones In Situ, realizado en el primer trimestre del 2019. 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 (2018b). Informe de la Componente de mediciones In Situ, realizado en el segundo trimestre del 2019. Recuperado de: proyecto Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia.

Lonin, S. and Vasquez, J.G. (2005). Hidrodinámica y distribución de coliformes en el Golfo de Urabá. *Boletín Científico CIOH*, 23, 76–89.

Molina. A., Molina, C., & Chevillot, P. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas del golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. Cartagena de Indias, *Boletín Científico del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas*, 11: 43-58

Montoya, L. J., & Toro, M. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (13).

National Geophysical Data Center. (2006). 2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) v2. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5J1012Q [access date].

Penven P., Marchesiello, P., Debreu, L. & Lefevre, J. (2007). Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environ. Model. Softw.*, 23, 660-662. [CROCO_TOOLS]

Restrepo, J., y López, S. (2008). Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 1-21.

Reynolds, R.W., N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang, (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, 15, 1609-1625.

Roldán, P. (2008). Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis de maestría en Ingeniería–Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Velásquez, A., Guevara, J. (2018). Caracterización termohalina de la región central del golfo de Urabá, a partir de la descarga de los ríos (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, sede de Ciencias del Mar, Turbo

Velásquez, L. (2013). Modelación del transporte de sedimentos en el golfo de Urabá, Colombia. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Departamento de Geología, Escuela de Ingeniería. Universidad EAFIT. Medellín.

8.4 Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos

Autores

Vladimir G. Toro

(PhD en Oceanografía Física)

Gloria Shilliane Londoño Colorado

(Ingeniera Oceanográfica)

Keiner José Ruiz Murillo

(Ingeniero Oceanográfico)

José Manuel Calderón Burgos

(Ingeniero Oceanográfico)

8.4.1 Introducción

La erosión costera puede ser causada por factores naturales, como el aumento del nivel del mar, actividad diátrica, huracanes y ciclones, entre otros. Y factores antrópicos como la extracción intensiva de arena de la playa, la construcción de obras costeras inadecuadas, la tala de manglares, entre otros. El retroceso de la línea de costa amenaza a la población asentada allí, haciéndola vulnerable frente a esta problemática. La tasa de erosión en la costa del litoral antioqueño en los últimos 40 años está entre 0.5 y 2 m/año, lo que se traduce en un retroceso de la línea de costa del orden de los 50 a 100 m en zonas como Arboletes, Damaquiel, Uveros, Zapata y en el sector noreste de Necoclí (Correa & Vernet, 2004).

En este capítulo se presenta la metodología, los resultados y el análisis de la modelación numérica del transporte de sedimentos en seis sitios del litoral antioqueño. Igualmente un análisis comparativo entre las mediciones realizadas *in situ* y los resultados de la modelación en las zonas de estudio.

8.4.2 Metodología utilizada

La metodología que se utilizó se divide en dos partes: la primera consiste en la descripción de los datos medidos *in situ* que se fueron utilizado posteriormente en los modelos. Y la segunda la descripción de los modelos de transporte de sedimentos, principalmente el modelo Xbeach y en algunos casos el modelo Delft3D.

8.4.2.1 Datos

Los datos de batimetrías fueron suministrados por la *Componente Topografía Batimetría*. La información correspondiente a los parámetros integrales del oleaje como altura

significante (H_s), periodo asociado al pico espectral (T_p) y dirección del oleaje (grados), corresponden a los análisis de la Subcomponente Modelación Oleaje. Por último, los parámetros característicos del sedimento fueron suministrados por la *Componente de Geología y Geotecnia*. Gran parte de estos datos se utilizaron como condiciones de frontera para los modelos numéricos.

8.4.2.2 Modelos de transporte de sedimentos

Se implementó el modelo numérico Xbeach con el fin de determinar las condiciones hidrodinámicas y morfológicas de la línea de costa. Este modelo considera variables como olas, mareas, vientos y transporte de sedimentos. En el caso de volcán de lodo, adicionalmente se implementó el modelo numérico Delft3D y sus resultados fueron utilizados como condiciones de frontera en el modelo Xbeach.

A continuación, se describirán los modelos numéricos Xbeach y Delft3D. Es de notar que se hace mayor énfasis en Xbeach ya que fue el utilizado por esta Subcomponente para los resultados, análisis y conclusiones de los seis sitios de estudio (Volcán de lodo, río Hobo, Damaquiel, Uveros, Zapata y punta Las Vacas).

Delft3D es un modelo hidrodinámico y morfológico multidimensional, que puede ser usado en dos (integración en vertical) o tres dimensiones. Este modelo fue desarrollado para describir una gran cantidad de fenómenos físicos, entre ellos el transporte de sedimentos y el cambio morfológico en los ambientes estuarinos y costeros (Deltares, 2011b). Por otro lado, Xbeach es un modelo numérico para el estudio de procesos cerca de la costa (nearshore) diseñado para calcular las condiciones hidro-sedimentarias durante eventos estacionales y extremos como las tormentas y los huracanes. Xbeach es considerado un modelo morfológico que se enfoca en escalas espaciales relativamente pequeñas y escalas temporales cortas (Roelvink et al., 2010). En los seis sitios de estudio, se implementaron estos modelos para la propuesta de solución 1. En algunos casos como volcán de lodo, río Hobo, Zapata y punta Las Vacas también se utilizó el modelo en las propuestas de solución 2 planteadas en los informes de Diseño de Obras.

8.4.3 Resultados

Como se mencionó antes, el modelo Xbeach fue utilizado para estudiar la respuesta de la costa a la primera propuesta de solución, a excepción de volcán de lodo, río Hobo, Zapata y punta Las Vacas, en los que también fue simulada la segunda propuesta de solución. Adicionalmente, se simularon dos casos adicionales para las alternativas 1 y 2. En el primer caso se implementaron en el modelo las obras de protección (1 y 2), y en el segundo caso se realizó la simulación sin obras. Estos escenarios permitieron estudiar el impacto de dichas estructuras en la erosión/acreción de la playa, las modificaciones a la dinámica del

transporte de sedimentos, y los cambios morfológicos que se presentarían en las playas de acuerdo a los escenarios planteados. Los resultados al emplear el modelo numérico Xbeach fueron los siguientes:

- 1) En el volcán de lodo y río Hobo luego de la simulación de los casos con obras de protección y sin obras, se obtuvo la batimetría final sin obras (Ver figura 8.4.1A.

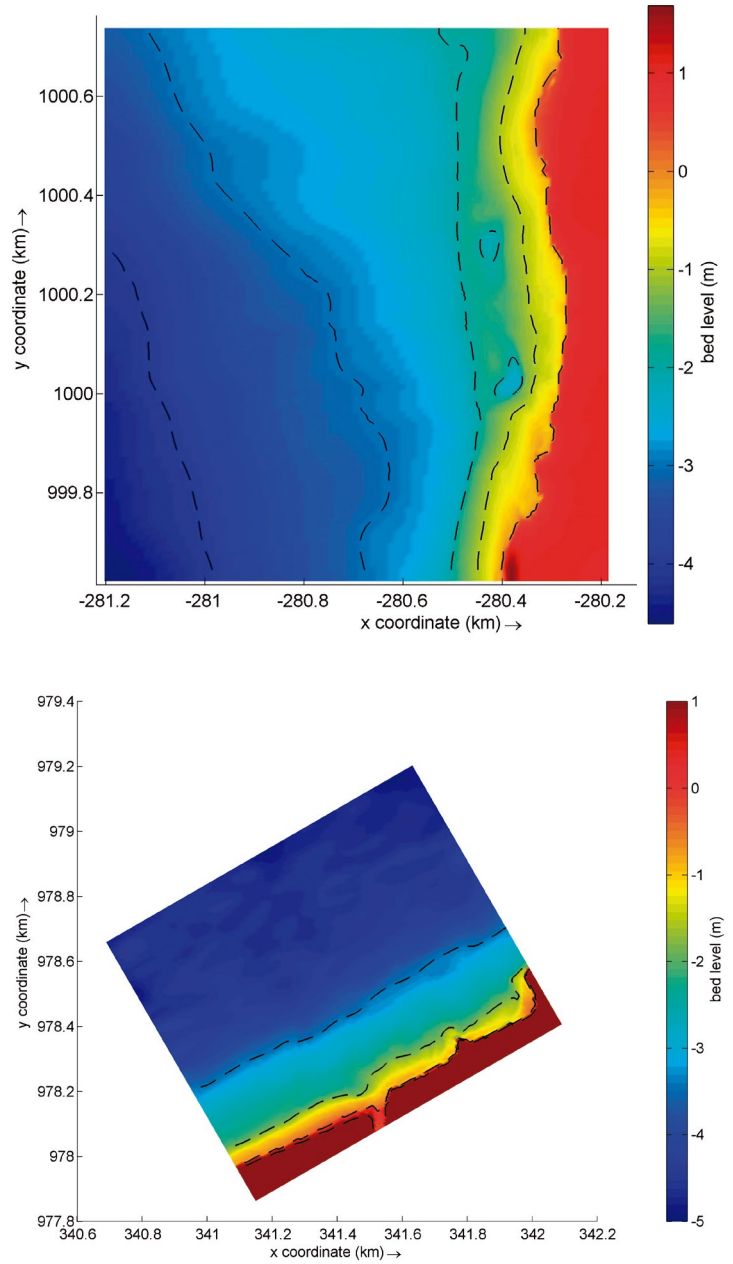


Figura 8.4.1 A) Volcán de lodo. Batimetría final sin obras de protección costera. B) Río Hobo. Batimetría final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

Volcán de lodo y figura 8.4.1B. Río Hobo), la batimetría final con la alternativa 1 (tómbolos, espolón y el enrocado) (Ver figura 8.4.2A. Volcán de lodo y figura 8.4.2B. Río Hobo) y la batimetría final con la alternativa 2 (espigón y los diques exentos) (Ver figura 8.4.3A. Volcán de lodo y figura 8.4.3B. Río Hobo).

También se obtuvieron los campos de erosión y acreción a lo largo de la línea de costa para ambos sitios de estudio. Se presentan los resultados de la acreción/erosión final sin obras (Ver figura 8.4.4A Volcán de lodo y

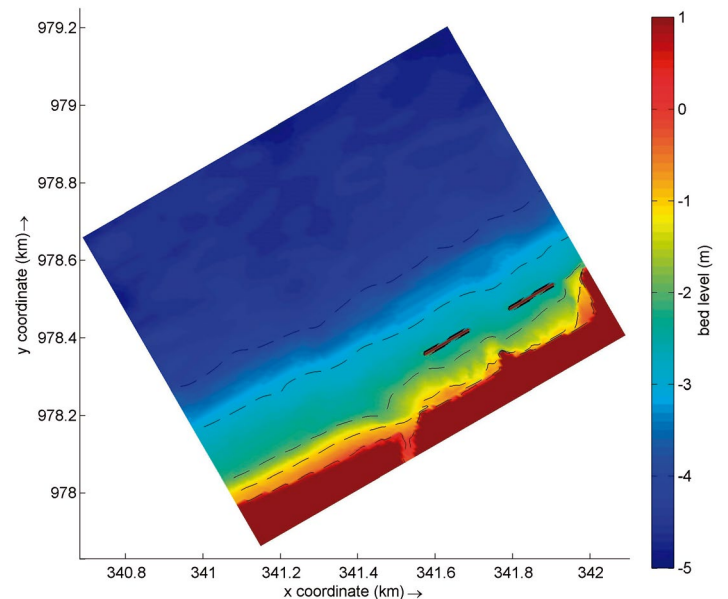
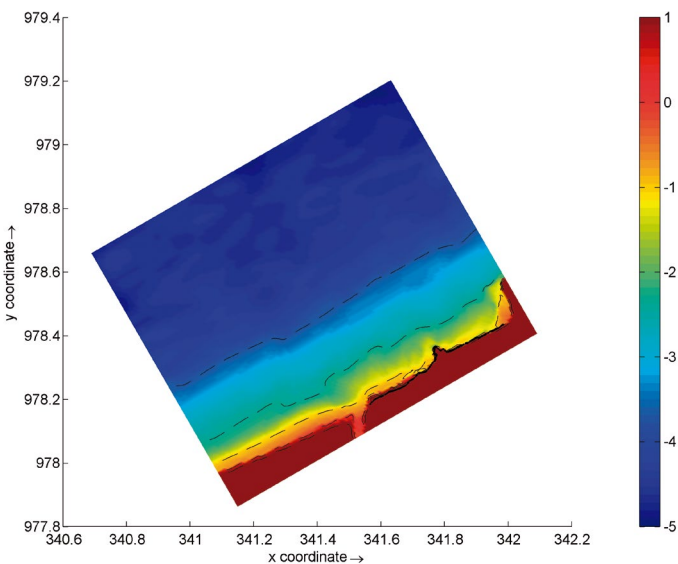
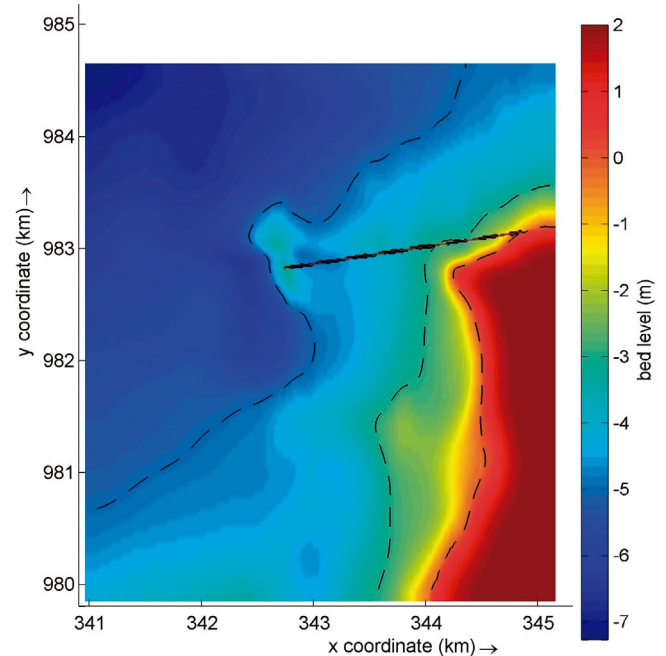
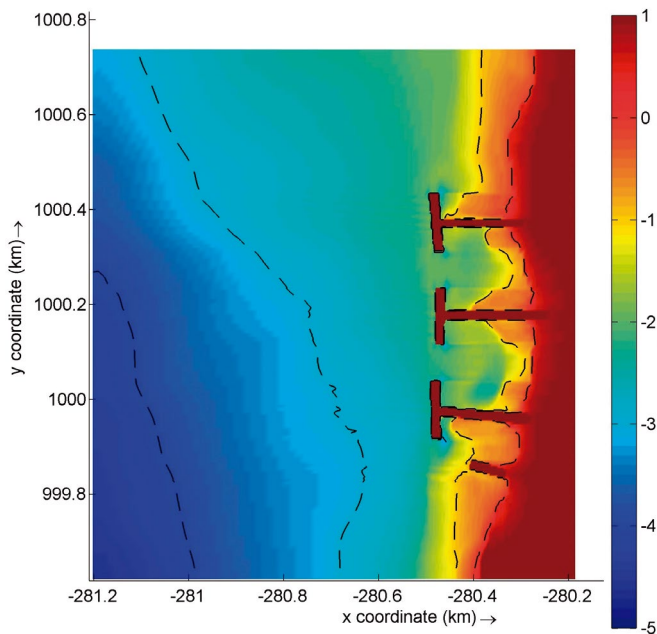


Figura 8.4.2 A) Volcán de lodo. Batimetría final con la alternativa 1 (Tómbolos y espolón). B) Río Hobo. Batimetría final con la alternativa 1 (Enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

Figura 8.4.3 A) Volcán de lodo. Batimetría final con la alternativa 2 (Espigón). B) Río Hobo. Batimetría final con la alternativa 2 (Diques exentos). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

figura 8.4.4B Río Hobo), la acreción/erosión final con la alternativa 1 (tómbolos, espolón y el enrocado) (Ver figura 8.4.5A Volcán de lodo y figura 8.4.5B Río Hobo) y la acreción/erosión final con la alternativa 2 (espigón y los diques exentos) (Ver figura 8.4.6A Volcán de lodo y figura 8.4.6B Río Hobo).

2) En los corregimientos de Damaquiel y Uveros, solo se empleó el modelo Xbeach en la propuesta 1, y se realizaron los escenarios con obras de protección y sin obras. Se obtuvieron, la batimetría final sin obras (Ver figura 8.4.7A Damaquiel y figura 8.4.7B Uveros) y la batimetría final con la alternativa 1 (enrocado) (Ver figura 8.4.8). Cabe resaltar que en este caso no se simuló con la obra de protección en el sector Uveros debido a que la batimetría final sin obra y con obra es la misma, debido a que la solución propuesta en este sitio son dunas artificiales que están sobre la playa y no interactúan con el mar, por lo que la batimetría no cambió al implementarla.

3) En el corregimiento de Zapata, se empleó el modelo Xbeach para las alternativas 1 y 2, con escenarios en donde se contemplan los sitios con obras de protección y sin obras. Se obtuvieron la batimetría final sin obras (Ver figura 8.4.9), la batimetría final con la alternativa 1 (Muro de enrocado) (Ver figura 8.4.10) y la batimetría final con la alternativa 2 (Muro de enrocado y espolones) (Ver figura 8.4.11). También se obtuvo para ambos escenarios, con obras de protección y sin obras, los campos de acreción/erosión. De manera particular el campo final acreción/erosión sin obras (Ver figura 8.4.12), el campo final con la alternativa 1 (muro de enrocado) (Ver figura 8.4.13) y el campo final con la alternativa 2 (muro de enrocado y espolones) (Ver figura 8.4.14).

4) Por último, se obtuvieron los resultados para el sector punta Las Vacas en el cual se simularon los casos sin obras de protección y con alternativas 1 y 2. Se obtuvo la batimetría final: sin obras (Ver figura 8.4.15), con la alternativa

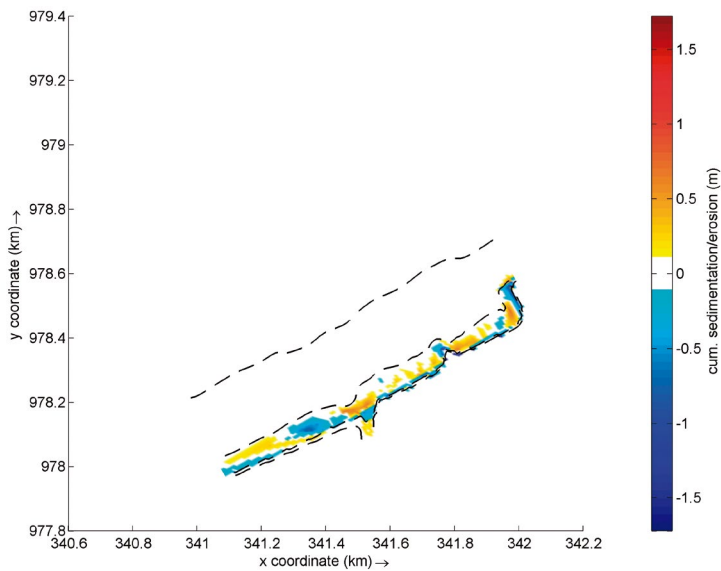
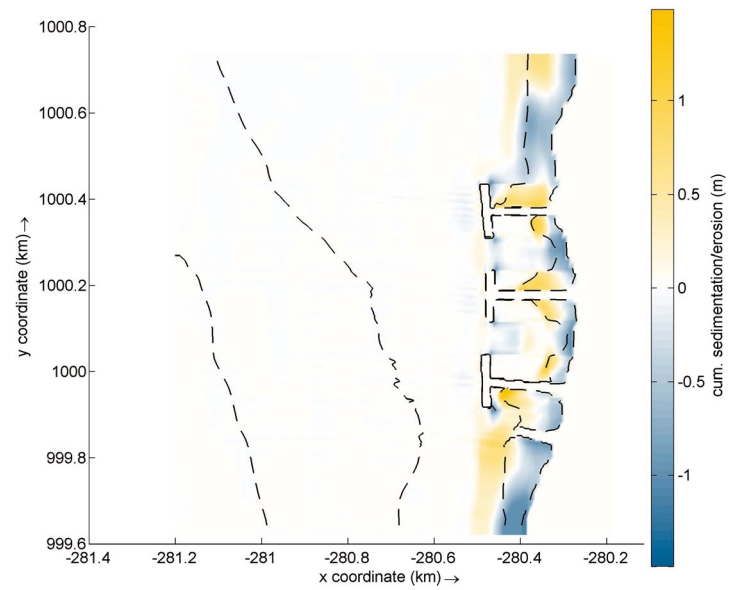
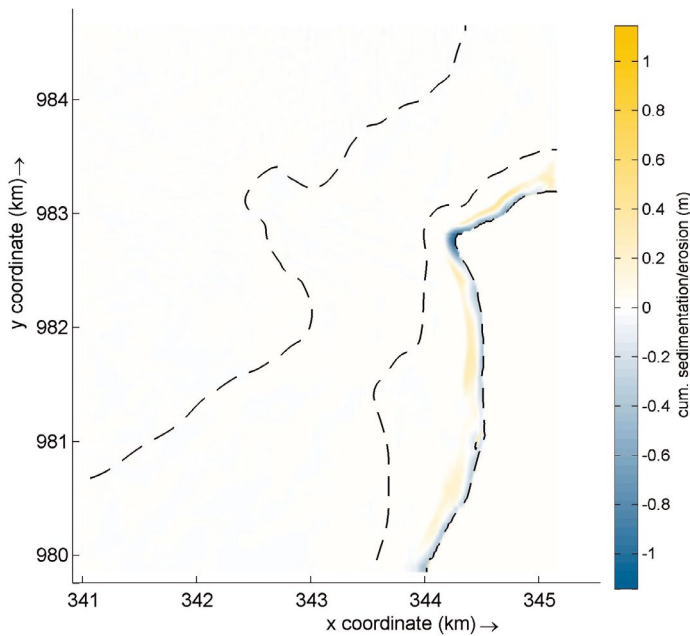


Figura 8.4.4 A) Volcán de lodo. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera. B) Río Hobo. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

1 (muro de tablestacas, muro de enrocado y celdas experimentales) (Ver figura 8.4.16) y con la alternativa 2 (Muro de tablestacas y muro de enrocado) (Ver figura 8.4.17).

Además, se obtuvo para ambas propuestas de solución, los campos de acreción/erosión a lo largo de la línea de costa. Estos campos corresponden a la simulación de los casos con obras de protección y sin obras. De esta manera se muestran los campos finales: sin obras (Ver figura 8.4.18), con la alternativa 1 (muro de tablestacas, muro de enrocado y celdas experimentales) (Ver figura 8.4.19), y con la alternativa 2 (muro de tablestacas y muro de enrocado) (Ver figura 8.4.20).

Figura 8.4.5 A) Volcán de lodo. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Tómbolos y espolón). B) Río Hobo. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

8.4.4 Análisis y conclusiones

En general, los resultados de los modelos numéricos en los casos sin obras, sugieren que en punta Las Vacas, Zapata y río Hobo, existen procesos intensos de erosión y que por lo tanto la línea de costa tiende a retroceder. En los corregimientos de Damaquiel y Uveros no se observaron cambios significativos y, por lo tanto, se puede decir que estos dos lugares se encuentran en un estado de equilibrio temporal. Sin embargo, ante cualquier cambio natural/antrópico importante se pueden desencadenar procesos erosivos.

En los casos con obras, en volcán de lodo para la alternativa 1, se observó cómo la línea de costa en la zona de influencia de la obra tiende a formar una media luna entre las obras y una acumulación de sedimentos en la zona noreste. Esto se debe a que la presencia de los tómbolos (diques exentos) y el espolón ocasionan que el sedimento quede allí atrapado. En la segunda alternativa, se observó que los cambios morfológicos son mínimos si se usa una barrera de arena artificial. Se sugiere realizar monitoreo de la línea de costa en los sitios aledaños al volcán de lodo, con el fin de verificar las afectaciones que puedan darse debido a la construcción de la alternativa 1, debido a procesos erosivos laterales.

En río Hobo, con la alternativa donde se propone la construcción del muro de enrocado, la configuración de la línea de costa tiende a mantenerse estable en el tiempo, tanto en la parte protegida por el enrocado, como en las

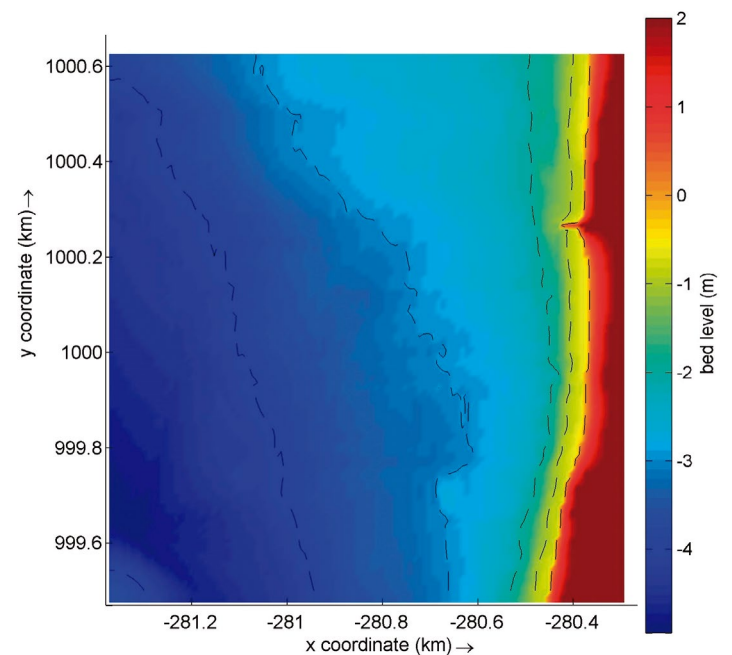
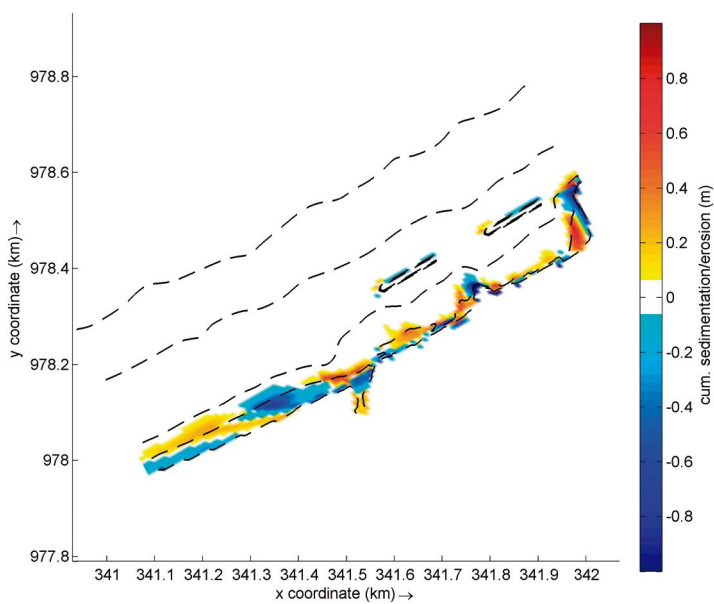
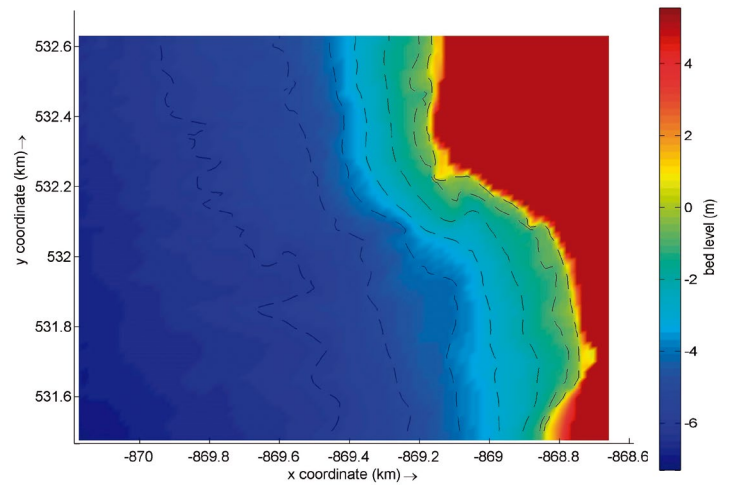
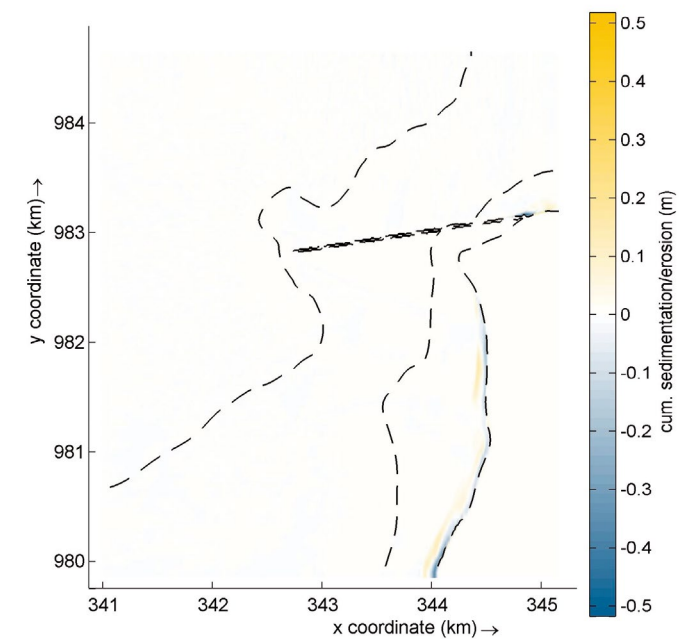


Figura 8.4.6 A) Volcán de lodo. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Espigón). B) Río Hobo. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Diques exentos). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

Figura 8.4.7 A) Damaquiel. Batimetría final sin obras de protección costera. B) Uveros. Batimetría final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

zonas aledañas como la desembocadura del río. Además, se observa una acumulación de sedimentos en la parte norte, en donde en este momento existen obras (espolones) que al parecer ocasionan una alta tasa de erosión en el sitio donde está asentada la comunidad de río Hobo. De igual manera, los resultados sugieren una acumulación de sedimentos costa afuera, ya que el material erosionado en los acantilados es transportado de manera perpendicular a la línea de costa, formando una barra sumergida a lo largo del lugar y en la zona de la desembocadura. Para la alternativa 2, tómbolos exentos, se observa un cambio progradante en la línea de costa debido a que estas obras protegen la costa del oleaje. De igual manera, se observa acumulación de sedimentos entre los dos tómbolos. Por lo anterior, este tipo de obras modificaría el transporte de sedimentos en esta zona y por lo tanto suponemos que esta solución puede tener un impacto al sur de la desembocadura del río, incrementando los procesos erosivos hacia el sur-oeste.

Para los casos sin obras, en volcán de lodo se observa una acumulación de sedimentos costa afuera y erosión intensa a lo largo de la línea de costa y principalmente enfrente del volcán. En río Hobo, la distribución de los sedimentos a lo largo de la línea de costa es heterogénea, produciendo lugares intercalados de acreción/erosión, pero siendo más intensos los asociados a la erosión.

En general en los corregimientos de Damaquiel y Uveros, las primeras alternativas, muro de enrocado y las dunas artificiales, permiten que la línea de costa se mantenga estable en el tiempo y en un aparente equilibrio. Esto se debe a que las obras propuestas están sobre la línea de costa y no interactúan con forzadores naturales como el oleaje o las corrientes. De manera específica en Damaquiel y para la alternativa 1, se observó una reacomodación del material a lo largo de la línea de costa, presentándose erosión al sur y acreción al norte del espigón principal. Al sur

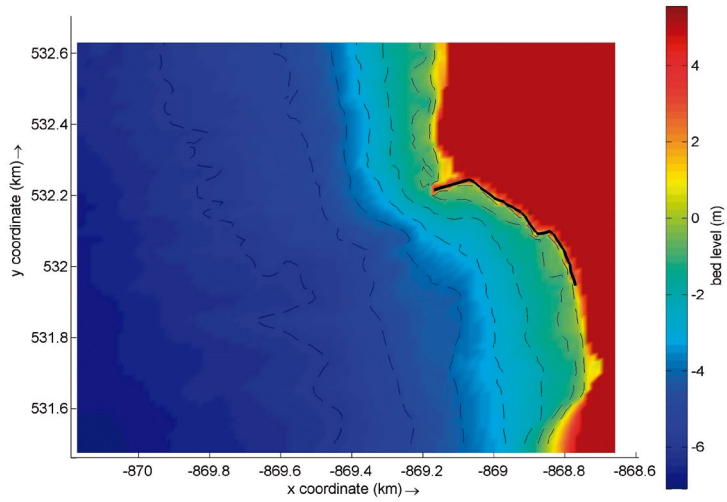


Figura 8.4.8 Damaniel. Batimetría final con la alternativa 1 (Enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

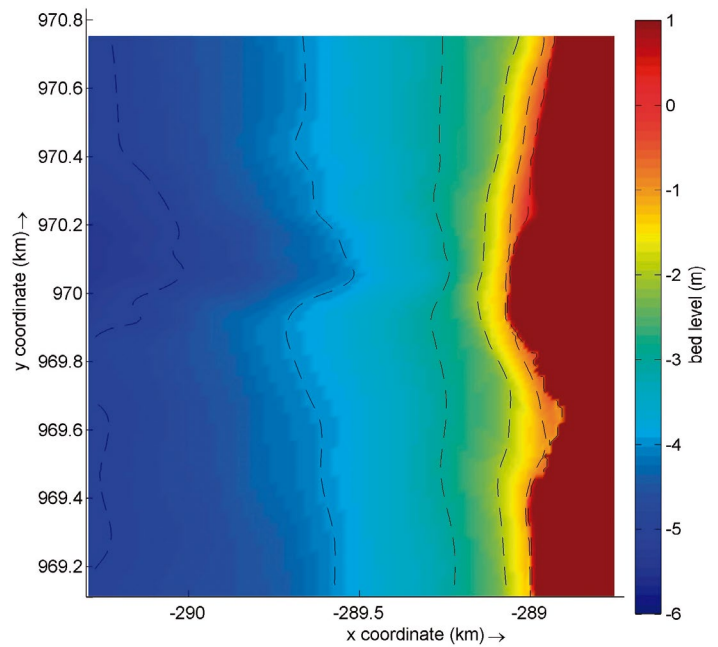


Figura 8.4.10 Zapata. Batimetría final con la alternativa 1 (Muro de enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

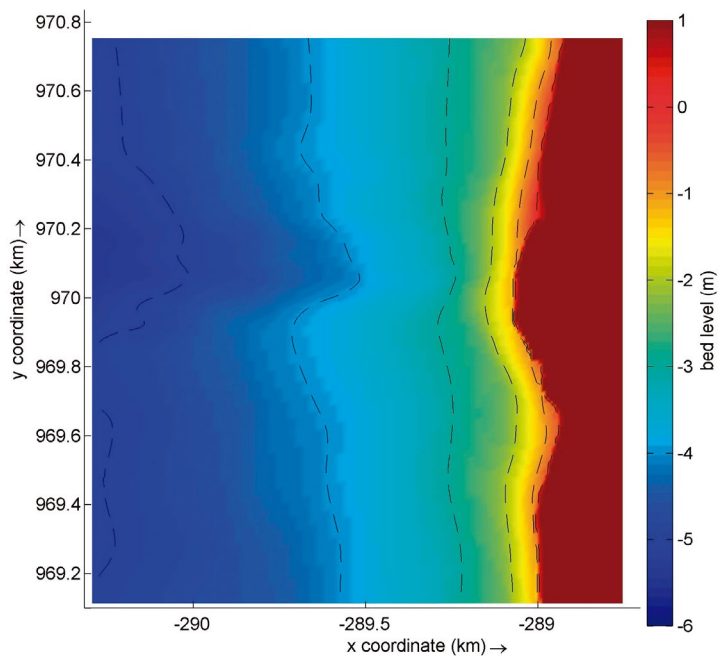


Figura 8.4.9 Zapata. Batimetría final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

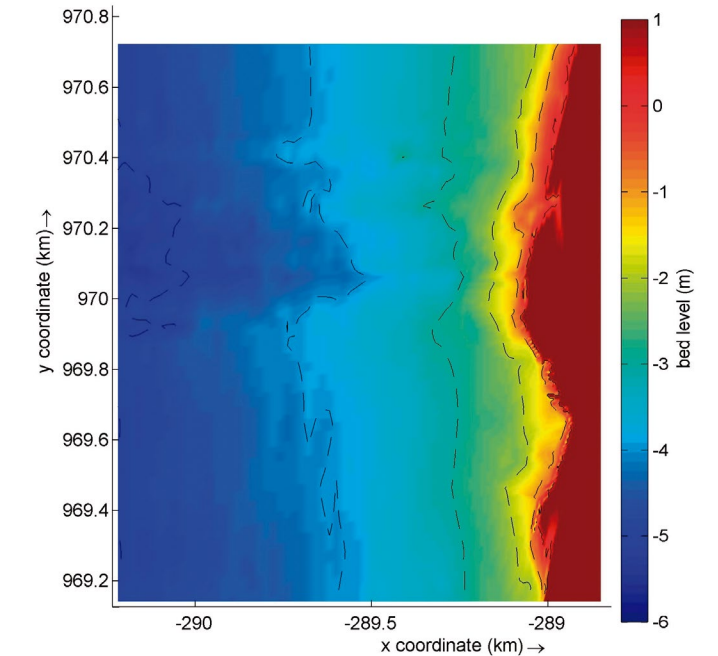


Figura 8.4.11 Zapata. Batimetría final con la alternativa 2 (Muro de enrocado y espolones). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

de la alternativa del muro de enrocado, se generó erosión y una zona de sedimentación justo en frente de la costa. Estos resultados sugieren en esta zona un transporte perpendicular a la línea de costa.

Para los escenarios sin obra, tanto en Uveros como en Damaniel, se observó una acumulación de sedimentos justo en frente de toda la línea de costa, causada probablemente por un transporte perpendicular. También se observaron cambios poco significativos en la conformación de la línea de costa, en donde se encuentran obras costeras (espólón cerca al corregimiento de Uveros), lo que sugiere un deterioro de las mismas y un transporte litoral suficiente para mantener el equilibrio.

En cuanto a Zapata, la alternativa del muro de enrocado permite que la configuración de la línea de costa no se modifique. Enfrente de ese lugar, se observó un cambio en

la batimetría debido a la estabilización de la línea de costa y al transporte perpendicular. Los resultados sugieren una disminución de la erosión en la parte donde se ubicaría el nuevo enrocado. Para la alternativa 2, muro de enrocado y espólón, la configuración de la línea de costa sufre un cambio importante cerca del espólón (acreción al norte, erosión al sur). En general, se observan procesos intensos de erosión a lo largo de la línea de costa en las zonas que no estarían protegidas por el enrocado. En esos lugares, el material erosionado se transporta costa afuera formando una barra sumergida.

Para el sector punta Las Vacas, la primera alternativa, muros enrocados (tablestacado) en la parte sur y las celdas experimentales en la zona norte, se observa cómo la línea de costa tiende a equilibrarse. Esto en parte se debe a que esta alternativa no obstruye el paso de sedimentos. Se pre-

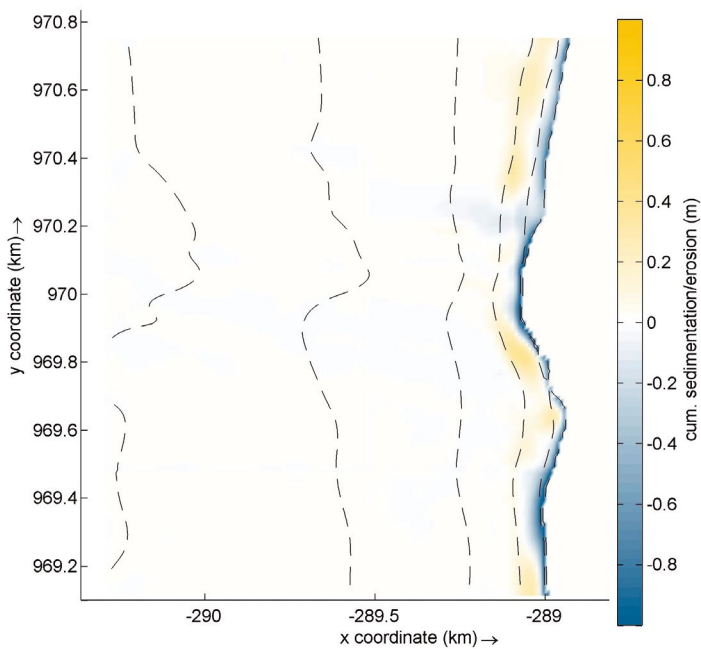


Figura 8.4.12 Zapata. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

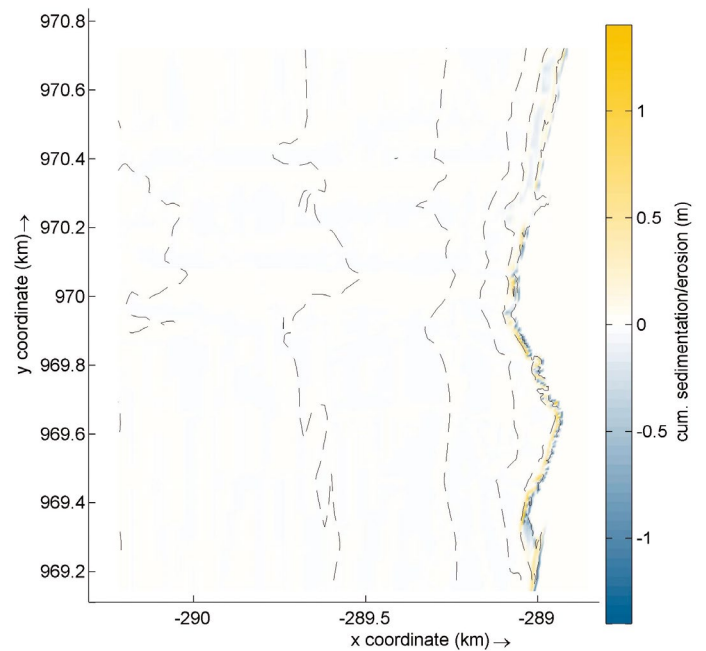


Figura 8.4.14 Zapata. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Muro de enrocado y espolones). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

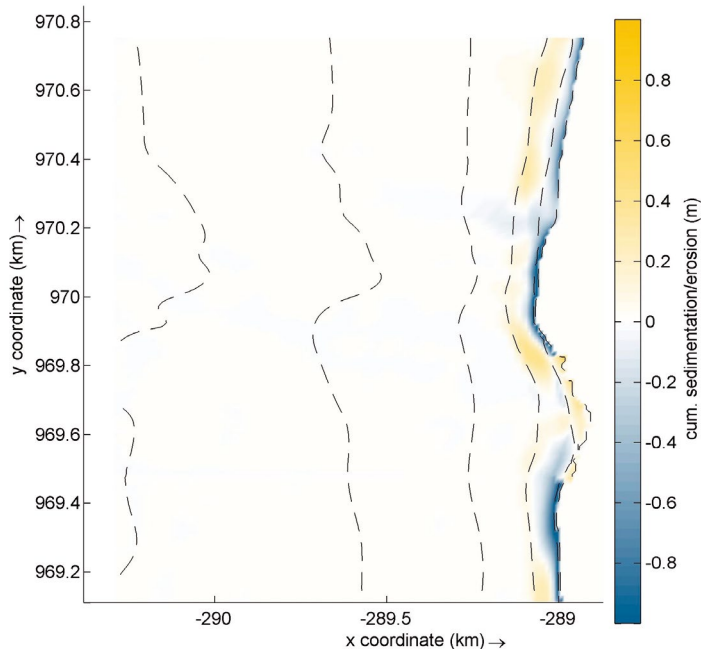


Figura 8.4.13 Zapata. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Muro de enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

senta, además, una acumulación de sedimentos en la parte intermedia entre las celdas experimentales y el muro. Para la alternativa 2, muro enrocado (tablestacado) en las bahías norte y sur, se observa cómo la línea de costa retrocede en la parte norte y sur en donde no están las obras, manteniendo estable solo la zona donde se establecen las obras. Los resultados sugieren que el sedimento que es transportado de Sur a Norte, forma una barra sumergida a lo largo de la línea de costa. Para la alternativa sin obras, los resultados mostraron una ligera acreción en la zona norte y procesos intensos de erosión en el punto intermedio entre las dos bahías. Esto debido en parte a la formación de una barra sumergida, lo cual podría provocar que el transporte de sedimentos de Norte a Sur quede atrapado allí.

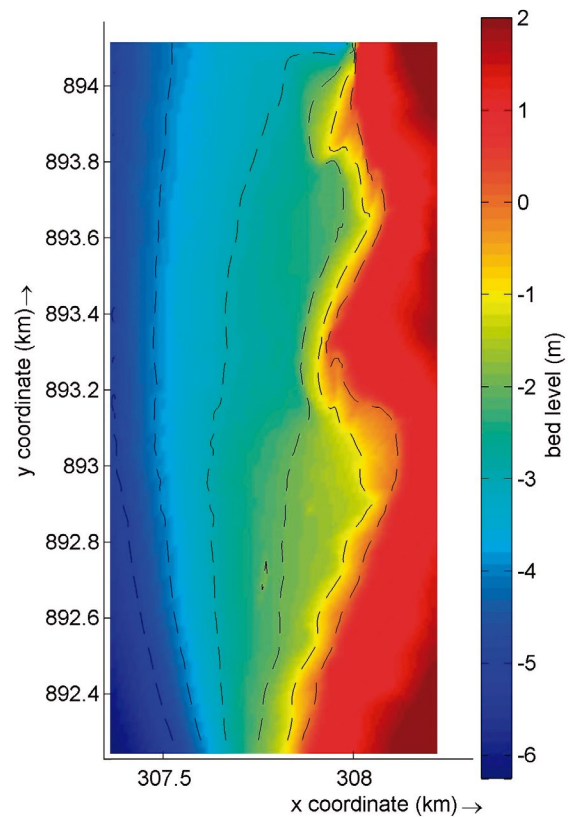


Figura 8.4.15 Punta Las Vacas. Batimetría final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

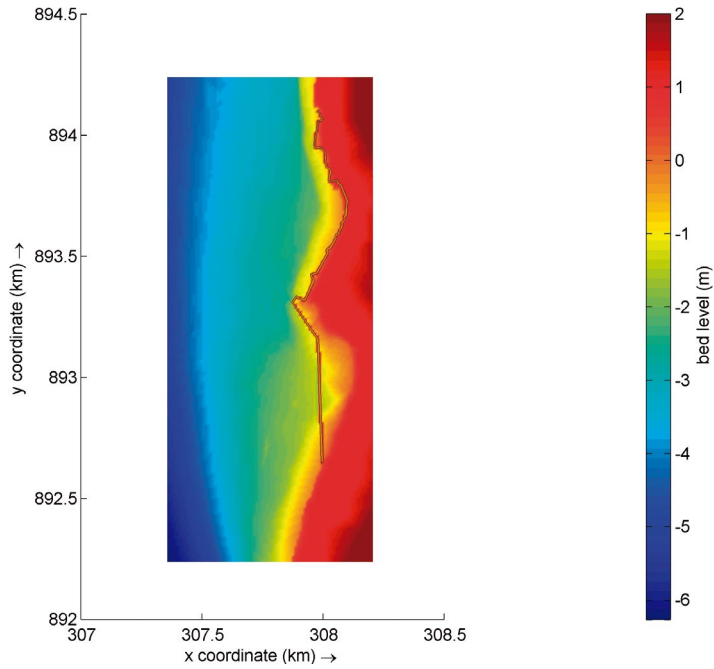


Figura 8.4.16 Punta Las Vacas. Batimetría final con la alternativa 1 (Muro de tablestacas, muro de enrocado y celdas experimentales). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

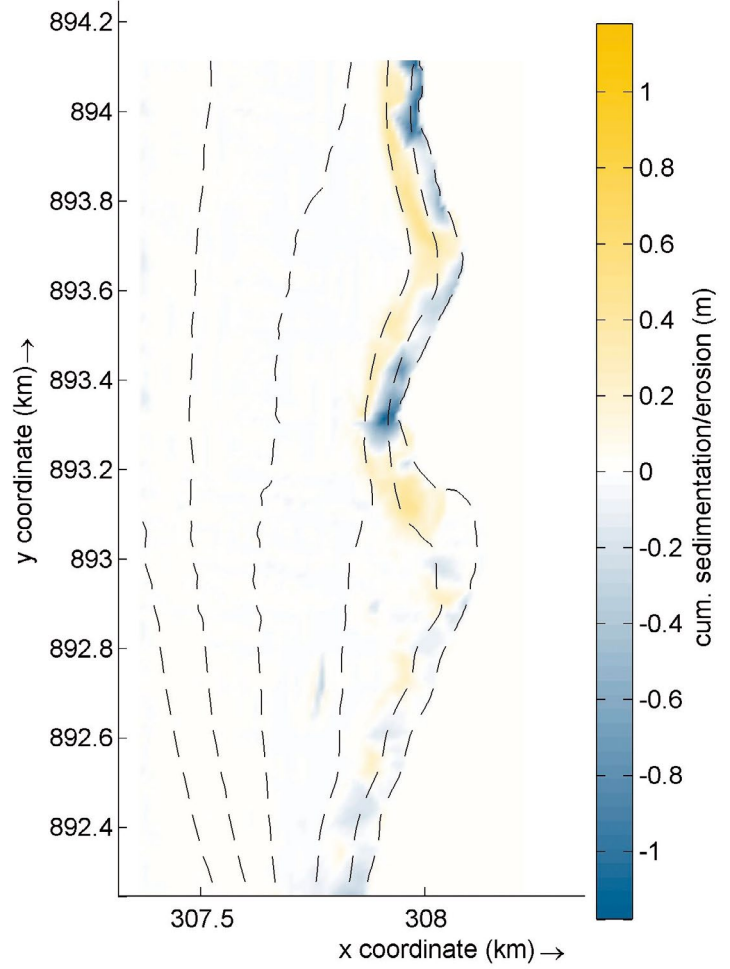


Figura 8.4.18 Punta Las Vacas. Acreción/Erosión final sin obras de protección costera. (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

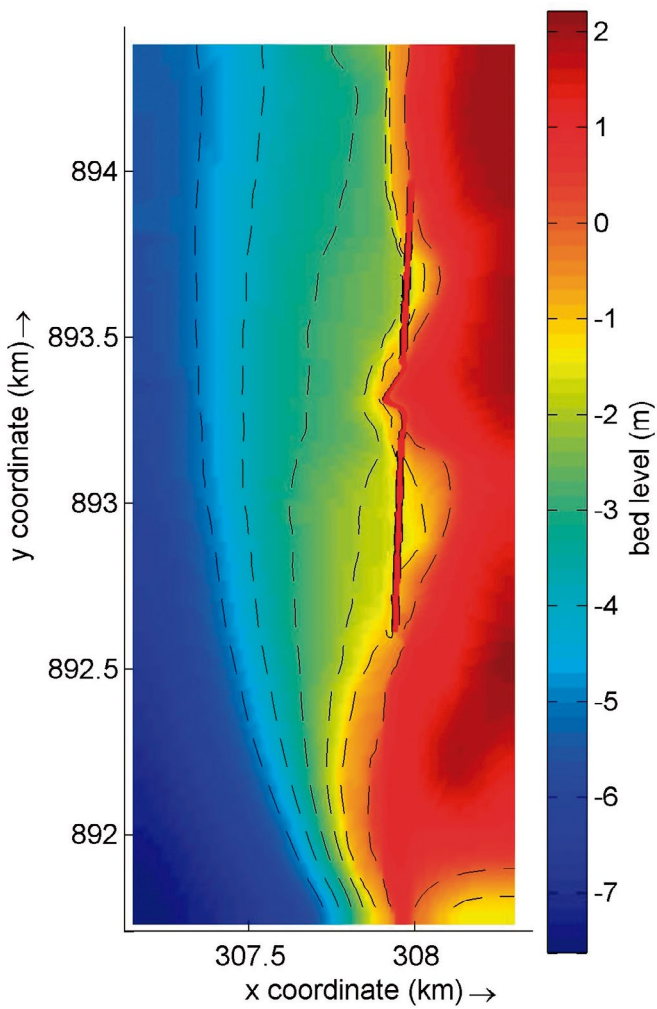


Figura 8.4.17 Punta Las Vacas. Batimetría final con la alternativa 2 (Muro de tablestacas y muro de enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

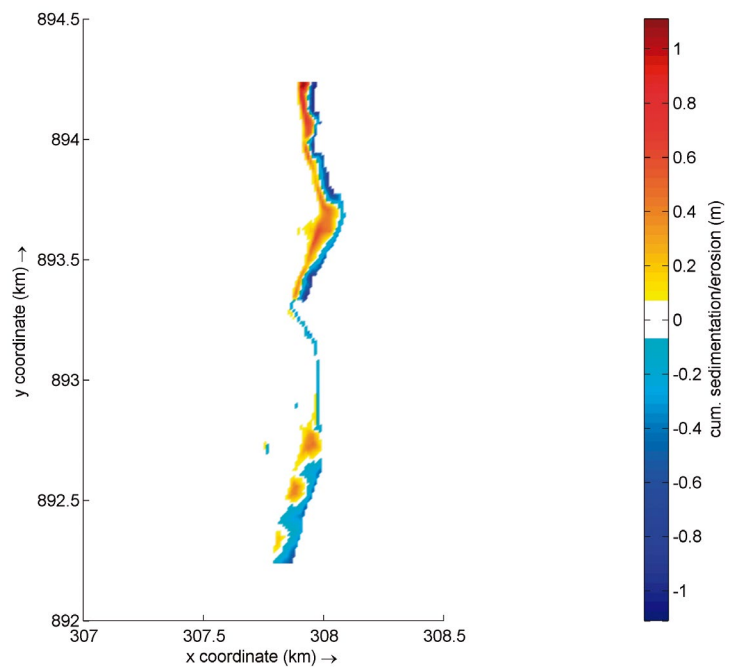


Figura 8.4.19 Punta Las Vacas. Acreción/Erosión final con la alternativa 1 (Muro de tablestacas, muro de enrocado y celdas experimentales). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

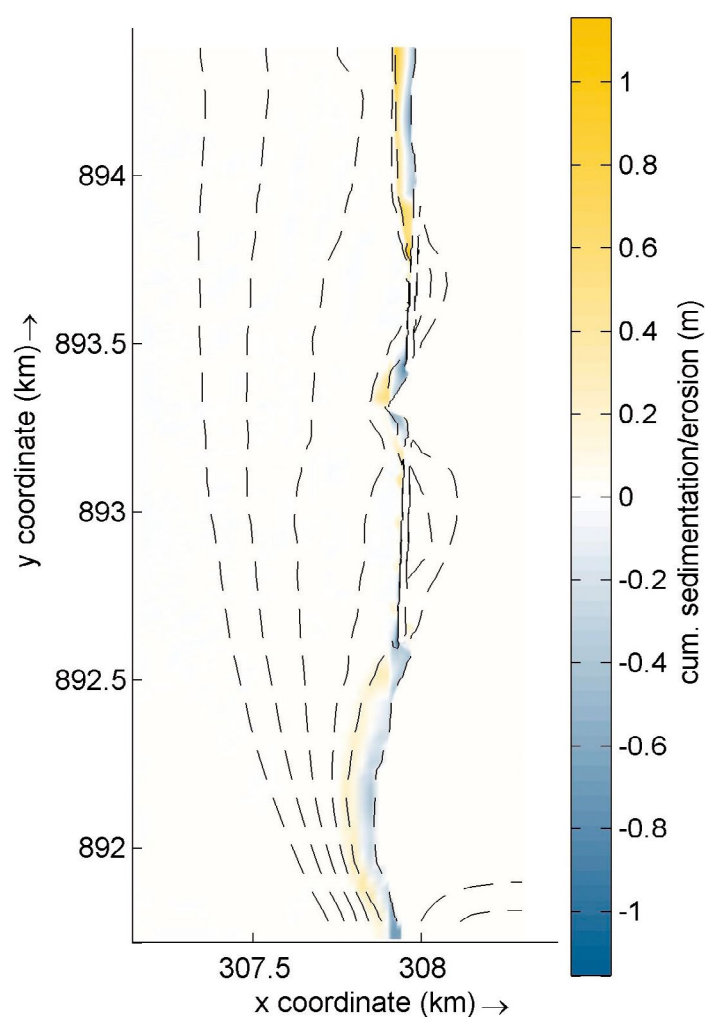


Figura 8.4.20 Punta Las Vacas. Acreción/Erosión final con la alternativa 2 (Muro de tablestacas y muro de enrocado). (Fuente: Elaboración propia en Xbeach – Subcomponente Modelación Transporte de Sedimentos, 2019).

8.4.5 Referencias

Correa, I., Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes - Turbo) costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, 33(1), 07-28. Deltares. (2011b). Multifunctional use the water defences (Dutch: Multifunctioneel medegebruik van de waterkering). Technical report, Code: 1204871-000-VEB-0009.

INVEMAR. (2002). Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia: Año 2001. Santa Marta, Colombia.

INVEMAR. (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe Colombiano. 123p.

Roelvink, J., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., McCall, R. (2010). XBeach Model Description and Manual. Technical report, Unesco-IHE, Deltares and Delft University of Technology, Delft.

Rompeolas

Capítulo 9°

Sección
vial

Espigón

EROSIÓN
COSTERA

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 9°

Componente

Diseño de Obras

Autor

Raúl Andrés Montoya Sánchez
(PhD en Ingeniería)

9.1 Introducción

9.1.1 Generalidades de las obras, ventajas y desventajas

Para seis sitios del departamento de Antioquia, específicamente en las zonas de volcán de lodo, *Zapata*, río *Hobo*, *Uveros*, *Damaquiel* y punta *Las Vacas*, se presentan varias alternativas de construcción para mitigar y controlar los procesos erosivos que están ocurriendo actualmente en estos lugares. Las soluciones más comunes utilizadas en Colombia para enfrentar los efectos adversos de la erosión costera son la implementación de obras duras, utilizando material de origen rocoso (enrocados); de obras blandas (usando rellenos de arena) o una combinación de ambas.

Los enrocados han sido utilizados tradicionalmente como la primera opción para combatir la erosión en las costas de Colombia y alrededor del mundo, utilizándolos principalmente como obras de infraestructura tales como diques, espigones (espolones), rompeolas y muros de contención. Cada una de estas obras ha sido utilizada para resolver el problema local identificado, pero dejan desprotegidas las zonas aledañas, debido al constante impacto del oleaje, que es el principal causante de la erosión.

Si bien, los enrocados han sido utilizados por muchas décadas dando resultados beneficiosos (siempre y cuando la obra esté bien ejecutada), en muchos casos generan más problemas, agravando aún más la situación, ya que el problema de erosión se traslada y extiende a otro sitio, ocasionando impactos socio económicos y ambientales adversos para la región. Por esta razón, la construcción de una obra de enrocados en el medio marino requiere de un estudio muy detallado de las condiciones ambientales y meteoceánicas en la zona de instalación, para determinar los efectos en su entorno que pueda causar la obra seleccionada.

Cabe resaltar que, una obra que ha dado buenos resultados en otros sitios costeros, tal vez no podría ser replicada en la zona de estudio debido principalmente a que las condiciones de oleaje, corrientes costeras, precipitación y tipo de sedimento transportado serán distintas.

En las últimas ocho décadas se han documentado los beneficios y desventajas de todos los tipos de obras de ingeniería costera que han sido implementadas en el borde

costero y en zonas aledañas a la costa. Las obras más comunes ejecutadas en las costas de Colombia para brindar una solución al problema erosivo son los espigones y rompeolas. En las costas del departamento de Antioquia, estas estructuras también se han implementado, originando en gran parte de los casos efectos adversos muy negativos.

Los espigones son la obra de ingeniería dura más utilizada, construyéndose generalmente perpendiculares a la orilla para impedir el tránsito normal de la arena a lo largo de la playa. El objetivo principal de los espigones es estabilizar la costa contra la erosión producida por el movimiento de arena. Si bien este tipo de estructuras construidas en el mar son muy efectivas, también tienen sus inconvenientes. Las principales ventajas de la construcción de los espigones incluyen: a) Son efectivos para controlar la erosión debido al transporte de sedimentos a lo largo de la orilla. b) Se tiene mucha información sobre el comportamiento de los espigones en variadas condiciones ambientales. c) Se construyen desde la playa hacia el mar, siendo relativamente económica su construcción. d) No cambian las condiciones de la zona de rompimiento de las olas. e) Pueden construirse con muchos tipos de materiales diferentes (piedra, pilotes, tablestacas, gaviones, bolsacreto, etc.) y f) Permiten ajustar sus dimensiones después de construidos para ajustarlos a los efectos generados.

Las principales desventajas de los espigones son: a) No son efectivos para impedir la pérdida de arena hacia el fondo del mar; b) Las corrientes fuertes de agua a lo largo de sus flancos producen pérdida de arena hacia el fondo del mar y c) Pueden causar erosión en las playas vecinas al impedir el transporte de sedimentos a lo largo de la orilla.

Por otra parte, los rompeolas son obstrucciones que se construyen alejadas de la playa paralelas a la orilla y cuyo objeto es el de amortiguar o impedir el paso del oleaje, a la vez que cumplen la función de retener la arena de la playa. La efectividad del rompeolas depende del nivel de protección y de la longitud de playa que protejan. Los factores más importantes por considerar son la altura, la longitud, la separación de la orilla y las características de transmisión de la ola.

Las principales ventajas de la construcción de un rompeolas: a) Son efectivos para controlar tanto la erosión por transporte a lo largo de la orilla, como el transporte de arena hacia el fondo del mar. b) Son muy efectivos para estabilizar líneas de playa y proteger estructuras junto a la orilla. c) Pueden diseñarse permitiendo el paso de arena y controlar la tasa de transporte de sedimentos y d) Reducen en forma significativa la altura de las olas junto a la playa. Las principales desventajas son: a) Suelen ser costosos porque se requiere construirlos lejos de la playa. b) Afectan significativamente las características de la zona de rompimiento de las olas y pueden restringir la práctica de algunos deportes. c) Constituyen un peligro serio para la navegación. d) Pueden disminuir la calidad del agua si dificultan la recirculación de agua y e) Pueden conectarse con la playa formando depósitos de arena conocidos como

“tómbolos”, los cuales modifican la dinámica litoral.

Independiente de la obra a construir, ya sea espigón o espolón, se deberá realizar una obra complementaria, un relleno de arena para estabilizar de cierta manera su balance.

En algunos casos, los espigones o rompeolas, tal vez no sean la alternativa más eficiente o apropiada para controlar o mitigar el proceso de erosión que afecta una determinada zona, sobre todo en sitios en donde la geomorfología está conformada por acantilados con pendientes muy pronunciadas, como ocurre en ciertas regiones costeras del departamento de Antioquia. Este tipo de geomorfología costera requiere una atención especial, porque las rocas que conforman los acantilados son de baja resistencia, muy susceptibles a la meteorización debido a la erosión subaérea (causado por las precipitaciones), en conjunto con el efecto erosivador del oleaje, el cual hace que en la base del acantilado se socave aumentando aún más la tasa de erosión y por consiguiente, la pérdida de terreno y el retroceso de la línea de costa.

Para controlar este tipo de problema se requiere la implementación de otra clase de enrocados como son los muros costeros.

Los muros de roca se construyen paralelos a la costa y tienen como objetivo mantener o prevenir el deslizamiento del suelo, mientras brindan protección contra las olas (UN-FCCC, 1999). Aunque su función principal es la reducción de la erosión, tienen una función secundaria como defensa contra las inundaciones costeras. Los muros se usan con frecuencia en lugares donde existe una erosión extrema de la costa que puede llegar a provocar un daño excesivo en las carreteras, las casas y los edificios que pueden incluso desplomarse hacia el mar, tal como está ocurriendo en la zona costera del departamento de Córdoba. Sin embargo, este tipo de obras no tratan las causas de la erosión, pero sí pueden detenerla (French, 2001).

La principal ventaja de los muros de enrocados marinos es que proporcionan un alto grado de protección contra la erosión. Una estructura bien mantenida y diseñada adecuadamente también fijará el límite entre el mar y la tierra, para garantizar que no se produzca más erosión; esto es beneficioso si la línea costera es el hogar de infraestructura importante para los pobladores. Los muros marinos también tienen un requerimiento de espacio mucho menor que otras defensas y los costos generales de construcción pueden ser menores. Si el muro se diseña para que tenga una pendiente, esto permitirá la rotura de las olas y, por lo tanto, la disipación de energía, mientras que las superficies irregulares dispersan la dirección de reflexión de las olas (French, 2001).

Por otra parte, la principal desventaja es la disponibilidad de sedimentos que también se ve afectada por la construcción de los muros. Una vez que se construye un muro, la costa queda protegida de la erosión y se detiene el suministro de sedimentos. Esto causa la falencia de sedimentos en los sitios ubicados a lo largo de la costa, en la di-

rección de la deriva costera, pudiendo inducir la erosión en estas áreas aledañas a las obras. Aunque los muros evitan la erosión de las costas protegidas, la costa sigue siendo libre de responder a las condiciones naturales. Esto significa que las áreas no defendidas adyacentes al muro podrían moverse hacia el interior causando una aparición escalonada a la costa (French, 2001).

A continuación, se describen las obras propuestas para los sitios indicados anteriormente. Se discuten los problemas encontrados en cada uno de ellos y las soluciones propuestas. También se mencionan las obras que se propusieron inicialmente que, posteriormente, fueron descartadas.

9.2 Datos

9.2.1 Disponibilidad de información

El buen desempeño y la durabilidad de una obra marina depende fundamentalmente de poder determinar con exactitud su dimensión estructural.

Las formulaciones actuales utilizadas para calcular las dimensiones de una estructura requieren conocer con antelación en la zona de estudio las condiciones ambientales que puedan afectar la estabilidad estructural de una obra, y por consiguiente su durabilidad. La información ambiental que se utiliza normalmente en ingeniería de costas incluye: el oleaje, las corrientes, el tipo de suelo y la topografía. Para esto se deben abordar estudios que permitan conocer en detalle el comportamiento de estos parámetros.

Estudio de oleaje

El oleaje representado por su altura significativa, periodo pico/medio y dirección de incidencia, es el parámetro ambiental fundamental que determinará en gran medida la dimensión de una estructura y el tipo de roca utilizada. Con estos datos, se determinan los periodos de retorno que son utilizados como información base para estimar la altura de diseño y el tamaño nominal de las rocas. Además de estos parámetros, se debe realizar un análisis de refracción, de reflexión y de difracción del oleaje para cuantificar la efectividad de la estructura frente a la energía incidente del oleaje.

Lamentablemente, no se cuenta con una serie de tiempo del oleaje lo suficientemente larga que abarque más de 20 años de información. Solo se tienen 10 años de registros producto de la modelación en la primera época seca del año: enero-febrero-marzo, cuando el oleaje es más intenso. Esta limitación de datos obligó a utilizar datos de oleaje de re análisis globales como Era-Interim, los cuales se usaron para estimar (como una primera aproximación) los periodos de retorno, extrayendo de esta base de datos el punto geográfico más cercano (unos kilómetros) de la localización de las estructuras (rompeolas, espolón y muros). Estos re

análisis se caracterizan por subestimar las condiciones de oleaje, lo que conlleva a que las dimensiones estructurales puedan estar también subestimadas. Por lo tanto, se recomienda hacer un estudio detallado del oleaje en la posición en donde se colocarán las estructuras.

Estudio de suelos

Dependiendo del tipo de obra a realizarse es importante este estudio para garantizar la estabilidad estructural. En el caso particular de la zona de punta Las Vacas (Turbo), se propone el diseño de un muro de tablestacado, el cual requiere conocer en detalle el tipo de suelo, ya que la profundidad de enterramiento de la tablestaca depende de este. El desconocimiento de esta información en el diseño del tablestacado, obligó a utilizar los resultados de un estudio de suelos realizado por una consultora para la construcción del Puerto Pisisí en la misma zona de Turbo. Cabe resaltar que, si bien esta información es útil, existe la probabilidad que el dimensionamiento del muro esté sub o sobreestimado, afectando los costos de construcción de esta obra.

9.3 Métodos

Es importante mencionar que, debido a la carencia de información de campo, el dimensionamiento de todas las obras propuestas fue realizado usando principalmente:

- Información secundaria, estimando los periodos de retorno del oleaje usando reanálisis globales. Si bien, está disponible esta información, no puede utilizarse para estimar altura de ola de diseño en estructuras muy costeras, debido a que las olas cuando se propagan en zonas de aguas someras sufren una transformación alterando principalmente su altura y dirección final.
- Valores medios. En el caso de las pendientes y las alturas de las cimas de los taludes en los acantilados de las zonas de río *Hobo* y *Zapata* se consideraron valores medios.
- Estimaciones teóricas. A falta de información de caudales en el río *Zapata*, se utiliza la ecuación de Manning para estimar los caudales medios y suponiendo un caudal extremal para el diseño del revestimiento en el río en la zona de Zapata.
- Información entregada por la orto fotografía. Las imágenes disponibles se utilizaron para estimar las dimensiones de los espolones a restaurar en las zonas de Uveros y Damaquiel.

Considerando los puntos tratados anteriormente, todos los cálculos obtenidos para estimar las dimensiones y la cantidad de materiales requeridos en cada una de las obras propuestas, son aproximaciones, las cuales tienen asociadas un cierto grado de error. Por esta falta de información, principalmente de campo, se optó por realizar suposiciones y en algunos casos, se tuvieron que considerar valores medios. Esto puede afectar la determinación de las cantidades de materiales requeridas en cada obra y, por consiguiente,

el costo de las mismas.

Un ejemplo de esto, es el dimensionamiento de la obra del revestimiento que se construirá en el río en la zona de *Zapata*. Este diseño fue realizado sin contar con información reciente (caudal, ancho, tipo de sedimento transportado, etc.). Uno de los parámetros fundamentales es el caudal del río, el cual determina el tipo de rocas a utilizar en el diseño. Por este motivo, los errores que se pudieron cometer deben ser considerados.

Por lo tanto, se recomienda una confirmación del dimensionamiento de las obras, con información primaria y utilizando mediciones en campo en cada una de las zonas de estudio. Es importante realizar la topografía de detalle, sobre todo en obras relacionadas con el abatimiento de un talud.

9.4 Resultados

9.4.1 Historia, alternativas propuestas

9.4.1.1 Volcán de lodo

En el año 2010, la empresa consultora *Aqua & Terra* (AyT) diseñó unas estructuras costeras para controlar el problema de erosión, proceso que actualmente está afectando la zona en donde se encuentra ubicado el volcán de lodo (Figura 9.1). Las obras propuestas consisten en tres rompeolas (tómbolos), en donde en cada esquina de este se tendrá un refuerzo adicional conocido como morros. Estos rompeolas estarán conectados con la costa mediante tres secciones viales. Además, se propone la construcción

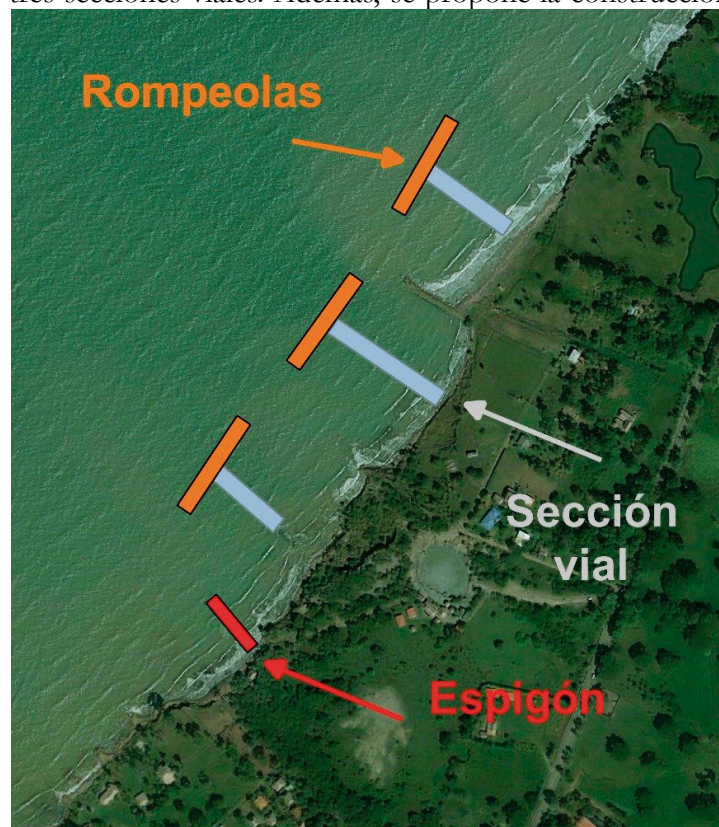


Figura 9.1 Ubicación de las obras en la zona del volcán de lodo, municipio de Arboletes. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

de un espigón (espolón) y finalmente, una obra de relleno de arena que será ejecutada después de la construcción de los enrocados.

Esta zona tiene una particularidad con respecto a las otras zonas de estudio en el departamento de Antioquia y se debe principalmente a que existe una licencia ambiental para la ejecución de estas obras. Esta licencia ambiental estipula que cada una de las obras por ejecutarse deben construirse con una cantidad determinada de material de rocas. La licencia permite hacer cambios en la dimensión de la estructura más no alterar la cantidad de materiales empleados en su construcción. Este es el primer problema encontrado. También se encontraron otros problemas mencionados a continuación:

* Los diseños estructurales no fueron creados por la Universidad de Antioquia, lo que implica que no se dispone de toda la información de cómo fueron realizados los cálculos estructurales y del relleno de arena. Esta información se omite en los informes presentados por la consultora.

* Las isobatas han cambiado de posición desde 2010 hasta la última batimetría realizada en el año 2018, retrocediéndose un poco más hacia la costa. Esto quiere decir que las profundidades en donde se colocarán las estructuras también cambiarán de posición, lo que conlleva a dos posibles alternativas por resolver: la reubicación de las estructuras o el redimensionamiento de cada obra.

El primer punto significó un gran problema, porque no pueden reubicarse las estructuras sin tener que modificar obligatoriamente las cantidades de materiales empleados en cada obra. Esta opción finalmente se descartó. Entonces se optó por el redimensionamiento de cada estructura, de tal forma que se pueda mantener la cantidad de materiales. Este fue un reto importante, porque se desconocían las formulaciones utilizadas por la empresa para determinar la dimensión estructural y la formulación para estimar los volúmenes de rocas. Finalmente se logró hacer coincidir las cantidades de las obras permitidas por la licencia ambiental.

Cada rompeolas tendrá una longitud de 96 metros y una separación entre ellos de aproximadamente 80 metros. La ubicación de estas estructuras con respecto a la línea de costa variará entre los 86 a 140 metros de longitud.

El espolón (espigón) tendrá una longitud de 70 metros. En la tabla 9.1 se muestran los parámetros que fueron modificados y posteriormente utilizados en el redimensionamiento de las obras. La longitud de cada rompeolas originalmente fue de 100 m y se redujo a 96 m. En cambio, la longitud del espolón no sufrió modificaciones. Se modificó la altura de coronación y altura total de la estructura. En las figuras 9.2 y 9.3 se muestran los esquemas de diseño de un rompeolas y una sección vial modificada, respectivamente.

Una de las principales limitaciones para tener en cuenta al momento de construir obras en el mar, lejos del borde costero, es la utilización de embarcaciones que trasladen el material rocoso a la zona de construcción. En el caso particular de la zona de volcán de lodo y en sus alrede-

Estructura	Altura AyT m	UdeA m	Z m	H m	L m
Tómbolo 1	2.8	1.8	1.8	3.6	96
Tómbolo 2	2.8	1.8	2.2	4	96
Tómbolo 3	2.8	1.8	2.1	3.9	96
Espolón	1.65	1.65	0.9	2.55	69.5
Morro 1	2.8	2.25	1.8	4.05	9
Moro 2	2.8	2.25	2.2	4.45	9
Morro 3	2.8	2.25	2.1	4.35	9
Sección vial 1	0.7	1.03	1.8	2.83	108
Sección vial 2	0.7	1.05	2.2	3.25	140
Sección vial 2	0.7	1.03	2.1	3.13	86.5

Tabla 9.1 Altura de coronación inicial (AyT), altura de coronación final (UdeA), profundidad media (Z), altura total de la estructura (H) y largo de cada estructura (L). Las unidades son en metros. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

dores, no se cuenta con un puerto o un muelle en donde estas embarcaciones puedan cargar material. Debido a esta limitante deben buscarse otras alternativas que permitan la construcción de estos rompeolas sin tener que recurrir a la utilización de una embarcación.

Se considera que la opción más viable económica y estructuralmente, tomada por la empresa AyT fue el diseño de las secciones viales, cuya función principal es crear una vía que permita transportar el material de rocas para la construcción del rompeolas (los tómbolos). Estas estructuras indirectamente cumplen la función de un espolón, impidiendo el tránsito normal de sedimentos. Por lo tanto, en la zona del volcán de lodo, originalmente estaba contemplada la construcción de un espolón, pero indirectamente se construirán tres espolones más, considerando las secciones viales. Adicionalmente a estas secciones viales, ya existe un espolón en buen estado construido en la zona. Considerando la cantidad de estructuras en la zona del volcán de lodo, existe la posibilidad que estas construcciones causen un impacto posterior en zonas aledañas, el cual deberá ser analizado en futuros estudios con información primaria y modelos específicos.

Otra obra adicional que debe realizarse una vez terminado el enrocado (espolones, rompeolas y secciones viales) será un relleno compuesto de arenas con el cual se espera que se desarrolle una geoforma en la playa bien característico, conocido como un “tómbolo”, el cual es la respuesta dinámica de la playa debido a la construcción de los rompeolas. Para que el relleno sea efectivo, se requiere un entendimiento de los procesos que están ocasionando la erosión. Asimismo, se debe conocer la dinámica en la región que se plantea restaurar, de manera que se pueda determinar el tipo y origen del sedimento a utilizar y los métodos de relleno, detalles de los diseños planteados, las técnicas para monitorear los cambios en la costa y la respuesta esperada del sistema después de la intervención.

En el caso particular del volcán de lodo no se tiene conocimiento del tipo de arena que se utilizará en esta obra.

Esto es un requisito importante para estimar el volumen de arena requerido en el relleno. De la teoría (Dean 1991) existen dos formulaciones que se pueden utilizar para estimar el volumen de arena, condicionado así el perfil de playa intercepta o no la profundidad de cierre. En este sentido, esto es fundamental desde un punto de vista económico porque dependiendo del diámetro de arena de relleno a utilizar, el costo de la obra puede ser muy elevado. Por ejemplo, si se agrega arena de relleno con un diámetro menor a la arena nativa (arenas más finas), el perfil de playa no interceptará la profundidad de cierre. Esto quiere decir, que se necesitará más volumen de arena para el relleno, implicando un aumento en el presupuesto, el cual puede ser considerable si la diferencia de tamaño de arena es muy grande. Otro aspecto importante a considerar es que se debe agregar un volumen adicional de vertimiento antes que se produzca cualquier ancho de playa seca después del equilibrio. Por el contrario, si se agrega arena de relleno con un diámetro mayor (arenas más gruesas) el perfil de playa interceptará a la profundidad de cierre. Esto implica que los volúmenes de arena sean menores, reduciendo el costo de la obra.

Dado el desconocimiento de esta información se formularon dos aproximaciones para estimar el volumen de arena: uno considerando un diámetro de arena de relleno menor a la arena nativa y otro con un diámetro mayor. En ambos experimentos se estimó el volumen final de arena que calculó la empresa consultora, pero las características relacionadas con la dimensión de la playa son muy distintas.

Una conclusión importante en la zona del volcán de

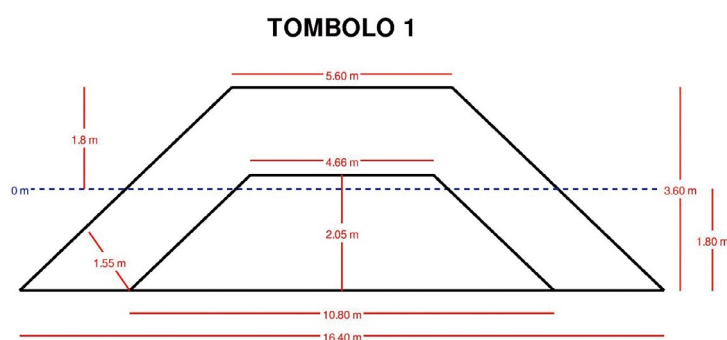


Figura 9.2 Diseño esquemático del Tómbolo 1 con dimensiones actualizadas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).



Figura 9.3 Diseño esquemático de la sección vial 1 con dimensiones actualizadas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

lodo, es que existe incertidumbre si las obras planteadas por la consultora AyT serán una solución efectiva para combatir el proceso erosivo, o si estas pueden originar un impacto ambiental negativo en zonas aledañas. Si bien los estudios presentados por la consultora pueden considerarse como una primera aproximación al problema, se requiere hacer estudios más detallados para investigar todos los impactos que puedan provocar todas estas estructuras en esta zona.

9.4.1.2 Río Hobo

El diseño original propuesto para contener el intenso proceso erosivo que afecta esta zona fue la construcción de dos rompeolas ubicados a 100 y 113 m de distancia desde la costa más cercana, un espolón y un revestimiento ubicado antes de la desembocadura del río. La construcción de las obras de infraestructura lejos de la costa presenta un desafío desde un punto de vista constructivo, debido a que se necesitan embarcaciones para transportar y para acomodar el material en la zona de construcción.

Cuando se solicitaron cotizaciones de embarcaciones, principalmente la barcaza que llevará el material de enrocados y el remolcador, a las empresas no les pareció viable la idea de venir a esta zona, principalmente porque no existe un puerto o un muelle para embarcar el material y sobre todo para atracar sus embarcaciones después de terminar sus labores. Este problema, es similar a lo ocurrido con los diseños en la zona del volcán de lodo. Una alternativa propuesta que reemplaza la utilización de embarcaciones, fue el diseño de las secciones viales desmontables, esto quiere decir, se construye una sección vial para construir el rompeolas y luego se desmonta para reutilizarlo en



Figura 9.4 Acantilado en la región de río Hobo. (Fuente: Fotografía Raúl Montoya).



Figura 9.5 Obras propuestas para combatir la erosión costera en la zona del río Hobo. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

la construcción del segundo rompeolas y posteriormente desmontarlo. Este diseño finalmente se descartó optándolo como una segunda alternativa de construcción.

En una salida a campo efectuada en el mes de marzo de 2019, se evidenció que esta alternativa no era la solución adecuada para afrontar el problema, sin tener que intervenir primero el problema del desprendimiento de terrenos en los acantilados causado por la erosión sub aérea y marina, evidenciándose el retroceso de la línea de costa (Figura 9.4). Debido a esto, se replantearon las obras propuestas inicialmente y se propuso un nuevo diseño.

La solución propuesta para contener la erosión costera sería la implementación de dos obras de ingeniería. La primera consiste en abatir (reperfilear) el terreno. En este procedimiento se realiza la remoción de tierra hasta dejarlo a la pendiente deseada, es decir, reducir la pendiente del acantilado. Esto permitirá evitar la erosión subaérea y además darle más estabilidad al terreno. La principal desventaja de esta obra es la pérdida de terreno adicional desde la cima del talud, el cual dependerá del ángulo final por reperfilear (Figura 9.5).

Los cálculos para estimar el volumen de tierra por remover pueden estar sobreestimados o subestimados, debido a que no se cuenta con mediciones topográficas de las alturas de las cimas. Este problema es abordado practicando varios experimentos con distintos ángulos de abatimiento y alturas de cima del acantilado. Finalmente, se seleccionó un ángulo de perfilamiento de 35° y una altura de cima promedio sin abatir de 11 metros. Este reperfileamiento obligará a las comunidades residentes en esta zona a ser reubicadas.

Una vez finalizada esta obra, se construirá un muro de rocas bordeando toda la zona costera con una extensión de 704 metros de longitud. En este diseño, se utilizarán 27 unidades de rocas distribuidas en tres capas por cada 0.65 m de avance del muro (Figura 9.6).

La solución de un muro de enrocados resolverá el problema de erosión local. Las zonas ubicadas al sur de la ins-

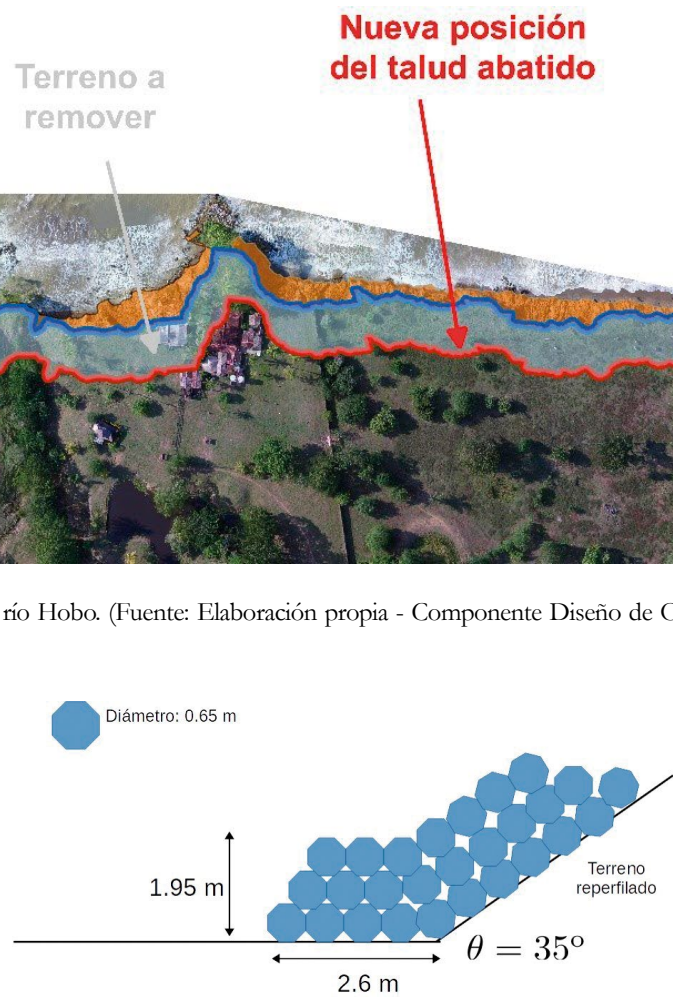


Figura 9.6 Diseño esquemático del muro de enrocados. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

talación del enrocado continuarán erosionándose.

9.4.1.3 Zapata

En el corregimiento de Zapata se ha evidenciado el fuerte retroceso de la línea de costa debido a la erosión. Para intentar mitigar esta problemática, se han tomado medidas como la construcción de un muro de enrocados y dos espigones ubicados en la zona poblada de este corregimiento. De estas dos obras, la única que ha cumplido su función de controlar la erosión, es el muro de enrocados. Como se ha mencionado en la zona de río Hobo, la implementación de un muro de enrocados sólo es efectiva como controlador de la erosión en la zona en donde se construye, dejando desprotegidas las zonas cercanas a éste. Un ejemplo de esta situación está sucediendo en la zona sur y norte del muro construido, donde la erosión sigue actuando y ocasionando el retroceso del litoral.

Los primeros diseños propuestos consistieron en la construcción de un muro de enrocados y dos espigones. Este muro tendría una longitud total de 504 m, el cual bordeará toda la línea de costa. El diseño estructural de este muro fue adaptado según la geomorfología en la zona de construcción. Debido a esto, se dividió el muro en 13 secciones, en donde se utilizarán dos tipos de estructuras; muros de pared y muros tipo espolón. Cada tipo de es-

estructura se utilizará dependiendo de la geomorfología de la sección. Esta opción fue descartada como la opción principal de diseño debido a que estos terrenos son propiedad privada. El diseño del muro se basó solamente en una fotografía aérea. Como se mencionó anteriormente, después de la salida a campo, estos diseños fueron descartados principalmente porque se necesita conocer las pendientes de los terrenos y estos rellenos pertenecen a privados.

La nueva alternativa para controlar la erosión en esta región es implementar dos nuevas obras (Figura 9.7). La primera es un revestimiento de rocas. Esta es una estructura que se ubica generalmente en el talud de los ríos con el objeto de disipar la energía de la corriente (Suarez, 2001), principalmente en época de lluvias. Este revestimiento tendrá una longitud de 71 metros, con dos capas de rocas. La primera capa tendrá un espesor de 1.32 m compuesto de 705.7 kg y la segunda tendrá un espesor 0.24 m compuesto de rocas 35,3 kg. Este muro tendrá una longitud

VOLUMEN DE ROCAS:

Capa 1 = 645.9314 m³

Capa 2 = 118.9816 m³

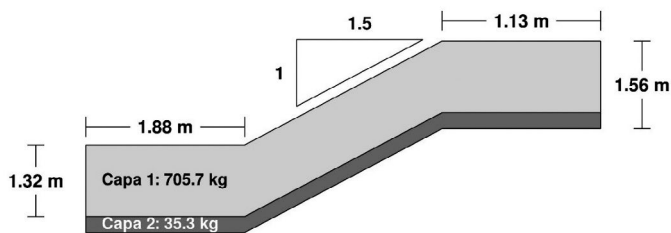


Figura 9.7 Diseño del revestimiento para la defensa fluvial en la zona de Zapata. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

total de 70 m y será una continuación del muro existente en la zona.

La segunda obra por construir, será el abatimiento de los terrenos que se encuentran cruzando el río, al norte del muro construido. El procedimiento de abatir un terreno es un método utilizado para disminuir la pendiente del talud con el fin de evitar posibles deslizamientos, pero también se ha utilizado para controlar el proceso de erosión. Este tipo de obras en las costas del departamento de Antioquia ha sido construido por particulares para proteger sus te-



Figura 9.8 Ejemplo de un terreno abatido cerca de la zona de Arboletes. (Fuente: Fotos Raúl Montoya).

rrenos de la erosión. Un ejemplo se muestra en la figura 9.8

En el caso de esta zona, el objetivo de este abatimiento será propiciar que el terreno tenga una inclinación de aproximadamente 30° para que las olas cuando rompan sobre este, disipen su energía mientras avanzan por el talud. El terreno que será abatido tendrá una extensión aproximada



Figura 9.9 Ubicación de las obras en la zona de Zapata. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

de 240 m de longitud. En la figura 9.9 se muestra la localización de las obras en la zona de Zapata.

9.4.1.4 Uveros

Para enfrentar el problema de erosión en Uveros, se proponen dos obras: una obra de ingeniería blanda (suave) mediante la conformación de un sistema de dunas creadas artificialmente, distribuidas en un sector del borde costero y la otra, la restauración del espolón.

El diseño de dunas propuesto para esta zona debe cumplir aspectos esenciales tales como: a) Proteger las casas, de las penetraciones del mar en época seca, en donde la acción del oleaje presenta su mayor intensidad, b) Facilitar el uso constructivo en áreas interiores y mejorar las condiciones estéticas, paisajísticas y de uso recreativo de la costa, pensando que, esta zona se adaptará en un futuro para uso recreacional y turístico.

El sistema de dunas artificiales contará con 11 dunas (Figura 9.10), con una longitud total de 476 m. La longitud de cada duna variará entre 42 y 44 m de longitud, y estarán distanciadas una de la otra por 4 m. Cada duna se encontrará en promedio a una distancia de 28 m de la zona de rompientes en época seca. Esta extensión puede ser mayor en la época de lluvias, cuando el oleaje reduce su intensidad y se extiende aún más la longitud de la playa seca.

El diseño estructural de cada una de las dunas artificiales tendrá una dimensión de 1.8 m de ancho de cresta, 3.0 m de ancho base y tendrá una altura de 1.5 m (Figura 9.11), y estará conformada por costales de fique de dimensión de 0.5 m de largo x 0.3 m de ancho y 0.3 m de alto.

Un aspecto importante a considerar una vez creadas las dunas artificiales es que se deben acondicionar agregando en su superficie arena extraída de la misma playa o puede utilizarse otro tipo de arena.



Figura 9.10 Localización de las dunas en el corregimiento de Uveros. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

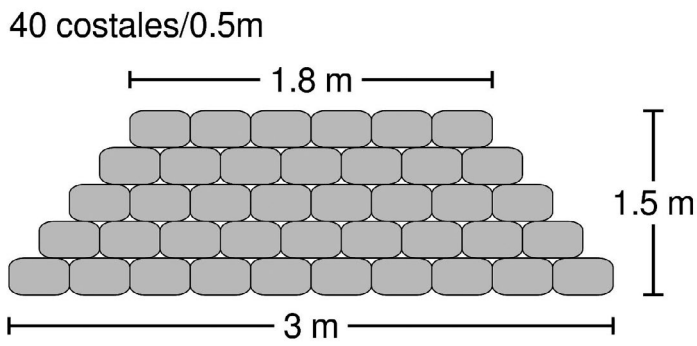


Figura 9.11 Esquema de diseño de una duna artificial compuesta por sacos de arena. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

En la superficie de la duna se deberá colocar una cobertura vegetal con especies tapizantes de fácil adaptación, principalmente vegetación de la misma localidad. Si bien, la duna artificial es una estructura rígida y estable, la colocación de vegetación provoca que las hojas causen un aumento de la rugosidad en la superficie propiciando una mayor unión de los granos de arena, que a su vez permitirá una mayor acumulación de arena, lo que lleva al desarrollo y crecimiento de las dunas (French, 2001). El aumento de la cobertura vegetal mejorará aún más la captura de arena como también ayuda al crecimiento (expansión) de las dunas.

Por lo general, podría tomar de dos a cinco años para que el pasto de la playa establezca un sistema de raíces saludable y hasta 10 años antes para que se obtenga la máxima resistencia a la erosión y a la rotura. Otro aspecto importante al momento de la creación de las dunas es la participación de la comunidad, ya que se plantea la necesidad de instalar un cerco a una distancia de un metro desde la base de la duna. Esto tendrá como objetivo impedir el tránsito por estas dunas y así tratar de evitar su prematura destrucción debido a personas que puedan transitar por encima de la duna o incluso perpetrar actos de vandalismo.

Por otro lado, el espolón a restaurar tendrá una longitud 56 m y un ancho base promedio de aproximadamente 6 m de longitud. Originalmente, este espolón no fue diseñado para resistir los impactos del oleaje sobre este, sino causar una barrera física que impida el tránsito normal de sedimentos y así instalar una zona de acumulación de arena en la dirección del oleaje incidente. Cuando se construyó el espolón, se utilizaron rocas de distintos tamaños y también bolsacretos (bolsas rellenas con cemento) en la punta del espolón. Si se observa la figura 9.12, también puede apreciarse que parte del espolón se encuentra sumergido.

El mantenimiento del espolón consistirá básicamente en dos etapas:

- * Ordenar las rocas dispersas y volverlas a instalar en su posición original.

- * Agregar dos capas de rocas entre 0.67 m - 0.71 m de diámetro nominal. Esto tiene por objetivo evitar que las



Figura 9.12 Espolón en la zona de Uveros. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).



Figura 9.13 Estimación media de la dimensión del espolón. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

rocas de menor tamaño se dispersen por el impacto del oleaje.

Para estimar el volumen de rocas que debe agregarse

para brindarle más estabilidad a la estructura, se estimó como una primera aproximación la dimensión original del espolón utilizando la ortofotografía de la zona (Figura 9.13).

Con esta información se estima el ancho base medio (B) de 6.48 m y un ancho de la cresta medio (A) de 2.615 m de longitud. Con las dimensiones estimadas y suponiendo que el espolón tiene una forma geométrica trapezoidal, se estima para el mantenimiento del espolón una cantidad aproximada 2964 unidades de rocas de diámetro nominal de 0.71 m; esta cantidad de rocas constituye un volumen de relleno de 1060.85 m³.

9.4.1.5 Damaquiel

Las obras que se realizarán en esta zona comprenden el mantenimiento de un espolón deteriorado y la construc-



Figura 9.14 Localización aproximada del muro de enrocados en la zona de Damaquiel. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

ción de un muro de enrocados (Figura 9.14).

El antiguo espolón por restaurar tiene una longitud aproximada de 92.2 m (Figura 9.15). Originalmente esta estructura fue construida con un solo propósito, impedir el flujo normal de sedimentos. En la actualidad, debido a la gran acumulación de arena después de su construcción, no toda esta estructura se puede considerar como un espolón, sino que parte de este se ha convertido en un muro con una forma tipo revestimiento, por detrás de esta estructura se encuentran inmuebles ocupados. Por esta razón, una sección del antiguo espolón es considerada propiamente espolón y al resto se le consideró como parte del muro a



Figura 9.15 Antigo espolón con una longitud de 92.2 m. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

construir.

Para reconstruir el espolón se utilizarán dos capas de

rocas, donde cada unidad de roca tendrá un diámetro nominal de 0.65 m, con un peso aproximado de 783 kg. En estas dos capas de rocas se utilizarán un total de 26 unidades por cada 0.65 m de avance del espolón, es decir, en una distancia de 1.3 m se necesitan 52 unidades de rocas. Considerando que el espolón tendrá una longitud de 40 m, se utilizarán un total de 1612 unidades. Esta cantidad constituye un volumen total de 443 m³ de rocas basáltica. El núcleo de la estructura estará construido por rocas que fueron utilizadas inicialmente en la construcción del espolón. Estas rocas se agruparán y se ordenarán por tamaños, en donde, las rocas de menor tamaño se instalarán en la base, seguidas de las rocas de mayor tamaño, y así sucesivamente. En la figura 9.16 se muestra el esquema del

● 0.65 [m] de diámetro
Volumen = 7.14 [m³/0.65m]

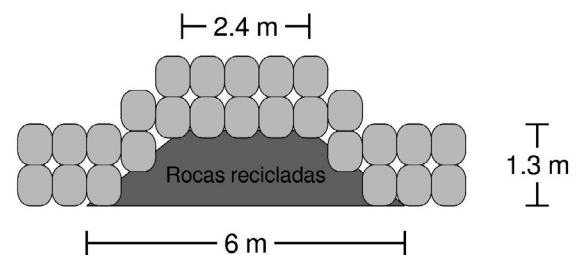


Figura 9.16 Diseño esquemático del espolón a reconstruir. El espolón tiene un ancho base de 6 m y un ancho de cresta de 2.4 m. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

espolón por restaurar.

El muro de enrocados tendrá una extensión de 745 m dividido en tres secciones: la primera sección tendrá una longitud de 52 m, la segunda con una longitud de 274 m y la tercera sección tendrá una longitud de 419 m. En este diseño, se utilizarán 18 unidades de rocas dispuestas en dos capas con una longitud lineal de enrocado de 5.85 m. De esta longitud se dispondrán tres unidades de rocas en la base del talud, de extensión de 1.95 m y 1.3 m de altura. Las seis unidades restantes que equivalen 3.9 m de longitud se colocarán en el talud. En la figura 9.17 se muestra el diseño esquemático del muro de enrocados para diferentes

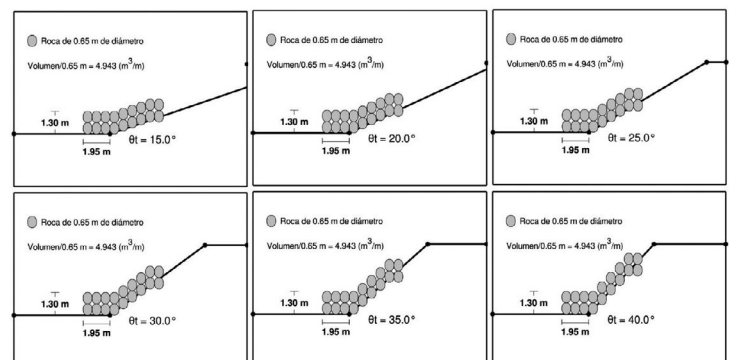


Figura 9.17 Diseño del muro de rocas para distintos ángulos de talud del terreno. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

pendientes del terreno.

Se optó por esta opción de diseño, debido dos motivos:

1 - No se dispone de información precisa para estimar las pendientes del terreno. Contar la cantidad de rocas, se adapta mejor a los diferentes tipos de pendientes que se puedan presentar a lo largo de las secciones de los muros definidos anteriormente.

2 - La estimación del volumen total de rocas no depende del ángulo del talud del terreno, sino de la cantidad de rocas utilizadas.

En el muro de enrocados se utilizarán un total de 20621 unidades de rocas, con un volumen total de 5663 m³ de roca basáltica. Adicionalmente, para brindar más estabilidad al muro, se colocará un geotextil impermeable en la base del enrocado.

9.4.1.6 Punta Las Vacas

Esta es una de las zonas en donde se desarrollaron varios diseños de enrocados principalmente muros y rompeolas. Uno de los diseños inicialmente propuestos fue un muro de enrocados con una sección peatonal, tal como se

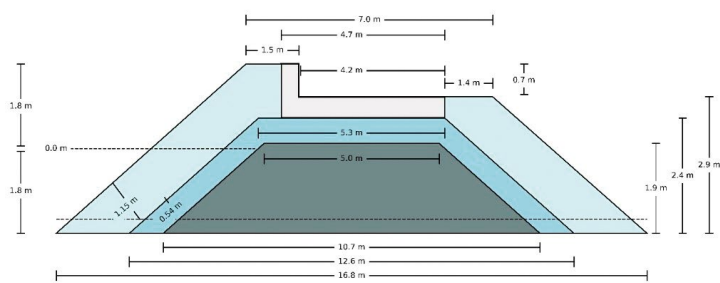


Figura 9.18 Diseño del muro de enrocados. Los colores indican distintos tipos de rocas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

muestra a continuación.

Finalmente, por recomendaciones de los asesores externos, se propuso el diseño de un muro de tablestacas (Figura 9.19) que posteriormente en la elaboración de los cálculos para determinar las dimensiones del muro, conllevaría a tener demasiadas complicaciones.

En general, las obras propuestas en esta zona consistirán en tres obras de ingeniería dura: dos muros de enrocados y un muro de tablestacado, y una obra de ingeniería blanda (relleno con arenas), que se efectuará una vez terminado el muro de tablestacado (Figura 9.19). En la figura 9.20 se muestra el esquema de diseño del muro de tablestacado y el muro de enrocados.

Un tablestacado es un muro de contención constituido por placas de hierro que cumple una doble función: impide que el agua avance sobre el terreno y ayuda a recuperar el terreno permitiendo nivelarlo. Las tablestacas han sido utilizadas en muchas obras de ingeniería tales como muros deflectores, protecciones fluviales, diques, estabilización



Figura 9.19 Ubicación de las obras en la zona de punta Las Vacas. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

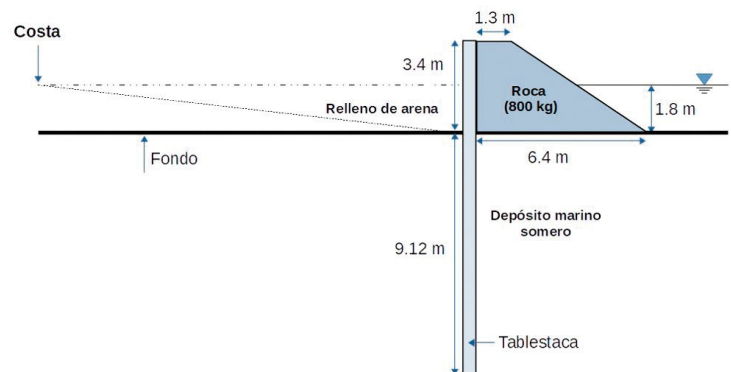


Figura 9.20 Esquema de diseño del muro de tablestaca con el muro de enrocados en una profundidad de fondo de 1.8 m. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

de terrenos, protección de riveras de ríos, lagos y mares, muros de contención, etc.

La longitud de una tablestaca se determina según las características del terreno, por ejemplo: el tipo de material que conforma el terreno como arenas, arcillas, limos, como también la profundidad de cada estrato que contiene estos materiales.

Usando los principios de geotecnia, se estima la profundidad de enterramiento de la tablestaca el cual contendrá el muro constituido por enrocados. En ambas opciones se hace la suposición que el muro de rocas se comporta como una sola capa que ejerce una presión sobre la tablestaca.

La principal dificultad en el diseño del tablestacado es el desconocimiento del tipo de suelo en donde se hincará cada unidad de la tablestaca. Sin embargo, la empresa TECNISUELOS en el año 2016, presentó un estudio de suelo requerido para la construcción del Puerto PISISI, en el municipio de Turbo.

El análisis de suelo realizado por la consultora en la zona de la construcción del puerto y áreas aledañas fueron de tres tipos: a) lodos limo arcillosos, b) arena limo arcillosas y c) depósito marino somero. Este último consiste en material que varía de arcilloso a arenoso, la arena se muestra desde fina a media no consolidada.

En cada uno de los tipos de suelos encontrados se estimó la longitud de enterramiento y la longitud total de la tablestaca en cada sección batimétrica. Finalmente, se optó por la opción más probable de encontrar; un suelo tipo depósito marino somero.

Estrato	Peso específico seco	Peso específico saturado	Ángulo de fricción interna	Coefficiente de cohesión
Escolleras	29 k Nm ³		45°	0 k Nm ³
Depósito marino somero	16.5 k Nm ³	7 k Nm ³	19°	0 k Nm ³

Tabla 9.2 Pesos específicos y ángulo de fricción utilizados en la determinación de la profundidad de enterramiento. (Fuente: TECNISUELOS, 2016).

Dada la complejidad en los cálculos, se utilizó la versión DEMO del software comercial GEO5. El inconveniente de la versión DEMO es que no permite almacenar figuras, ni el archivo con los cálculos, ni presentar el reporte con los resultados, pero tiene la ventaja que permite realizar los cálculos geotécnicos con la geometría del muro de escolleras. En la figura 9.21 se muestra el diseño del tablestacado usando GEO5.

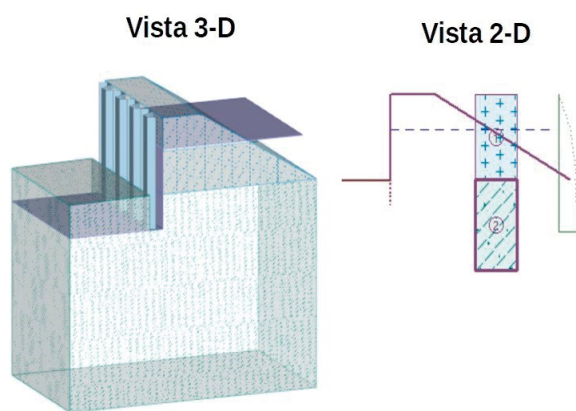


Figura 9.21 Esquema tridimensional de la tablestaca y el muro de usando GEO5. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

Utilizando el perfil batimétrico (Figura 9.22) en los tramos 1 a 3 se diseñó una tabla de frecuencias con el objetivo de acelerar los cálculos en la determinación de la profundidad de enterramiento, y también determinar la longitud total de cada tablestaca utilizada. La tabla de frecuencias fue creada usando seis segmentos equiespaciados con un ancho de intervalo de 0.3 m. En cada uno de los segmentos se determinó la distancia total y se seleccionó el valor máximo del intervalo como la profundidad de diseño de la estructura, el cual es utilizado para determinar la lon-

gitud total del tablestacado. Los resultados se muestran en la tabla 9.3.

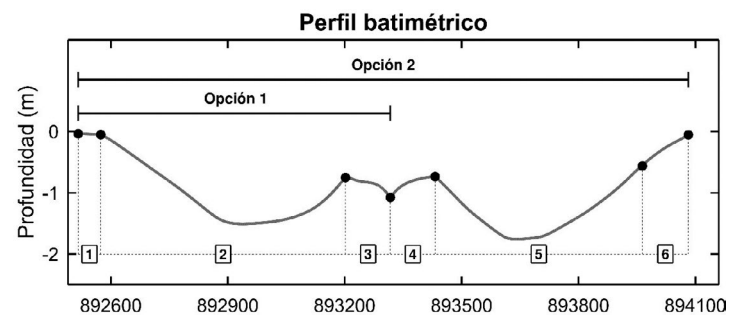


Figura 9.22 Variación de la profundidad en la localización del muro de tablestaca. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

LimI	-LimS	Z	D
m	m	m	m
0.00-0.30		0.3	125.0
0.30-0.60		0.6	67.0
0.60-0.90		0.9	189.0
0.90-1.20		1.2	147.0
1.20-1.51		1.5	303.0

Tabla 9.3 Tabla de frecuencias absolutas de la variación del perfil batimétrico en la obra de tablestacado. LimI y LimS es el límite inferior y superior del intervalo, Z es la profundidad de diseño, D es la distancia total. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

Posteriormente, la información de la tabla 9.3 es ingresada al software GEO5 para estimar la longitud total de la tablestaca. En el muro de tablestacado, se utilizarán 1386 tablestacas con un peso total de 1019 toneladas. La profundidad mínima de hincado será de 5.52 m en la zona más somera del muro (a 0.3 m), alcanzando una profundidad máxima de hincado 9.12 m a una profundidad de 1.5 m. Una vez determinada la profundidad de enterramiento, se seleccionó el modelo PU-32 de tablestaca por su resistencia a soportar las presiones. La selección errónea de la tablestaca puede causar que esta rote en un punto aproximadamente a medio camino entre el nivel de excavación y su base, como también cause una desviación (deflexión) de su posición original produciendo inestabilidad en el muro. Para observar esto, adicionalmente se utilizó el software libre ProSheet de la empresa Arcelormital, fabricante de tablestaca de acero. Se eligió este software porque permite ver la rotación y la desviación de la tablestaca debidas a las presiones que ejerce el terreno sobre el modelo de tablestaca seleccionado (Figura 9.23).

Si se construye el muro solamente con tablestacado, el impacto de las olas sobre esta estructura causará una reflexión del oleaje (el oleaje se desvía) ocasionando que el oleaje golpee en otras zonas cercanas provocando que el

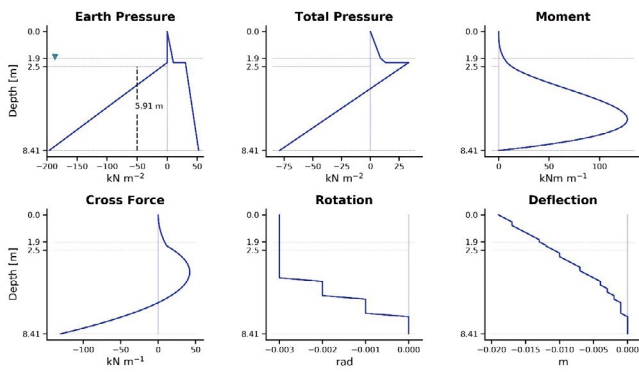


Figura 9.23 Variación en profundidad de la presión lateral, presión total, momento, fuerza, rotación y la desviación de la tablestaca. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

proceso erosivo se traslade a otras zonas de la región. Para evitar esta situación, se construirá un muro de enrocados de 819 metros de longitud, que tendrá como objetivo disipar la energía del oleaje cuando este rompa sobre la estructura. Para determinar las dimensiones del muro de enrocados se utilizó información del oleaje local, la batimetría de la zona, se asumen valores constantes de la altura de la marea y la profundidad de asentamiento.

Las dimensiones del muro de enrocados variarán de 2.2 m hasta 3.4 m de altura, con un ancho de cresta constante de 1.3 m de longitud y un ancho base que variará según la profundidad de fondo, entre 4.6 m hasta 6.85 m de longitud. El volumen de roca basáltica total que se utilizará en la construcción del muro será de 8833 m³.

Adicionalmente a las dos obras de ingeniería mencionadas anteriormente, se diseñó un muro de enrocados denominado celdas experimentales, el cual se instalará en todo el borde costero. Este muro tendrá 1030 m de longitud, y estará compuesto por cinco unidades de rocas basálticas de 800 kg de peso y 0.65 m de diámetro (Figura 9.24). La altura total será de 1.3 m y tendrá un ancho base de 1.95 m de longitud.

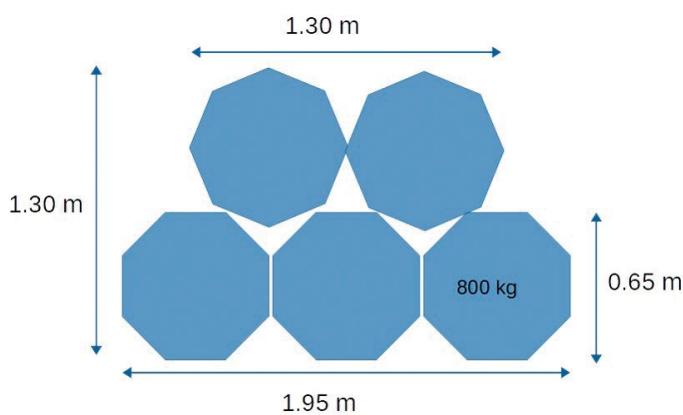


Figura 9.24 Esquema del diseño de la celda experimental. (Fuente: Elaboración propia - Componente Diseño de Obras).

Finalmente, terminado el muro de tablestacado se procederá con un relleno de arena el cual tendrá el objetivo de recuperar terreno y con esto restaurar el antiguo aeropuerto erosionado por el mar. Para este propósito, se estimó un volumen de arena de 32536 m³.

9.5 Conclusiones

Para controlar los procesos de erosión que actualmente se presentan en los seis sitios seleccionados en las costas del departamento de Antioquia, se han propuesto distintas alternativas de obras para combatir este proceso natural.

* Inicialmente, se comenzó diseñando los tradicionales enrocados tales como espigones (espolones) y rompeolas, pero estos diseños han sido descartados porque no son la solución efectiva para combatir los procesos de erosión en zonas costeras que presentan acantilados, siendo reemplazados por otro tipo de enrocados como son los muros de protección. Esta clase de obras se ha empezado a implementarse con resultados muy eficientes para detener el retroceso local de la línea de costa. Replicando esta idea constructiva, se diseñaron los muros para las zonas de río Hobo y Damaquiel.

* En la zona de punta *Las Vacas*, se diseñó un muro de tablestacado que en su fase temprana de diseño resultó muy compleja, debido principalmente a que este requiere obligadamente conocer el tipo de suelos, parámetro requerido para estimar la longitud y el tipo de tablestaca por utilizar. Si se diseña un tablestacado sin conocer el tipo de suelos, los resultados obtenidos pueden presentar variaciones muy amplias en la longitud del tablestacado que puede conllevar a un incremento en los costos de construcción en varios miles de millones de pesos. Otro punto importante a mencionar es que los estudios de suelos también indican si es factible la construcción de una obra de tablestacado. Por estas razones, el desconocimiento del tipo de suelo en la zona de punta *Las Vacas* hace que se presenten demasiadas incertidumbres en las dimensiones y cantidad de materiales en los diseños presentados.

* Todos los cálculos obtenidos para estimar las dimensiones y las cantidades de material requeridos en cada una de las obras propuestas, son más bien aproximaciones asociadas con cierto grado de error, el cual dependerá en su mayor parte de la calidad y de la disponibilidad de información ambiental en cada una de las zonas de estudio. Debido a esta falta de información, principalmente de campo, se optó por suposiciones y algunas veces considerar valores medios, afectando la determinación de las cantidades de materiales requeridas en cada obra y por consiguiente en el costo de la misma.

9.6 Referencias

Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*, Vol 7, No. 1, 53-84.

French, P. (2001). *Coastal Defences Processes, problems and solutions*, Ed. Taylor & Francis.

Suaréz, J. (2002). *Control de erosión en zonas tropicales*. Editorial Universidad Industrial de Santander.

Tecnisuelos. 2016. *Estudio de suelos en agua*, para la

determinar las características mecánicas y físicas del estrato del lecho marino donde se proyecta la dársena de maniobras y el canal de acceso al puerto de Pisisi S.A. Municipio de Turbo, Departamento de Antioquia. 398 pp.

UNFCCC. (1999). Coastal adaptation technologies. Technical paper. United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/TP/1999/1.

A large yellow buoy is the central focus, resting on a sandy beach. It is connected to a rope. In the background, several other buoys are visible, some of which are purple. The sky is overcast and the water is calm.

Capítulo 10°

EROSIÓN
COSTERA

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados

Capítulo 10°

Anexos

10.1 Subcomponente Diseño y Construcción de Dispositivos de Medición Oceanográfica

Autor

Lennin Flórez-Leiva (MSc en Oceanografía)

10.1.1 Introducción

La palabra “erosión” viene de erodere, verbo latino que significa “roer” que en términos generales es un proceso natural y resultado de varias fases: desprendimiento de partículas, transporte de sólidos y sedimentación (Manning, 1981). La región de Urabá es un área afectada por la erosión costera a lo largo de la parte oriental del golfo de Urabá (Fig 10.1) y por más de 30 años cuando se iniciaron las primeras aproximaciones al problema (Bird, 1985; Aristizábal et al., 1990; Correa, y Vernet 2004). Algunos estudios sugieren que algunos sitios presentan altas tasas de erosión y otros retrocesos de la línea de costa (Tabla 10.1). Sin embargo, para determinar con precisión se requieren correcciones geométricas basadas en imágenes con una secuencia de tiempo continua en 145 km de línea de costa (Bustamante et al., 2019).

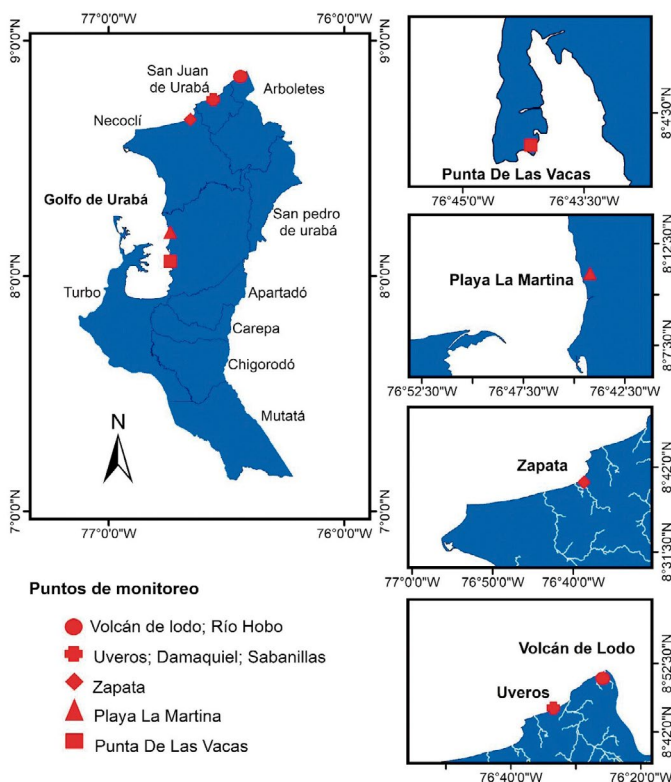


Figura 10.1 Área de estudio de muestreo para evaluar el proceso erosivo, región de Urabá. Nótese que los sitios muestreados representan el borde oriental del golfo de Urabá, Antioquia. (Fuente: Elaboración propia - Subcomponente Diseño y Construcción de Dispositivos de Medición Oceanográfica).

El proyecto investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia buscó entender la complejidad del proceso erosivo, desde las respuestas oceanográficas asociadas a las márgenes costeras litorales, la naturaleza geológica de los sectores estudiados y la implementación de alternativas para mitigar el proceso. Una de las metas del proyecto fue el uso de sensores marinos para comprender desde la oceanografía, el oleaje y sus posibles consecuencias en la erosión costera de la región de Urabá. Además, de las variaciones en la temperatura superficial del mar. Para esto, se desarrollaron instrumentos como boyas oceanográficas y sensores de presión para evaluar la altura significativa de las olas (Tabla 10.1).

Lugar	Tasas (m/año)		Criterio	Observaciones*
	Actuales	antes		
	2004**			
Volcán de lodo	-1.9	-5	Alta	Entre 2014 y 2018
Río Hobo	-5,5	-4,6	Intermedia	Entre 2014 y 2018
Uveros	+1.3	-1.2	baja	Entre 2007 y 2018
Damaquiel SW	-1,8	-1.2	baja	Entre 2007 y 2018
Damaquiel NE	+1,1	-	baja	Entre 2007 y 2018
Zapata	-4,5	-5	Alta	Entre 2147 y 2018
Punta las Vacas	-	-4	Intermedia	No se tienen fotografías del 2018 para comparación con años anteriores

** Tasas de erosión calculadas para la zona de Urabá antes del 2004 por Correa y Vernet, 2004. Criterio: Alta erosión >5; intermedia 4 y baja <4. * Son observaciones para las tasas de erosión actuales.

Tabla 10.1 Tasas de acreción o erosión medidas en el proyecto de erosión costera, comparando fotografías de diferentes años con las tomadas en el 2018 en el marco del proyecto de erosión costera (Fuente: Bustamante y Ortega 2019).

10.1.2 Diseño de instrumentos

Esta parte del Proyecto buscó por medio del diseño y construcción de instrumentos oceanográficos, dos objetivos principales: el primero, usar instrumentos que permitieran evaluar características oceanográficas como oleaje, de tal forma que sirviera como referente del impacto en las costas de la región y segundo, validar los modelos numéricos que fueron usados para predecir y tomar mejores decisiones del proceso erosivo costero en los sitios de estudio. Uno de los instrumentos usados durante el proyecto fueron las boyas oceanográficas (Figura 10.2).

Las boyas oceanográficas son objetos flotantes con unos sistemas electrónicos que permiten el estudio de los océanos, la predicción del tiempo atmosférico o el marcaje de zonas para búsquedas y rescates. Además, se utilizan en la prevención de consecuencias negativas para zonas con alta frecuencia de embarcaciones y/o uso turismo náutico/recreativo.

Los diseños de boyas se caracterizaron porque fueron de poco tamaño, para uso de mediciones como temperatura superficial del mar, con una alta cobertura espacial y temporal, de bajo costo y generaron datos en tiempo real,

lo que permitió mejorar y corregir modelos oceanográficos. Por otro lado, los instrumentos de presión hidrostática permitieron conocer las mareas y ondas (olas) en el área de estudio, ya que detallaron junto con los otros equipos de medición el efecto erosivo sobre las costas de las áreas estudiadas (Figura 10.3). Estos registradores de ondas y mareas tomaron medidas de presión sobre períodos de tiempo más largos, proporcionando lecturas exactas del nivel de la marea en áreas con alto grado erosivo.



Figura 10.2 Aspecto interno, externo y modificaciones electrónicas y físicas en la boya oceanográfica (Fuente: Fotografías Fabio Chaverra).

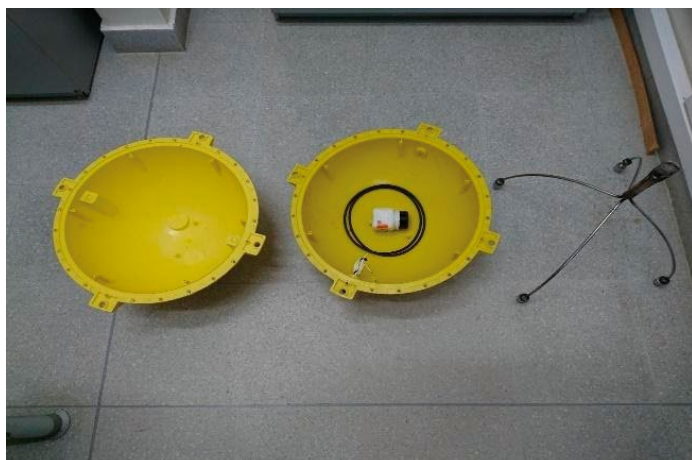
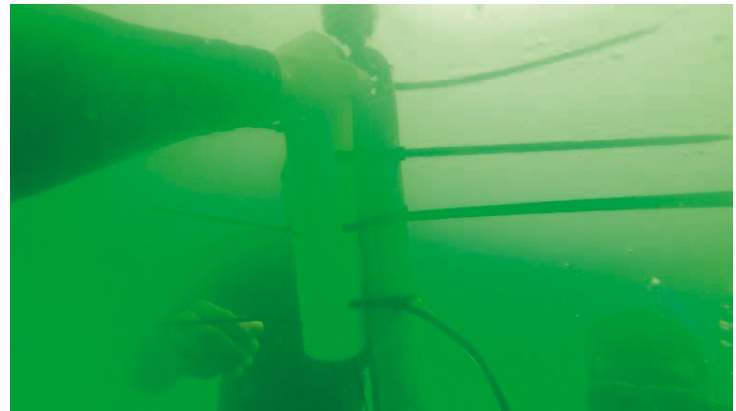


Figura 10.3 Sensor de presión en la columna de agua. A) Instrumento instalado en el agua a 7 m de profundidad, B) Vista general del instrumento bajo configuración (Fuente: Fotografías Fabio Chaverra).

10.1.3 Resultados

Los equipos con sus respectivos sensores registraron las características oceanográficas de cada lugar. Usando el sensor de presión, los resultados obtenidos mostraron que las alturas de olas significantes en los sitios muestreados oscilaron entre 0,1 y 0,35 m con un período medio entre dos y ocho segundos (Figura 3.4A). Además, variaciones registradas con una configuración de 1hz hasta completar 1024 datos cada 60 minutos y obteniendo alturas máximas hasta de 1.1 m.

Mientras que los sensores de temperatura ubicados en la columna (0 a 7 m de profundidad) de agua mostraron valores mínimos de 27,6 °C y máximas de 28,4 °C y variaciones entre los termistores 1(-1m) y 5 (-6m) de 0,5 °C durante el estudio, permitiendo registrar las diferencias de temperatura entre horas del día y la noche (Figura 10.4B). Finalmente, estos valores de altura de olas y de temperatura pueden variar entre épocas climáticas por los patrones de vientos (seca) o lluvias y escorrentías de ríos aledaños (húmeda) (Figura 10.4A).

En conclusión, el grupo de trabajo cumplió con el objetivo del proyecto de diseñar y de construir instrumentos oceanográficos para evaluar el proceso erosivo durante el

periodo del estudio. Se demostró también la capacidad de evaluar la dinámica erosiva a lo largo del área de la costa antioqueña. De igual forma, el trabajo interdisciplinario ayudó a entender desde un contexto holístico y necesario en este tipo de proyectos, la necesidad de acoplar varios componentes para una mejora en la toma de decisiones locales y nacionales.

10.1.4 Referencias

Aristizábal, O., Betancur J. y Vásquez C. (1990). Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necoclí, Golfo de Urabá. Proyecto de Grado de Geología, Universidad EAFIT. 356 p.

Bird, E.C.F. (1985). *Coastline Changes: A Global Review*. John Wiley & Sons, New York, 219p.

Bustamante A., Ortega L. (2018). Retrocesos de línea de costa medidos a partir de comparación de fotografías de años 2007, 2014 y 2018, para el litoral de cinco seis sitios de estudio. Componente Geología, geomorfología y Suelos. Proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia.

Correa I.D., Prüssmann J, Garrido A.E. (2010). Geomorfología del contorno litoral Urabá-Darién departamentos de Antioquia y Chocó Caribe Colombiano. En: Juan F. Blanco, Mario H. Londoño-Mesa, Lizette Quan-Young, Ligia Urrego-Giraldo, Jaime H. Polanía, Andrés Osorio, Gladys Bernal, Iván D. Correa. Editores. Proyecto Expedición Estuarina, golfo de Urabá, fase 1. Informe final. Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Universidad EAFIT. Medellín, Antioquia, Colombia. p 34

Correa, I.D. y Vernet G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes – Turbo) Costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, Invemar 33: 5-26.

Mannering JV. (1981). The use of soil loss tolerance as a strategy for soil conservation. in: isco 2, morgan (ed.), wiley; p. 337-350.

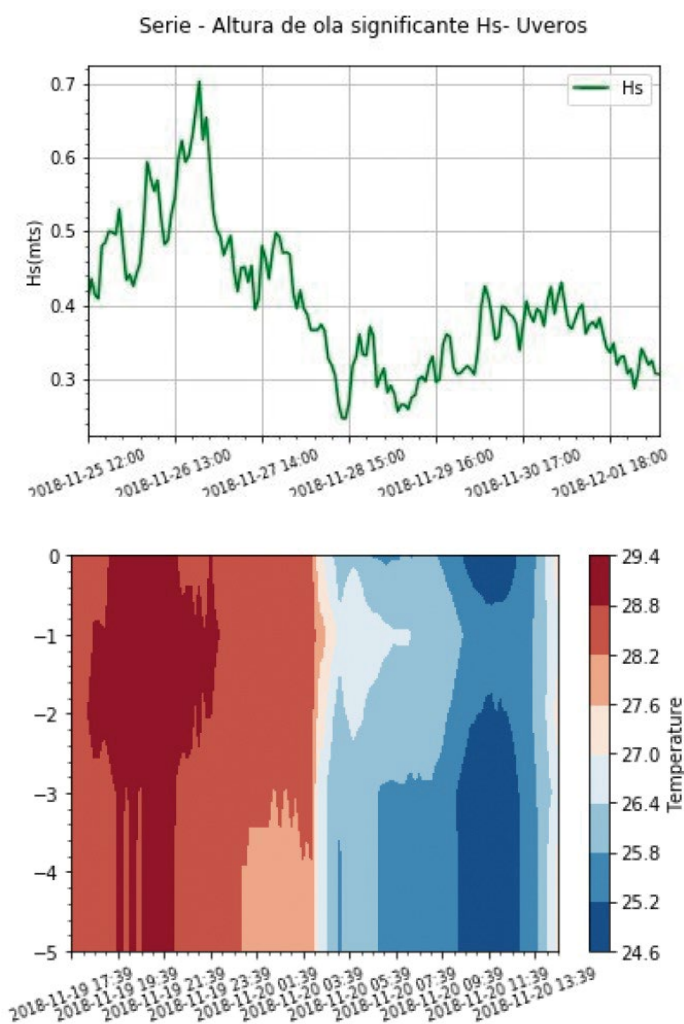


Figura 10.4 A) Valores registrados de altura de la ola y B) Temperatura en sitios de la región de Urabá. (Fuente: Elaboración propia - Subcomponente Diseño y Construcción de Dispositivos de Medición Oceanográfica).

FE DE ERRATAS

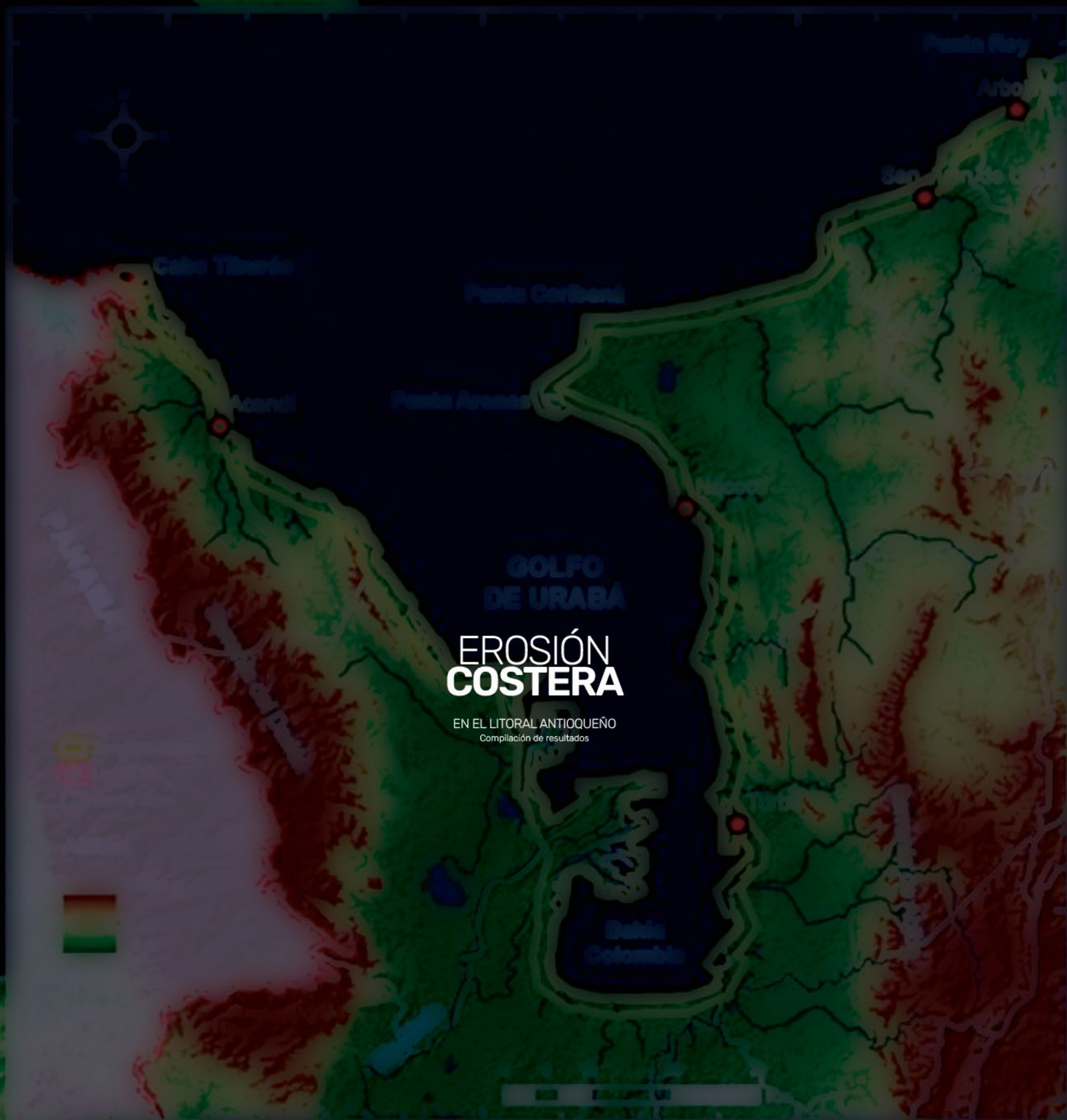
Se hace constar que en el libro “Erosión Costera en el Litoral Antioqueño. Compilación de resultados”, versión digital y versión impresa publicado en enero de 2022, se han advertido los siguientes errores:

1. Página 9. En los créditos a los Editores Literarios, aparece Mauricio Andrés Correa Ochoa con título de “PhD en Ingeniería”, debería ser “MSc en Ingeniería”.

2. Página 45. En el ítem 1.1.1 Contexto físico general de la región del Urabá-Darién (Costas antioqueña y chocoana) se menciona “el limite tierra mar actual de la costa antioqueña con el mar Caribe tiene una longitud aproximada de 512 km, definidos entre Arboletes (límites entre Antioquia y Córdoba) y el cabo Tiburón, punto fronterizo con Panamá sobre el costado oeste del golfo de Urabá”, debería ser “el limite tierra mar actual de la costa antioqueña con el mar Caribe tiene una longitud aproximada de 512 km, definidos entre Arboletes (límites entre Antioquia y Córdoba) y boca Tarena en el distrito de Turbo (límites entre Antioquia y Chocó)”.

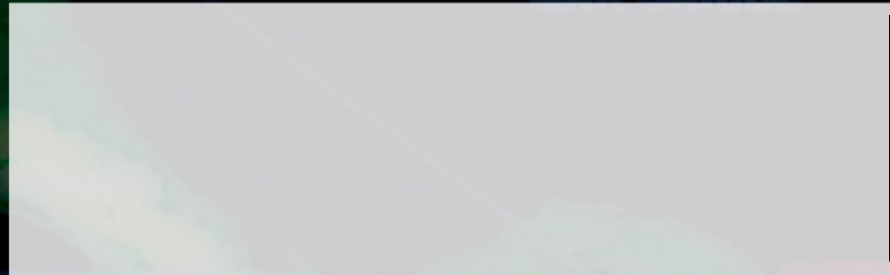
3. Página 124. Se deberían incluir a “Ligia Estela Urrego Giraldo (PhD en Biología); Juan David Osorio Cano (PhD en Ciencias Marinas); Maximiliano Arredondo Ramírez (MSc en Ingeniería); Carlos Alejandro Henao Vargas (Ing. Civil); María Alejandra Piedrahita Ospina (Ing. Civil)” como autores del Subcomponente Mediciones en Laboratorio.

4. Página 147. Se deberían incluir a “Rubén Darío Montoya Ramírez (PhD en Recursos Hidráulicos); Víctor José Saavedra Mejía (MSc en Recursos Hidráulicos),” como autores del Subcomponente Modelación Oleaje.



EROSIÓN COSTERA

EN EL LITORAL ANTIOQUEÑO
Compilación de resultados



ISBN 978-628-7519-42-8



9 786287 519428