

Medellín, 20 de marzo de 2021

Doctor

**Jaime Enrique Gómez Zapata**

Director del DAGRAN

Gobernación de Antioquia

La Ciudad

**Asunto:** Concepto técnico evolución línea de costa. Sector volcán de Lodo, municipio de Arboletes

Atendiendo a su solicitud, a continuación se presenta un concepto técnico de la evolución de la línea de costa ubicada enfrente del volcán de Lodo. En este concepto técnico se presentan análisis de mediciones realizadas *in situ*, así como análisis de línea de costa a partir de imágenes satelitales y de modelación numérica para tres escenarios.

Es necesario recordar que la erosión costera es un proceso natural que influye en la evolución de la zona costera a través del tiempo. A lo largo de la playa, la erosión remueve sedimentos del sistema por acción de las corrientes y oleajes (Casella *et al.*, 2016). Bird (1987) evidenció que el 70% de las playas del mundo están afectadas por problemas de erosión y que este es un problema grave cuando ocurre en áreas densamente pobladas. En este sentido, la densidad poblacional dentro de los 100 km de la costa es casi tres veces mayor que al interior del continente (Small & Nicholls, 2003) y alrededor del 10% de la población humana vive entre los 0 y 10 m sobre el nivel del mar (McGranahan *et al.*, 2007).

La comunidad científica marina ha mostrado la complejidad de las causas que generan erosión en las costas del mundo y hace énfasis en la interrelación entre los procesos naturales y las influencias antropogénicas (Pranzini & Williams, 2013). En términos generales, los procesos de erosión costera se producen por factores que incluyen, entre otros, eventos de olas extremas, así como la alteración en el suministro de sedimentos (Rangel-Buitrago *et al.* 2015). Sin embargo, las condiciones de cada sector costero tienen características muy diferentes; por lo general marcadas por factores climáticos y hasta



culturales, lo cual muestra la necesidad que en cada lugar se realicen monitoreos y estudios específicos.

Algunas de las causas de los procesos erosivos del municipio de Arboletes son atribuidos a la pérdida de la espiga del sector de Punta Rey, lo que afectado de manera considerable las condiciones presentes, ya que su ausencia permite que las olas lleguen directamente a la costa (Correa y Paniagua, 2016). Orejuela (2020), estudio los efectos que tendría sobre la zona la recuperación de esta punta, mostrando la reducción de energía de las olas en varios lugares de la línea de costa de Arboletes. En este lugar se han registrado retrocesos de hasta 1.6 km de línea de costa (Correa & Vernet, 2004). La orientación general de la línea de costa al sur de Arboletes hace que el oleaje proveniente del norte (el más frecuente y energético) incida casi perpendicularmente a la costa y las corrientes de deriva que se generan podrían transportar grandes cantidades de sedimento (Restrepo et al, 2005).

Respecto al volcán de Lodo en Arboletes, ubicado a 15 m por encima de la terraza marina, Orozco (2009) sugiere que la acción de las olas ha erosionado la base de la terraza. Según García & Sierra (2007), en este lugar se han presentado retroceso de línea de costa de hasta 50 m en los últimos veinte años. De acuerdo con Correa et al. (2007), la intervención antrópica sobre este sector ha sido alta, en donde se construyeron hasta antes del 2018 espolones y muros de contención sin ningún concepto técnico para tratar de proteger el volcán de los efectos de la erosión y de recuperar playas para el turismo. De acuerdo con esos autores la eficacia y efectos colaterales de la construcción de dichas obras de defensa a la fecha ha sido nula (no retuvieron arenas) y/o generaron o aumentaron en muchos sitios aledaños los déficits de sedimentos de playa.

### **Análisis de mediciones *in situ***

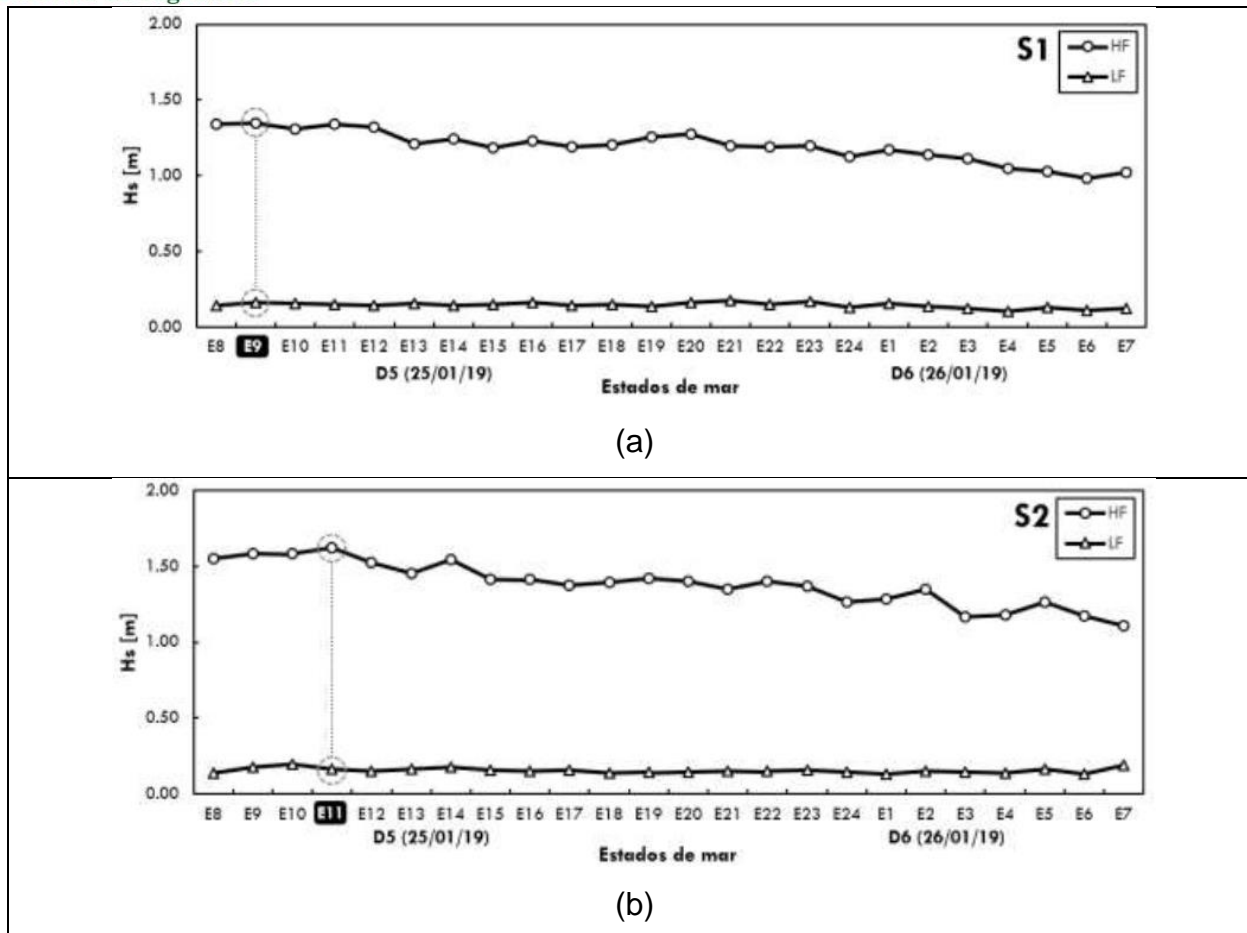
Teniendo en cuenta que en la zona se presentan regímenes campos de viento del sur para el periodo de invierno y por los vientos alisios del norte y noreste durante el verano



(Molina *et al*, 1992), es necesario monitorear variables como el oleaje y conocer su comportamiento en términos de la altura de ola, periodo y dirección.

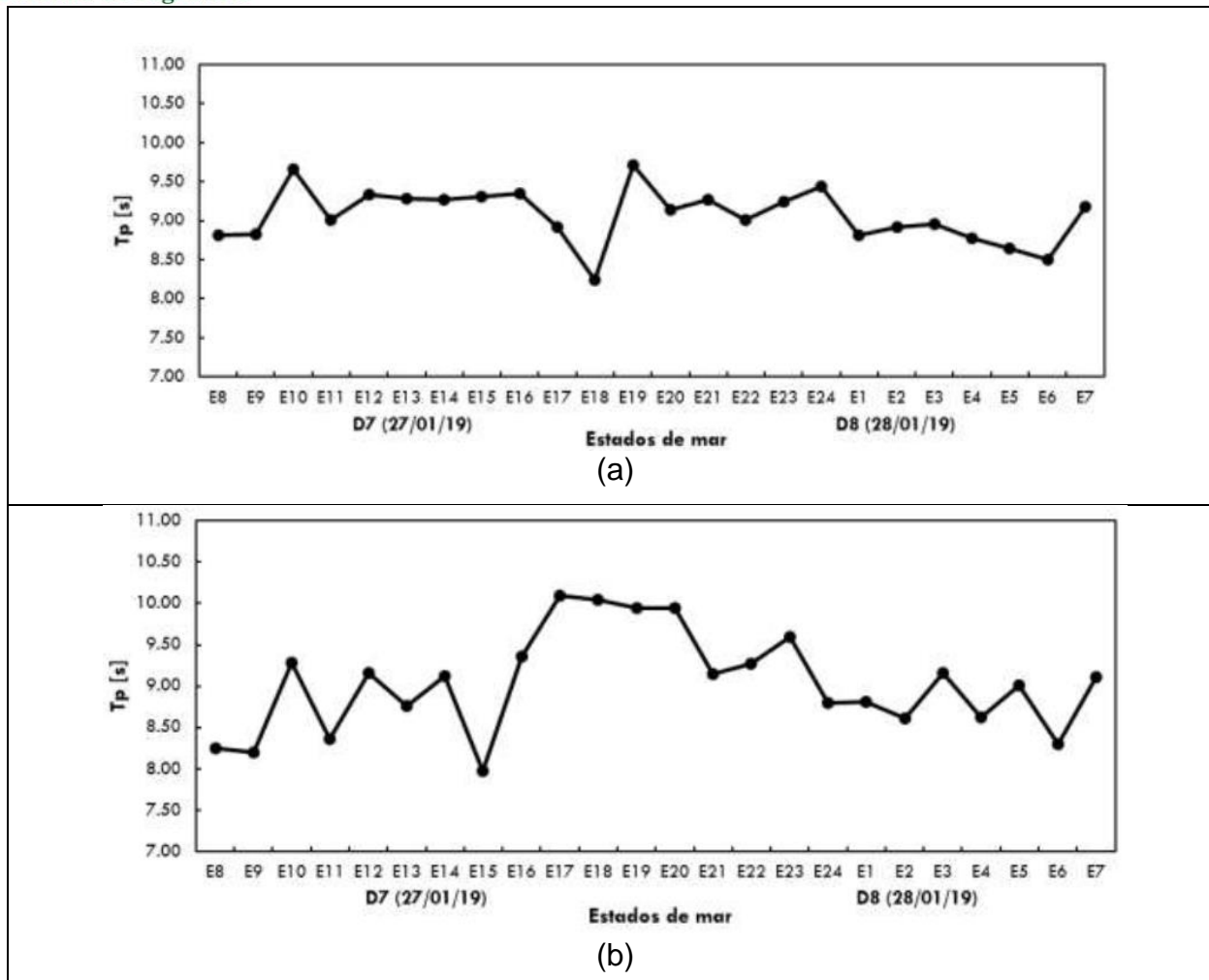
Además, es importante tener en cuenta que en esta parte del Caribe se cuenta con un régimen de mareas del tipo semidiurno mixto, presentándose dos valores altos y dos bajos con diferentes amplitudes. De igual manera es necesario estudiar el comportamiento de las corrientes y sus posibles implicaciones en los procesos erosivos de la zona costera.

En el proyecto “*Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*” (UdeA, 2018) se realizaron mediciones hidrodinámicas en dos sitios cercanos al volcán de Lodos. Las mediciones se realizaron entre el 25 y el 28 de enero de 2019, época de oleaje energéticos. Se obtuvieron valores de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) (Figura 1), al igual que el periodo pico ( $T_p$ ) (Figura 2).



**Figura 1.** Altura significativa ( $H_s$ ) total: gravitatoria (HF) e infragravitatoria (LF) para las series de oleaje extraídas de los datos tomados dos sitios cercanos al volcán de Lodo. En círculos grises punteados se resalta el estado de mar más energético de la serie. Fuente: Componente de oleaje. Proyecto de investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, 2019.

Los resultados de las mediciones del año 2019, muestran valores máximos de  $H_s$  alrededor de 1.5m, con tendencia a disminuir durante el periodo de mediciones, llegando a valores cercanos a 1m. Sin embargo, se muestra en promedio un oleaje con valores similares, que por estar tan cerca de la línea de costa, resultan ser muy energéticos.



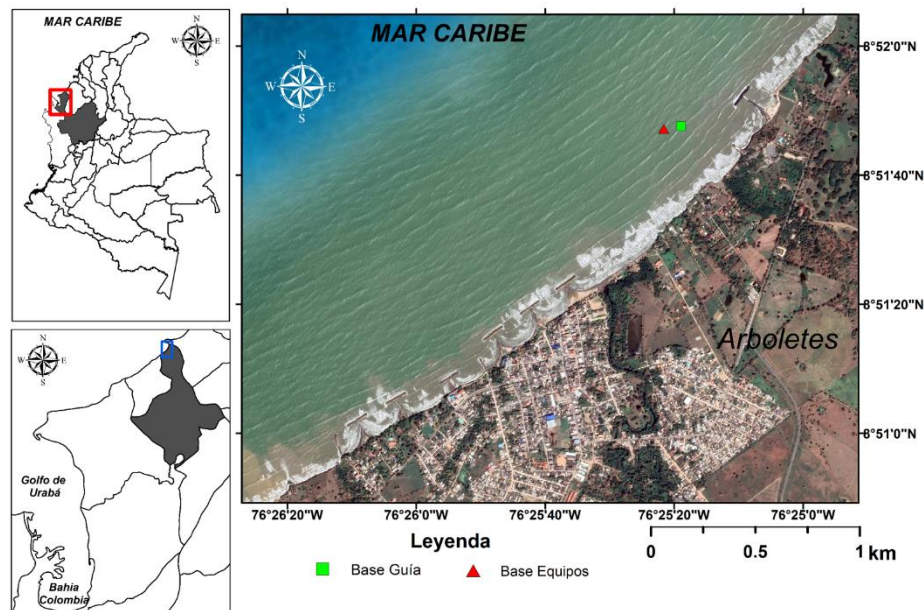
**Figura 2.** Periodo pico ( $T_p$ ) para las series de oleaje extraídas de los datos tomados dos sitios cercanos al volcán de Lodo. Fuente: Componente de oleaje. Proyecto de investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia, 2019.

Los resultados de la figura 2, muestran periodos asociados al pico espectral entre 8 y 10 s, con valores promedio de 9 s. Esto sugiere nuevamente la presencia de oleaje energético para esta zona, asociada a alturas de ola entre 1 y 1.5 m. Este oleaje en general se puede considerar como tipo *wind sea*.

Recientemente se realizó una nueva campaña de medición cercano al volcán de Lodos (Figura 3). Los equipos se instalaron entre el 19 de diciembre de 2020 y 21 de enero de



2021. Se obtuvieron series temporal de altura de ola significativa, periodo asociado al pico espectral y nivel de marea (Figura 4).

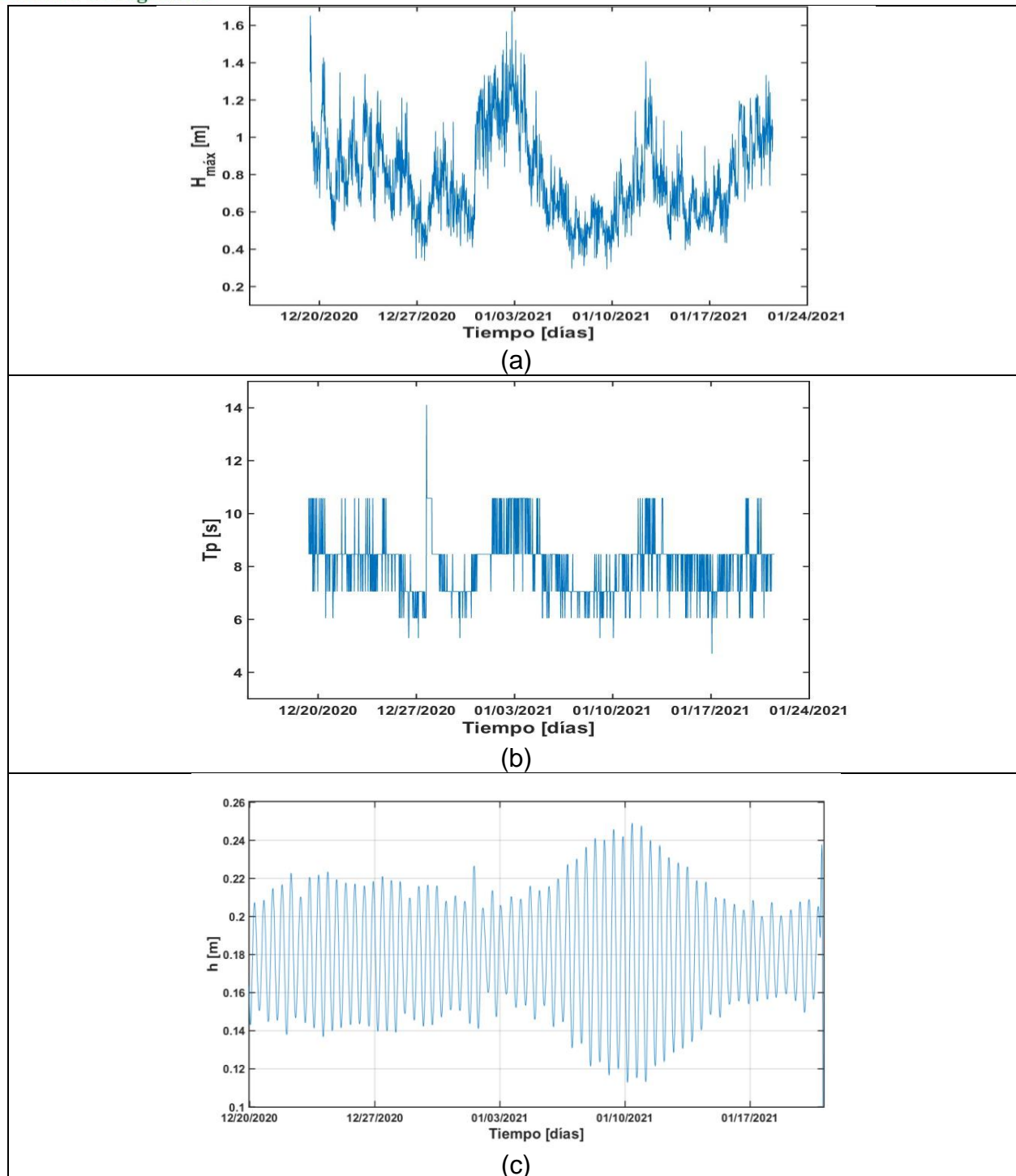


**Figura 3.** Ubicación del sitio de monitoreo. En recuadro verde se observa un punto utilizado como base guía para la instalación del equipo en el triángulo rojo.

Las mediciones del oleaje muestran valores entre 0.4 m y 1.6 m, con valores promedio de 1.0m. Al inicio de año se observan alrededor de 7 días con valores superiores a 2m. El periodo asociado al pico espectral muestra valores entre 6 s y 11 s, con valores promedio de 9 s. La combinación de estos valores nuevamente caracteriza al oleaje como tipo wind sea. Es necesario tener en cuenta que nuevamente por la ubicación cercana a la línea de costa, estos valores sugieren la presencia de valores energéticos del oleaje.

Respecto a los valores de onda de marea, se observan variaciones entre 0.1 m y 0.3 m con la ocurrencia de una época de cuadratura hacia finales de diciembre y luego una de sicigia a inicio de enero. La ocurrencia de estas épocas podría estar asociada a otros fenómenos relacionados con el flujo de lodos dentro del volcán, que son estudiados en este momento.





**Figura 4.** Serie temporal de variables medidas en la campaña diciembre 2020 a enero 2021: (a) Altura significativa del oleaje ( $H_s$ ); (b) periodo asociado al pico espectral; (c) onda de marea.

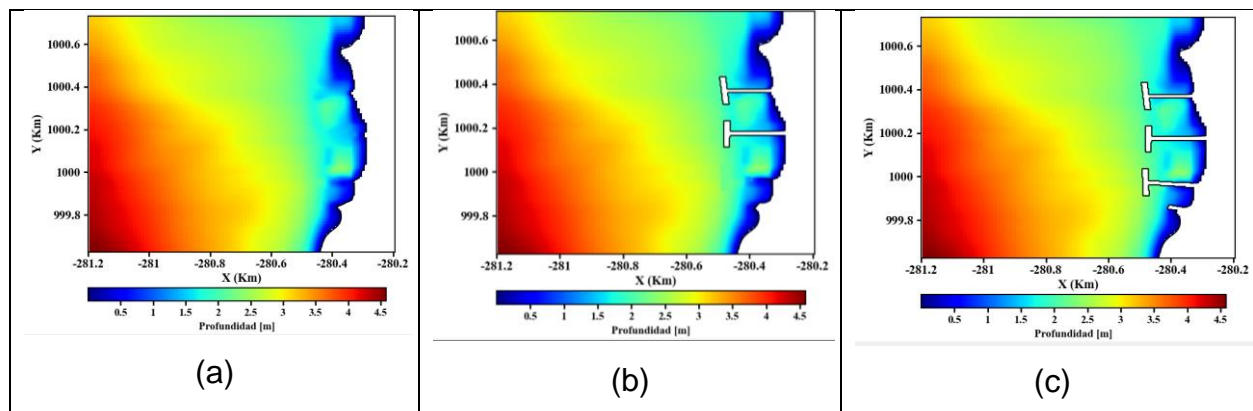
### **Análisis de resultados de modelos numéricos del oleaje**

Se implementó el modelo numérico XBeach con el fin de analizar la hidrodinámica relacionada con el oleaje, la marea, así como la determinación del transporte de sedimentos y el cambio morfológico en la línea de costa. Los datos que se utilizaron para la implementación fueron medidos en el marco del convenio vigente entre el DAGRAN y la Universidad de Antioquia.

XBeach es un modelo numérico de código abierto que desarrollado para simular procesos e impactos hidrodinámicos y morfodinámicos en costas arenosas con un tamaño de dominio de kilómetros y en la escala temporal de tormentas. El modelo resuelve las ecuaciones de propagación de onda corta, de aguas someras no estacionarias y de transporte de sedimentos.

Los datos batimétricos utilizados para la simulación corresponde a: la carta náutica 411 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH); datos medidos en el proyecto *“Programa de monitoreo costero en las playas urbanas intervenidas con obras de protección costera y en el volcán de lodo en el municipio de Arboletes, Antioquia”* (Caicedo et al., 2016). Con esta información se realizó una interpolación triangular, y luego fue depurada para quitar puntos que no permitieran tener una superficie continua. Los datos de línea de costa, fueron obtenidos de imágenes satelitales de alta resolución (orden de metros) para la zona de estudio. Se analizaron tres escenarios para la modelación: 1) sin las obras (tómbolos) actuales; 2) con las obras actuales; 3) con las obras complementarias (Figura 5). Se utilizaron mallas rectangulares con una resolución espacial de 8 metros en longitud y 14 metros en latitud.





**Figura 5:** Batimetría interpolada en el sector del volcán de Lodo para tres escenarios: (a) sin obras; (b) con las obras actuales; (c) con obras complementarias.

Se utilizaron mallas rectangulares con una resolución espacial de 8 metros en longitud y 14 metros en latitud (Figura 6).

Los forzadores hidrodinámicos relacionados con los parámetros de oleaje, altura de ola significativa ( $H_s$ ), Periodo pico ( $T_p$ ) y Dirección del oleaje (Grados), así como la información de sedimentos, fueron suministrados por la componente de modelación del oleaje del proyecto “*Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia*”. Los datos hidrodinámicos corresponden a salidas del modelo implementado para todo el mar Caribe y fueron calibrados con los datos medidos en 2019 mostrados anteriormente. Los parámetros de sedimentos  $D_{50}$  y  $D_{90}$  corresponden a muestras tomadas a una profundidad de 1.5 m y 7m en la zona de estudio.

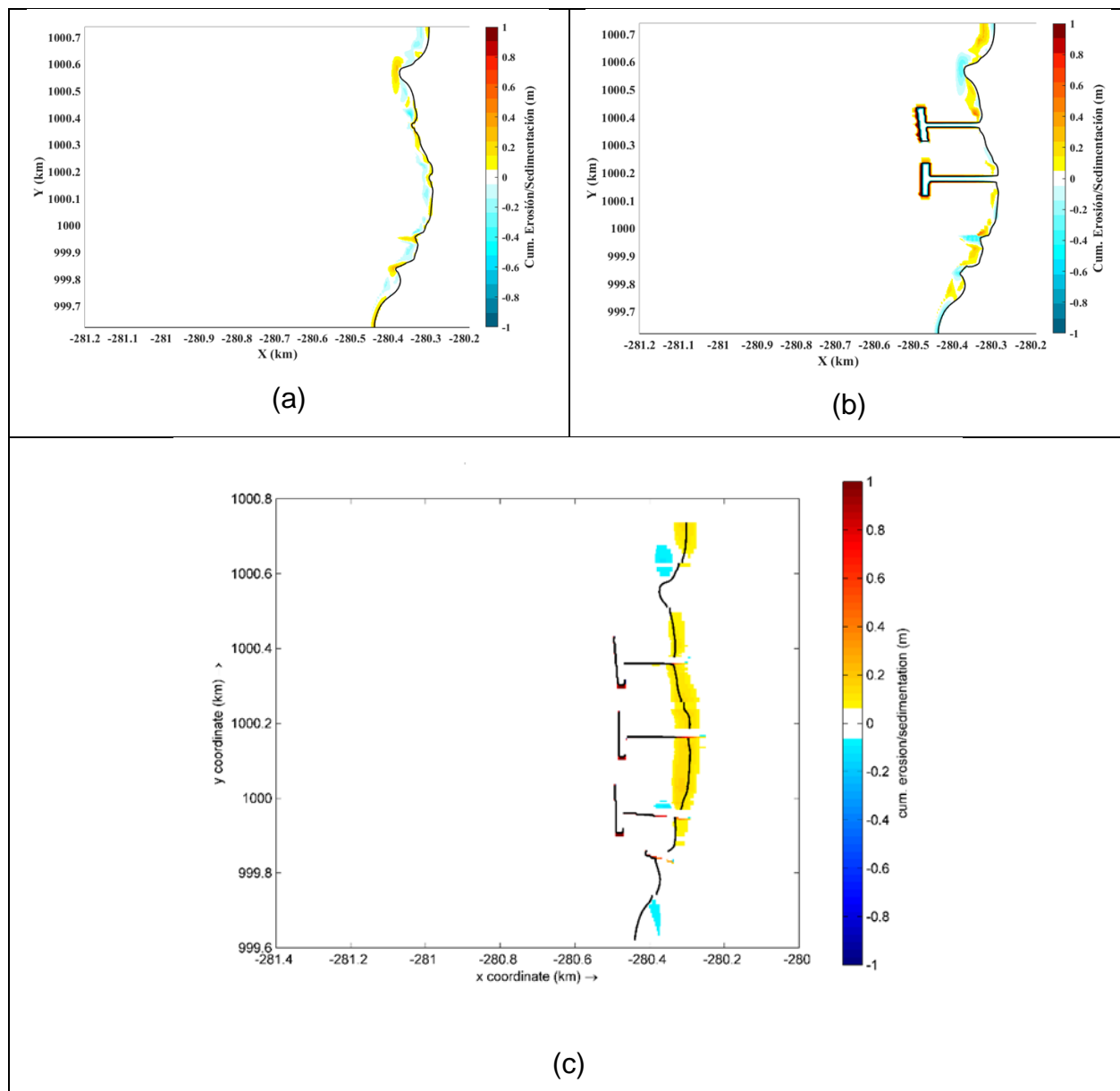
Se realizó un proceso de calibración del modelo en el área para establecer los parámetros que representen mejor la hidrodinámica del área de estudio. Los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron: el parámetro rugosidad de fondo Chezy, parámetro de morfoc, el parámetro dryslp y el parámetro facrun+. Los detalles de este proceso pueden ser consultados en el informe presentando por la Universidad de Antioquia en el marco del

proyecto PIMECLA. La Tabla 1, muestra los parámetros calibrados para el modelo Xbeach.

**Tabla 1.** Parámetros calibrados en el modelo Xbeach para la zona de Volcán de Lodos.

| Parámetros               | Valores         |
|--------------------------|-----------------|
| Sedimentos               | Arenas          |
| D50                      | 0.0002          |
| D90                      | 0.0003          |
| Morfac                   | 2               |
| Tiempo de modelación     | 1 día           |
| Coeficiente de Chezy     | $u=30$ ; $v=30$ |
| Densidad específica      | 2650            |
| Nivel de marea           | 0               |
| facrun+                  | 2               |
| Coeficiente de rugosidad | 55              |
| dryslp                   | 1.5             |

En la figura 6 se presentan los gráficos de acumulación de sedimentos para los tres escenarios mencionados, con valores negativo asociados a erosión (colores azules) y valores positivos (colores rojos) a acreción con valores unitarios entre -1 y 1 m. Para el primer escenario (Figura 6a) en el cual no se hubieran construido las obras actuales, los resultados sugieren que en general a lo largo del tramo estudiado se presentan zonas de erosión debido a la incidencia de oleaje energético. Estas zonas están intercaladas con las algunas de acreción, que existen debido probablemente a la presencia de obras costeras deterioradas que existen aún en el lugar. Al norte del terreno del volcán se presenta la mayor zona de erosión seguida por una de acreción, debido a la presencia del espolón ubicado en ese lugar.



**Figura 6.** Acumulación de sedimentos: (a) sin la presencia de obras de protección costera; (b) con las obras actuales; (c) con las obras complementarias.

En la figura 6b se observan el comportamiento erosión/acreción para las condiciones actuales. Los resultados sugieren que debido a la presencia de los tómbolos aumentó la tasa de acumulación de sedimentos principalmente alrededor de las obras ya que el oleaje no incide directamente sobre la línea de costa. Sin embargo, es de notar como en

las cercanías de la obra se presentan zonas de acreción. Solo un par de sitios al norte y al sur muestran erosión. Al norte debido a la presencia del espolón antes mencionado y al sur debido a alguna obra deteriorada y que posiblemente está sumergida. Esto indica sin embargo que es necesario seguir monitoreando esta línea de costa.

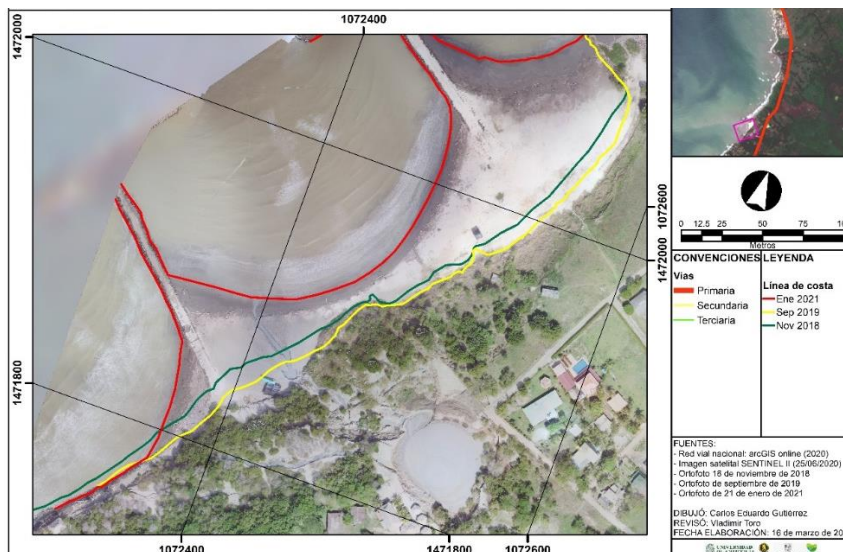
Finalmente, en la figura 6c se observa el escenario para las obras complementarias a las actuales. Los resultados sugieren acumulación de sedimentos al interior de los tómbolos y por fuera de ellos en las zonas cercanas. Al norte y sur se presentan los mismos sitios de erosión del escenario con las obras actuales, que sugieren un monitoreo continuo de la línea de costa. Estos resultados sugieren que la construcción de las obras complementarias podría mejorar las condiciones de la línea de costa, así como la consolidación de procesos como los del talud del volcán de Lodo.

#### **Análisis de la evolución de la línea de costa**

Con el fin de tener más elementos de juicio respecto a las condiciones históricas y actuales de la zona de volcán de Lodo, se realizó un análisis de la línea de costa. Se utilizaron ortofotos obtenidas de vuelos de Dron realizados en el marco de los proyectos realizados por la Universidad de Antioquia para la Gobernación de Antioquia (noviembre 2018, septiembre 2019 y enero 2021) y complementada con imágenes satelitales de Sentinel I (octubre 2020) de la base de datos ArcGIS (2020).

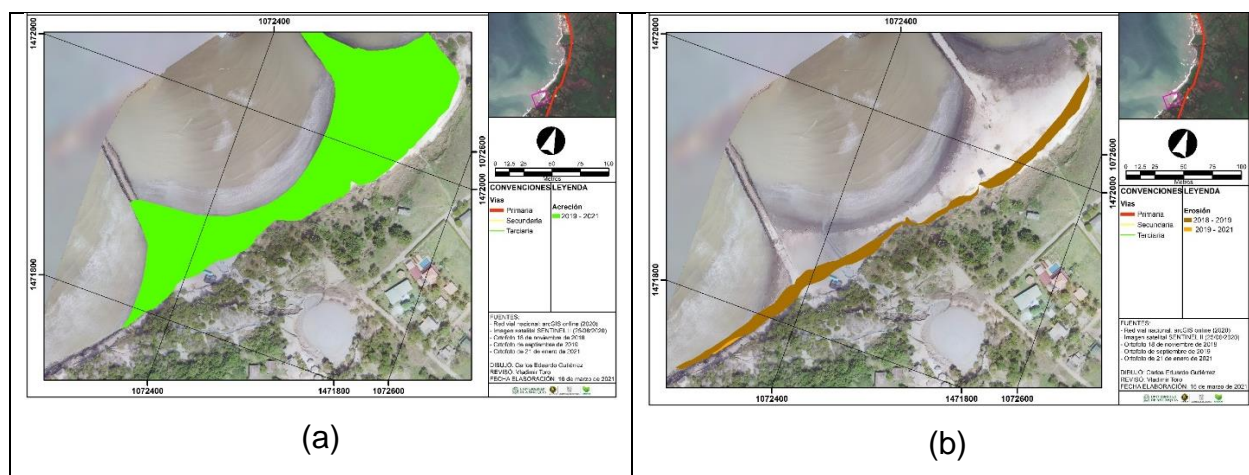
En la Figura 7 se observa la comparación de las líneas de costa para las ortofotos obtenidas (noviembre 2018, septiembre 2019 y enero 2021). Los resultados sugieren procesos intensos de erosión entre los años 2018 y 2019 con valores de hasta 10 m de retroceso de línea de costa. Y es claro como la línea de costa para el año 2019 estaba afectando de manera directa la parte baja del deslizamiento que sufrió el talud enfrente del volcán de Lodo. Cabe notar que en septiembre de 2019, aun no iniciaban las obras de los tómbolos actuales. Para el año 2021 se observa cómo debido a la construcción de estas obras, se generó una acumulación (en parte la regeneración de playa) que alejó la

línea de costa de la parte baja de todo el talud, es especial el ubicado enfrente de volcán de Lodo.



**Figura 7.** Líneas de costa entre: noviembre de 2018 (color azul); septiembre de 2019 (color amarillo); enero de 2021 (color rojo).

Con el fin de cuantificar los procesos de acreción/erosión para las fechas mencionadas se calcularon las áreas relacionadas con estos procesos. Se compararon las imágenes de 2019 y 2021 (acreción) y de 2018-2019 y 2019-2021 (erosión). En la Figura 8 se observan las áreas calculadas.



**Figura 8.** Zonas de acreción (color verde). Comparación entre septiembre de 2019 y enero de 2021. Zonas de erosión, comparación entre: noviembre de 2018 y septiembre de 2019 (color café); septiembre de 2019 y enero de 2021 (color amarillo).



En la Tabla 2 se resumen los valores calculados para los tres periodos analizados y el tipo de proceso identificado. Entre el año 2018 y 2019 se observa una pérdida de área por erosión de 3231 m<sup>2</sup>, periodo en cual no se habían construido las obras y con tasas aproximadas de 10 m/año. Es claro como para este periodo no se observaron en el área analizada zonas de acreción. Para el periodo 2019-2021 se observan áreas de acreción y erosión, de 19883 m<sup>2</sup> y 49 m<sup>2</sup>, respectivamente. La acreción está asociada con el establecimiento de las obras construidas y que hacia la parte sur-oeste del espolón izquierdo se presenta una pequeña zona de erosión. Es de notar que los resultados tanto en zonas de acreción como erosión coinciden en general con los resultados de la modelación numérica.

**Tabla 2.** Tipo de procesos asociados con las comparaciones realizadas

| TIPO     | PERIODO     | AREA m <sup>2</sup> |
|----------|-------------|---------------------|
| Erosión  | 2018 - 2019 | 3231                |
| Acreción | 2019 - 2021 | 19883               |
| Erosión  | 2019 - 2021 | 49                  |

De acuerdo con todo lo mencionado en el desarrollo de este concepto técnico, los resultados sugieren lo siguiente:

- El oleaje es uno de los principales modeladores de la línea de costa de Arboletes, donde en general en los periodos de fuertes vientos (noviembre a abril), se generan olas energéticas que al incidir sobre la línea de costa donde en los acantilados se tiene sedimento tan débil, generan fuertes procesos de erosión. Por esto, se sugiere mantener un monitoreo permanente de las variables hidrodinámicas (oleaje, corrientes y marea) por medio de la instalación de estaciones de medición.
- Los escenarios estudiados por medio de modelación numérica, sugieren que la no construcción de las obras actuales, hubiera permitido el avance de la erosión costera en una zona como la de volcán de Lodo, donde la parte inferior del talud estaba siendo impactada directamente por oleaje energético. Esto es corroborado

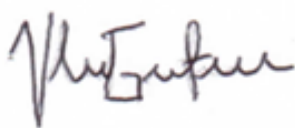



por los análisis de línea de costa donde se observaron para el periodo 2018-2019 retrocesos de línea de costa de hasta 10 m/año. Esto nos lleva a pensar que no construcción de las obras, hubiera permitido que el oleaje terminará por debilitar por completo el talud enfrente del volcán, con consecuencias como la posible desestabilización de la cámara de Lodos. Es de notar que en recientes estudios de la Universidad de Antioquia para el DAGRAN, se logró evidenciar que la cámara está cercana al talud y que el vencimiento del mismo podría haber expuesto la cámara con consecuencias graves para la línea de costa y la geoforma misma del volcán.

- Por último, los resultados sugieren que la construcción de las obras complementarias podría ayudar a consolidar la línea de costa alrededor del lugar analizado. Los resultados del modelo numérico muestran cómo se incrementaría la zona de acreción cerca de las obras. Sin embargo, que es necesario seguir monitoreando las condiciones al norte y sur de las obras debido a la posible aparición de zonas de erosión.

Esperamos este análisis sea de ayuda en gestiones futuras y sean tenidas en cuenta las recomendaciones dadas.

Atentamente,

|   |   |
|---|---|
| <br>Vladimir G. Toro<br>Profesor Facultad de Ingeniería<br>Universidad de Antioquia. | <br>Carlos A. Palacio<br>Profesor Facultad de Ingeniería<br>Universidad de Antioquia. |
|---|---|

Este concepto técnico fue realizado con la ayuda de:

- Profesor Carlos E. Gutiérrez (Universidad de Antioquia)
- Ing. Ferney Orejuela
- Ing. Juan G. Torres.

## REFERENCIAS.

Bird E (1987) The modern prevalence of beach erosion. Mar Pollut Bull 18:151-157

Caicedo, A., Suarez, K., Padilla, S., & Charles, J. (2016). Programa de monitoreo costero en las playas urbanas intervenidas con obras de protección costera y en el volcán de los Hornos del municipio de Arboletes, Antioquia. In Vicerrectoría de Extensión Dirección de Regionalización INFORME (Vol. 1).

Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Stark, C. P., Casella, M., Ferrari, M., & Firpo, M. (2016). Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). Geo-Marine Letters, 36(2), 151-163.

Correa, Ríos, González, Toro, Ojeda, G., & Restrepo, I. (2007). Erosión Litoral Entre Arboletes Y Punta San Bernardo, Costa Caribe Colombiana. Boletín de Geología, 29(2), 115–129.

Correa, & Paniagua. (2016). The Arboletes – Punta Rey Littoral, Southern Caribbean coast. World Geomorphological Landscapes, 4, 55–63. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0>

García, & Sierra. (2007). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. In Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. (Vol. 12).

McGranahan G, Balk D, Anderson B (2007) The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. Environ Urban 19:17–37.

Molina M., A., Molina M., C., & Chevillot, P. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. In Boletín Científico CIOH (Issue 11, pp. 43–58). <https://doi.org/10.26640/22159045.45>

Orejuela, F. (2020). Obra de protección costera utilizando un modelo estudio puerto rey-minuto de dios. Tesis pregrado, Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela ambiental.

Orozco. (2009). Caracterización Físico-Biótica del Litoral Caribe Colombiano. Tomo II. In DIMAR- CIOH. <https://doi.org/10.26640/9879589907610.2009>

Pranzini, E., & Williams, A. (2013). Coastal erosion and protection in Europe. Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/books/9781136469862>

Rangel-Buitrago, N. G., Anfuso, G., & Williams, A. T. (2015). Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean and Coastal Management*, 114, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024>

Restrepo, A., Agudelo, P., Tejada, C., Molares, R., Torres, R., Osorio, A., (2005) Estudio y Evaluación de Alternativas de Solución para la Protección Costera de unos Sectores de la Costa Caribe Colombiana. *Boletín Científico CIOH* No. 23, ISSN 0120-0542,90–102.

Small C, Nicholls RJ (2003) A global analysis of human settlement in coastal zones. *JCoast Res* 19:584–599.

Universidad de Antioquia y Gobernación de Antioquia. (2018). Informe final del proyecto "Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia". Medellín.