

6. DISCUSIÓN

6.1. Estudios anteriores de migración histórica de la línea de costa entre Bahía Colombia y Punta Caribaná

No es posible comparar las magnitudes de retroceso calculadas en este estudio con resultados de estudios anteriores sin tener en cuenta aspectos metodológicos tales como:

- (1) información fuente (e.g. imágenes de sensores remotos, levantamientos con DGPS), teniendo en cuenta el grado de exactitud asociada.
- (2) línea de costa elegida (e.g. línea de vegetación estable, *wet-line*), debido a la diferencia en los procesos involucrados en su migración.
- (3) magnitud de migración calculada (tasas o distancias), e.g. Tasa de Punto Final (*End Point Rate, EPR*), Movimiento Neto de la Línea de Costa (*Net Shoreline Movement, NSM*), Envolvente de Cambio de la Línea de Costa (*Shoreline Change Envelope, SCE*), pendiente de regresión lineal entre varias líneas de costa, entre las más utilizadas (e.g. Himmelstoss, 2009).
- (4) ventana temporal entre las líneas de costa.

Al comparar los resultados del estudio más reciente de la zona en consideración (v.gr. Correa y Vernet, 2004; **Figura 6.1**) se encuentran diferencias para algunos sitios en las tendencias (valor positivo/negativo) y los órdenes de magnitud de los resultados. Cabe apuntar que los autores consideran sus resultados semi-cuantitativos. Entre las diferencias más destacadas están:

- a) -20 m/año anteriores en Punta Las Vacas, en contraste con $+3.49$ m/año calculados en el presente trabajo.
- b) $+40$ m/año anteriores contra $+15.20$ m/año actuales en el delta del río Turbo.
- c) -0.6 m/año anteriores en La Martina, sur de Punta de Piedra, contra $+0.62$ m/año.
- d) -5 m/año anteriores en sectores de acantilados blandos (sectores de predicción), en comparación con tasas promedio de -3.7 m/año en Los Córdoba, -1.63 m/año en Minuto de Dios, -1.29 m/año en Arboletes y -3.02 m/año en El Tié.

Las diferencias mencionadas pueden deberse a varios factores. En primer lugar, las magnitudes del presente trabajo son más exactas, debido a la utilización de información histórica

más exacta (fotografías aéreas ortorrectificadas) y métodos más precisos para el cálculo sistemático de la migración. Se resalta en este sentido la utilización de métodos que vinculan aplicaciones SIG especializadas (DSAS) y software numérico para el cálculo y la visualización geográfica de las magnitudes históricas y las predicciones (*e.g.* Hoyos *et al.*, 2006; Brooks y Spencer, 2012). Por otra parte, los periodos de tiempo considerados por los estudios (años entre las líneas de costa), y por consiguiente los episodios de retroceso litoral, son diferentes. Sin embargo, a pesar de las debilidades en sus magnitudes propuestas, los trabajos anteriores marcaron pautas para enfocar los esfuerzos de investigación posteriores al analizar e identificar las causas de la migración de la de la línea de costa en sectores críticos del litoral de Antioquia como Turbo y Arboletes (*e.g.* Aristizábal *et al.*, 1990; Correa *et al.*, 2007).

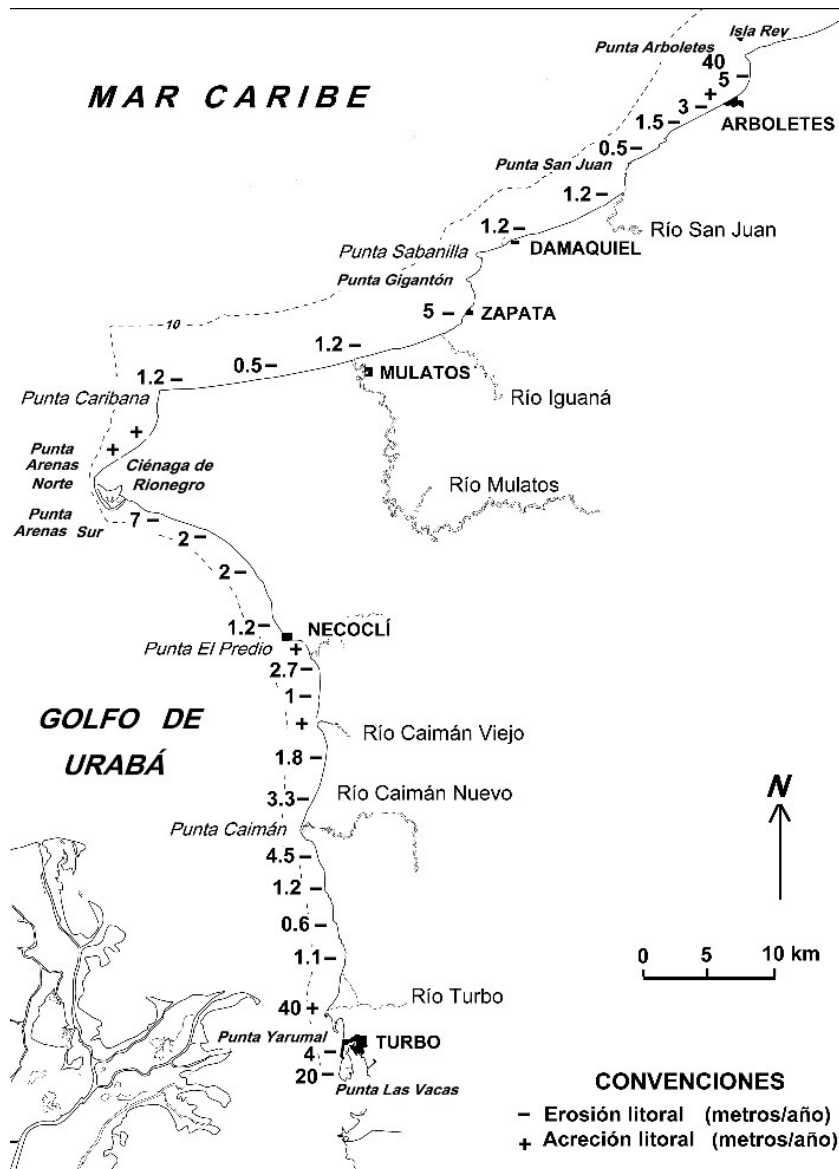


Figura 6.1. Tasas de erosión litoral entre Punta Arboletes y Turbo (Correa y Vernet, 2004).

6.2. Resultados de predicción en acantilados blandos en contexto de magnitudes obtenidas en otros sitios del mundo

Las magnitudes de migración predichas a 50 años (ecuación SCAPE) en los sectores de acantilados blandos considerados, con valores más probables entre -120 y -350 m de retroceso, sugieren impactos importantes en la infraestructura actual cercana a la línea de costa. Entre éstos se incluiría la pérdida de prácticamente todo el trazado paralelo a la línea de costa de la carretera intermunicipal entre Medellín y Montería a la altura de Arboletes (*ca.* 3 km de longitud), sector que incluye las viviendas del barrio Minuto de Dios y el volcán de lodos de Arboletes.

Ejercicios similares de predicción se han realizado para otros sitios del mundo. En el caso del litoral de Suffolk, Reino Unido, Brooks y Spencer (2012) compararon mapas históricos con exactitud apreciable de 1883 y aerofotografías de 1947 para evaluar el desempeño de varias ecuaciones en predecir la posición ya conocida de la línea de costa de 2008, entre los cuales sobresalió la ecuación SCAPE (error medio entre 15 y 36 m). Luego, predijeron para 2050 y 2095, y escenarios de ascenso del NMM de $+4$ mm/año, áreas perdidas futuras de -150 ha en promedio, con distancias de retroceso entre -140 y -250 m. Asimismo, para un escenario de $+5.7$ mm/año en 2050 se esperaría un 10% más de retroceso, *v.gr.* -170 ha en promedio. Por su parte, la migración para 2095 en el escenario de $+4.7$ mm/año estarían entre -300 y -600 m en total, con un 20% más de retroceso (-460 ha) si se consideran $+6.7$ mm/año.

Considerando las tasas de retroceso históricas en Suffolk, Reino Unido (Brooks y Spencer, 2012), se evidencia que las magnitudes dependen del periodo temporal considerado, con un valor a largo plazo entre -2 y -4.4 m/año, y magnitudes de -3.16 m/año entre 1947 y 1981, y -5.10 m/año entre 1981 y 1992. Tasas erosivas de este orden de magnitud fueron calculadas para los sectores de El Tié y algunas zonas de Los Córdoba, cuyas predicciones considerando un ascenso del NMM de 7 mm/año en el litoral de Antioquia son numéricamente similares a los resultados para el escenario de $+6.7$ mm/año propuesto para Suffolk, Reino Unido.

Otros ejercicios de predicción se realizaron, por una parte, para la costa Chennai, ubicada en Tamil Nadu, India (Dar y Dar, 2009), en el cual se calcularon tasas futuras para dos sectores: entre -0.12 y -0.56 m/año, y -0.86 y -2.63 m/año, para valores de retroceso de -140 m en 250 años, con tasas históricas medias de retroceso de -0.11 m/año. En este caso, los escenarios de ascenso del NMM varían entre $+2$ y $+4$ mm/año adicionales a las velocidades de ascenso actuales (parámetro S_2). Por otra parte, Addo *et al.* (2008) proponen aceleraciones de -0.13 a -0.23 y $-$

0.71 a -1.22 m/año considerando escenarios entre $+2$ y $+6$ mm/año de ascenso de NMM en sectores de acantilados blandos de las costas de Accra, Ghana, a 250 años en el futuro.

Los ejercicios de predicción mencionados (India y Ghana) se realizaron para sectores en condiciones de escasez de datos similares a los sectores de acantilados blandos de Antioquia. En estos casos, los autores confían en los resultados utilizando la ecuación SCAPE, incluso antes de la publicación de revisiones conceptuales de la ecuación (Ashton *et al.*, 2011) o de validaciones de ésta (Brooks y Spencer, 2012). Si bien cabe resaltar la validez conceptual de la ecuación SCAPE y su evidente utilidad en sectores con escasez de información histórica (caso de Antioquia), la aplicación de sus resultados en planeación requiere de datos de entrada con suficiente ventana temporal histórica que permita verificar su validez práctica (*e.g.* Brooks y Spencer, 2012).

Para ampliar la ventana temporal en estudios de migración de la línea de costa pueden incluirse mapas antiguos y aerofotografías de principios del s. XX, siempre y cuando se cuente con la información suficiente que permita minimizar los errores cartográficos (*e.g.* Brooks y Spencer, 2012). Para el caso del litoral antioqueño, no es recomendable utilizar este tipo de imágenes como fuente de información para calcular la migración de la línea de costa usando unidades vectoriales en un SIG, debido a la inexactitud asociada con la imposibilidad de georreferenciar y ortorrectificar las imágenes a partir de información de campo. Sin embargo, en estas imágenes pueden observarse cambios importantes en la configuración en planta de la línea de costa, *e.g.* la presencia de la desaparecida Punta Arboletes en fotografías aéreas IGAC de 1938, 1953 y 1962, así como en el mapa de 1817 del brigadier español Joaquín Francisco Fidalgo (*e.g.* Correa *et al.*, 2007).

6.3. Pertinencia del uso de ecuaciones simples para predecir el retroceso de acantilados blandos en Antioquia

Si bien resulta claro que una eventual aceleración en el ascenso del NMM causaría modificaciones importantes en los procesos litorales vinculados con el balance de sedimentos y la erosión costera en Antioquia, aún no existe consenso científico sobre los mecanismos físico-químicos que intervienen en la evolución litoral, que en sentido práctico permitiría proponer modelos para predecir cuantitativamente la respuestas del sistema ante el cambio de alguno de los procesos (*e.g.* Dubois, 2002; Davidson-Arnott, 2005). Esto implica que las predicciones obtenidas a partir de la proposición de escenarios en modelos numéricos (simples o complejos) no debe ser

la única respuesta a la pregunta sobre la evolución futura de ambientes litorales ante el ascenso del NMM. Es preciso acompañar el modelado de los procesos actuales con el fortalecimiento del entendimiento de las implicaciones del NMM más reciente (Holoceno) en la evolución del paisaje litoral (e.g. Woodroffe y Murray-Wallace, 2012).

En países en desarrollo como Colombia, que no cuentan con la suficiente información histórica de los procesos involucrados en la evolución litoral, la principal preocupación de los científicos marinos consiste en construir mediciones robustas de los procesos costeros, que en otros países iniciaron varias décadas atrás, en tanto que los modelos de predicción son tan adecuados como completo sea el conocimiento histórico del comportamiento de los agentes/procesos (e.g. Addo *et al.*, 2008). No obstante estos esfuerzos, algunos científicos más radicales afirman que, muy a pesar del creciente desarrollo de los modelos numéricos y la construcción de mediciones sistemáticas y estadísticamente confiables, es imposible predecir el comportamiento de los ambientes litorales dada su complejidad (e.g. Cooper y Pilkey, 2007).

En este orden de ideas, algunos autores ya han señalado que las proyecciones realizadas a partir de la aplicación de modelos con un único parámetro es insuficiente, arguyendo que se haría un mayor progreso al considerar todos los parámetros involucrados (Hapke y Plant, 2010). El modelo por procesos a partir del cual se dedujo la ecuación para este trabajo, de nombre *Soft Cliff and Platform Erosion* (Walkden y Hall, 2005), podría considerarse dentro de esta última categoría. Sin embargo, la utilización de este tipo de herramientas requiere de series de tiempo estadísticamente robustas de los procesos involucrados en él, v.gr. magnitudes de retroceso histórico, alturas de oleaje, registros de mareas, fisiografía y tasas de ascenso del NMM (e.g. Bray y Hooke, 1997; Walkden y Hall, 2011).

Las razones principales de la utilización de series de tiempo robustas se fundamentan en: (1) rangos de incertidumbre menores y mayor confianza estadística en los datos; (2) menor variabilidad entre las tasas litorales en dirección paralela a la línea de costa; y (3) filtración de las fluctuaciones de corto plazo (ruido) de la tendencia a largo plazo (señal). Por tanto, para fines de predicción con base en series de tiempo, se sugiere utilizar valores históricos con una ventana temporal con una longitud el doble del tiempo a predecir: por ejemplo, para predecir a 50 años debe contarse como mínimo con 100 años de datos históricos (Crowell *et al.*, 1993; Leatherman *et al.*, 1997).

Según estas últimas consideraciones, se podrían proyectar valores en el futuro a partir de las ventanas temporales entre las líneas de costa comparadas, que para este estudio serían 34 años en Arboletes, 66 en Los Córdoba y 71 en Minuto de Dios y El Tié. Teniendo esto en cuenta, y para una tasa de ascenso del NMM más probable (8.33 mm/año; Pfeffer *et al.*, 2008), se adjuntan en la **Tabla 6.1** las magnitudes de predicción estadísticamente más adecuadas para cada sector.

Tabla 6.1. Magnitudes promedio de retroceso más probable y estadísticamente válidas de acuerdo con la información histórica. Las magnitudes fueron calculadas para el escenario de ascenso del NMM de 8.33 mm/año (Pfeffer *et al.*, 2008), y teniendo en cuenta la ventana temporal máxima sugerida según la información histórica disponible (*e.g.* Leatherman *et al.*, 1997).

Sitio	Tasa ascenso del NMM más probable (mm/año)	Tasa retroceso promedio asociada (m/año)	Distancia retroceso promedio (m)
Los Córdoba	8.33	-7.00	-231.05 (Año 2037, 33 años)
Minuto de Dios		-3.08	-109.95 (Año 2044, 35 años)
Arboletes		-2.44	-41.44 (Año 2026, 17 años)
El Tié		-5.72	-203.11 (Año 2044, 35 años)

6.4. *Resumen Discusión*

La predicción realizada para 50 años en el litoral de Antioquia está soportada en las recomendaciones realizadas por otros autores en sitios del mundo con mayor certeza histórica de los procesos erosivos de acantilados formados en rocas blandas. No obstante la premisa de validez de las ecuaciones usadas, entre las que sobresale el modelo SCAPE, la pregunta sobre la pertinencia de este tipo de predicciones para franjas litorales como las antioqueñas, que no cuentan con cantidades históricas de datos estadísticamente suficientes para predecir a tales escalas de tiempo es, sino obligatoria, necesaria.