

3. CONTEXTO FÍSICO GENERAL Y ESPECÍFICO

3.1. Localización del área de estudio

EL litoral antioqueño se ubica en la parte sur de la Costa Caribe colombiana, desde Boca Tarena, desembocadura septentrional del río Atrato al golfo de Urabá ($8^{\circ}15'N$, $77^{\circ}W$, Municipio de Turbo, límite de los departamentos de Antioquia-Chocó) hasta el barrio el Minuto de Dios ($8^{\circ}55'N$, $76^{\circ}25'W$, Municipio de Arboletes, límites Antioquia-Córdoba). La línea de costa de Antioquia tiene una longitud aproximada de 567 km (incluyendo las Bocas del río Atrato), de los cuales 67 km (Punta Arenas – Arboletes) corresponden a “costa abierta”, y 500 km (Punta Arenas – Boca Tarena) se localizan a lo largo del litoral semi-encerrado del Golfo de Urabá (**Figura 3.1**).

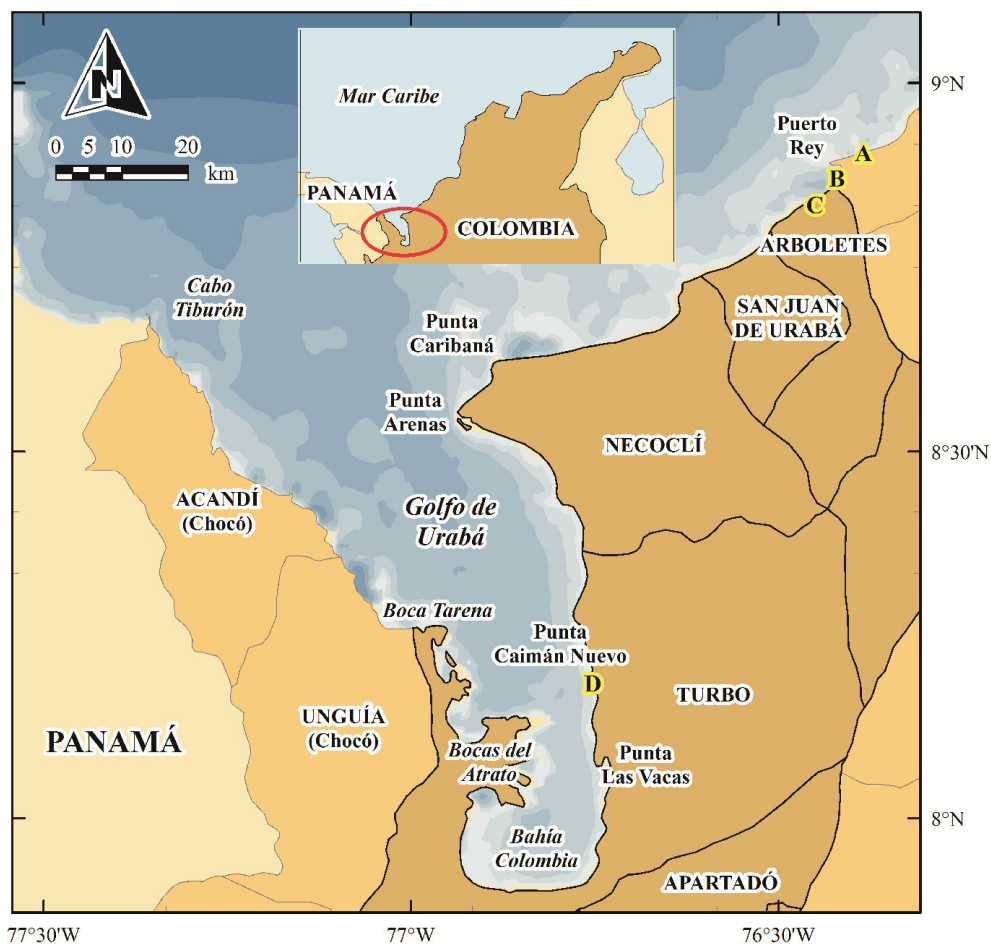


Figura 3.1. Localización geográfica de la franja litoral de Antioquia. Límite oeste: Boca Tarena ($8^{\circ}15'N$, $77^{\circ}W$); límite noreste: Minuto de Dios, cercano a Puerto Rey ($8^{\circ}55'N$, $76^{\circ}25'W$). Las letras con fondo amarillo señalan los sitios de acantilados blandos considerados: (A) Los Córdoba, departamento de Córdoba; (B) barrio Minuto de Dios, límites entre Arboletes y Los Córdoba; (C) casco urbano de Arboletes – desembocadura del río Jobo; y (D) corregimiento El Tié, municipio de Turbo.

3.2. *Marco geológico*

Al norte de Colombia (sur del Mar Caribe) se encuentra un complejo acrecionario muy extenso denominado Cuña Acrecionaria Offshore del Sinú, la cual representa la parte más externa de la llamada Cuña Acrecionaria del Norte de Colombia. Este prisma acrecionario es una geoforma submarina con forma de arco, asociada con la subducción del tipo B de la Placa Caribe bajo la Placa Suramericana, que se localiza entre el quiebre del Talud Continental y el fondo de la Cuenca Colombia a profundidades mayores a 3,000 m. Su parte emergida está expuesta a lo largo de las montañas de San Jacinto y el área del Sinú, y consiste en imbricaciones de empuje convergentes en dirección W, que involucran tanto corteza oceánica del Cretáceo como cobertura sedimentaria reciente, *v.gr.* Formación Casona y sedimentos pelágicos y sin-orogénicos del Paleogeno – Mioceno Bajo (Flinch *et al.*, 2003).

La zona de estudio en cuestión está ubicada en el terreno estratigráfico de San Jacinto (parte emergida de la Cuña Acrecionaria del Sinú), el cual está formado por secuencias sedimentarias volcanoclasticas y siliciclasticas depositadas en ambientes marinos (profundos y someros) durante el Cretáceo – Paleoceno. Por lo anteriormente mencionado, la franja litoral antioqueña-cordobesa se define sobre rocas sedimentarias turbidíticas y depósitos marinos de hasta 7 km de espesor, constituidas principalmente por sedimentos hemipelágicos y terrígenos del Oligoceno – Plioceno (*e.g.* Duque-Caro, 1984; Vinnels *et al.*, 2010; **Figura 3.2**).

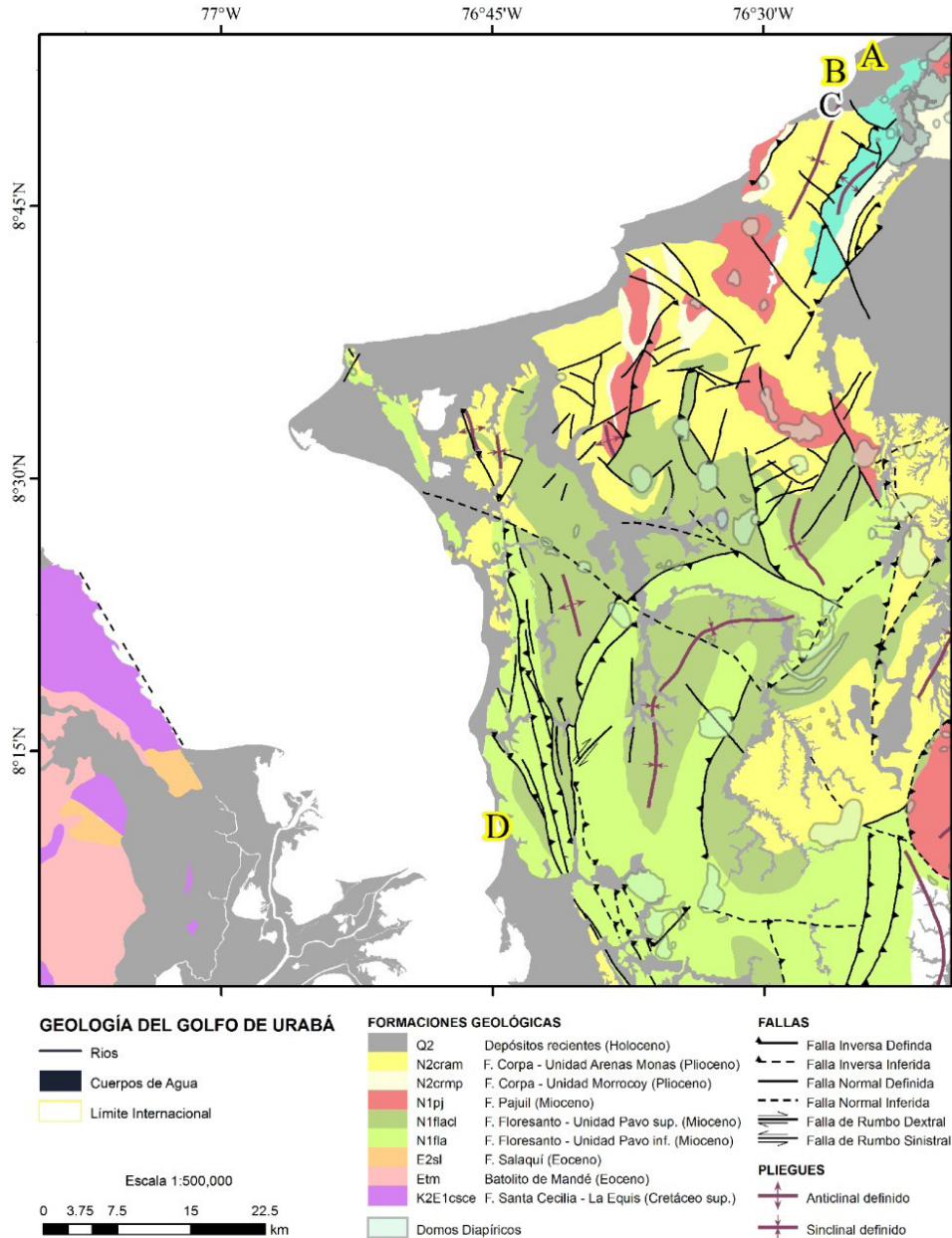
3.3. *Marco climático*

Influida por los desplazamientos periódicos de la Zona de Convergencia Intertropical, la región de interés posee dos periodos climáticos típicos:

(1) Seco, de finales de diciembre a principios de abril, con precipitaciones cercanas a 40 mm/mes en Arboletes y 100 mm/mes en Turbo. Este periodo se caracteriza además por la incidencia de los vientos Alisios del NE, con velocidades entre 4 y 9 m/s y precipitaciones de 100 mm/mes en la cuenca del río Atrato (Thomas *et al.*, 2007).

(2) Lluvioso o húmedo, de mayo a noviembre, con precipitaciones que alcanzan los 100 mm/mes en Arboletes, 300 mm/mes en Turbo y 250 mm/mes en la cuenca del río Atrato. En este periodo predominan vientos provenientes del sur, con velocidades medias menores a 2 m/s, y máximos de hasta 4 m/s (Thomas *et al.*, 2007).

Estas dos épocas, sin embargo, no están asociadas con cambios drásticos de temperatura. Considerando las magnitudes medias, se han registrado temperaturas entre 26 y 28 °C, con valores extremos de 19 y 40 °C, y precipitaciones entre 2.5 y 3.0 m/año (Correa y Vernet, 2004; Thomas *et al.*, 2007).



Fuente: Planchas Geológicas INGEOMINAS 60, 70 y 80
IGAC & INGEOMINAS, 2005. Investigación Integral del Andén Pacífico Colombiano, Planchas 58, 59, 68, 69 y 79.

Figura 3.2. Mapa geológico del sector noroccidental de Colombia, incluyendo el Golfo de Urabá y la franja litoral de Antioquia ubicada en “costa abierta”. Los sitios de estudio de acantilados blandos de interés se señalan con las letras A (Los Córdoba), B (Minuto de Dios), C (Arboletes) y D (El Tié). Nótese que la formación geológica Q2, común para los sitios de estudio, corresponde a depósitos recientes cuaternarios (Holoceno). Tomado de Prüssmann, 2012.

3.4. Marco oceanográfico general – cambios históricos del nivel del mar

3.4.1. Mareas y oleaje en la franja litoral de Antioquia

Los procesos oceanográficos de la zona de estudio dependen principalmente de las mareas, consideradas semidiurnas mixtas de rango micro con amplitudes máximas del orden de 0.92 m y medias cercanas a 0.5 m, y el oleaje, asociados con la actividad de los vientos Alisios del N y NE en época seca, y del S en época húmeda (Thomas *et al.*, 2007). Éste último tiene alturas significativa de ola promedio entre 0.3 y 0.6 m según el sitio, y máximos hasta de 2.0 m (Posada *et al.*, en prensa; **Tabla 3.1**). Con estos valores típicos, y a partir de la clasificación propuesta por Davis y Hayes (1984), puede afirmarse que el oleaje es el proceso oceanográfico dominante en el litoral de Antioquia (**Figura 3.3**).

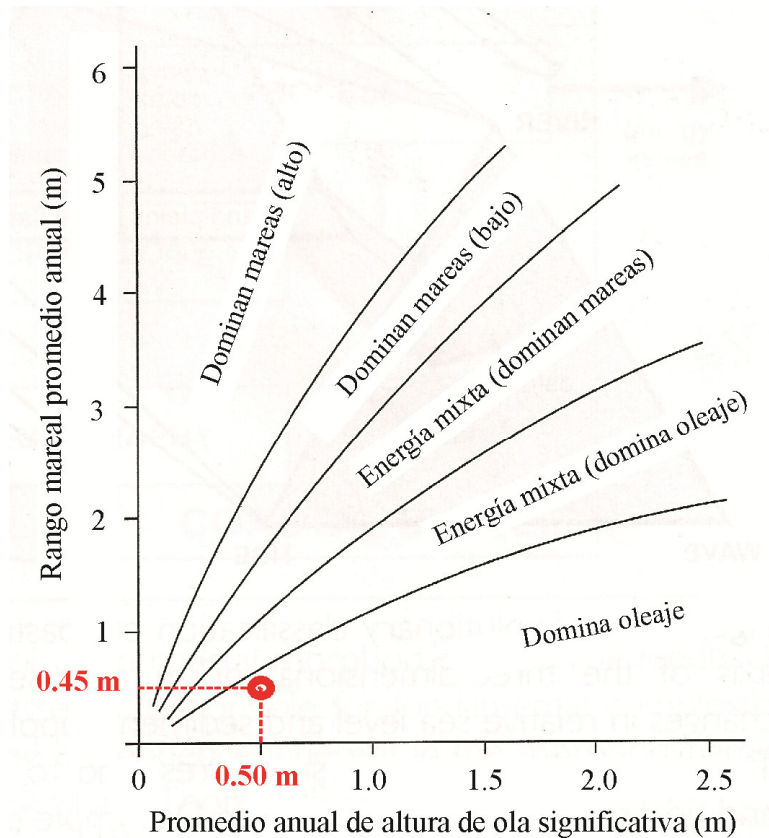


Figura 3.3. Diagrama de Davies y Hayes (1984) con los valores medios de altura de ola (eje horizontal) y rango mareal (eje vertical) para la franja litoral de Antioquia. La energía de los procesos marinos varía de *dominada por el oleaje* para situaciones medias y de tormenta, hasta *mixtas con prevalencia del oleaje* en condiciones de mareas vivas (ca. 0.92 m).

Tabla 3.1. Estadísticos de tendencia central para los resultados del modelo de oleaje del Caribe (Posada *et al.*, en prensa) para finales de 2008 y el 2009. Los valores modelados corresponden a H (altura significativa de ola en metros) y T (periodo pico en segundos).

Sitio	H (m)	σ_H (m)	H_e (m)	T (s)	σ_T (s)	T_e (s)	d_C (m)
Arboletes	0.58	0.25	1.97	3.28	0.76	7.55	4.02
Mínuto de Dios	0.27	0.10	0.81	2.81	0.84	7.51	1.76
Los Córdoba	0.35	0.26	1.81	2.75	0.87	7.64	3.73
El Tié	0.49	0.28	2.04	2.94	0.59	6.22	3.90

3.4.2. Niveles del mar históricos en la parte sur del Mar Caribe

A pesar de que la zona de estudio no cuenta con información histórica de niveles del mar medidos *in situ*, existen registros cercanos de los mareógrafos de Cristóbal (Panamá) y Cartagena (Figura 3.4), con tasas estadísticamente significativas (ascensos relativos del nivel medio del mar) de +4.53 mm/año entre 1951 y 2000 en Cartagena, y de +0.67 mm/año entre 1907 y 1997 en Cristóbal (Andrade, 2008; Figura 3.5). Otros estudios han propuesto magnitudes de +2.01 mm/año (1907-1997) y +3.58 mm/año (1952-1992) en Cristóbal, y +5.61 mm/año (1952-1992) en Cartagena (Torres *et al.*, 2006).

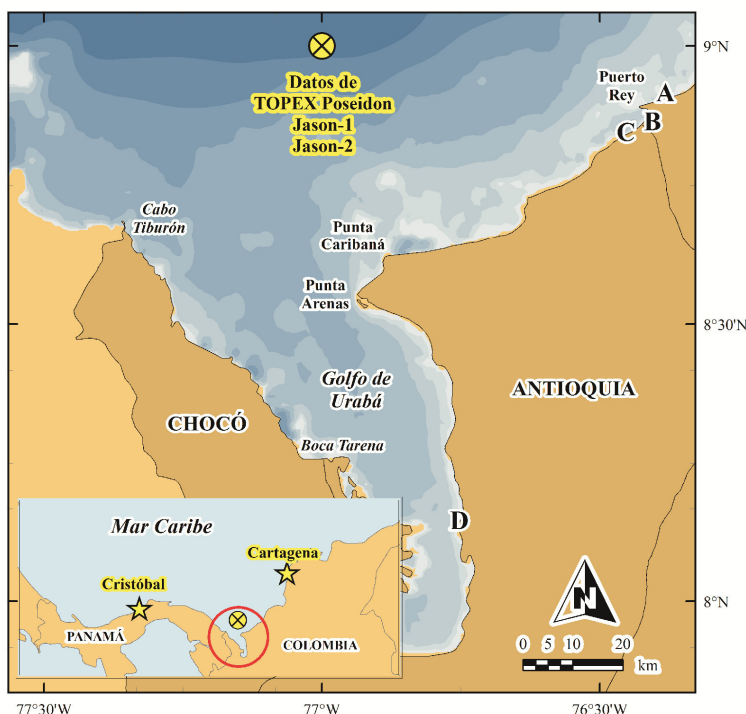


Figura 3.4. Ubicación de los mareógrafos de Cartagena y Cristóbal en relación con el punto de datos de TOPEX/Poseidon, Jason-1 y Jason-2, utilizados en este estudio. La ubicación de los mareógrafos se muestra por las estrellas y la de los datos de altimetría por satélite como una equis circunscrita.

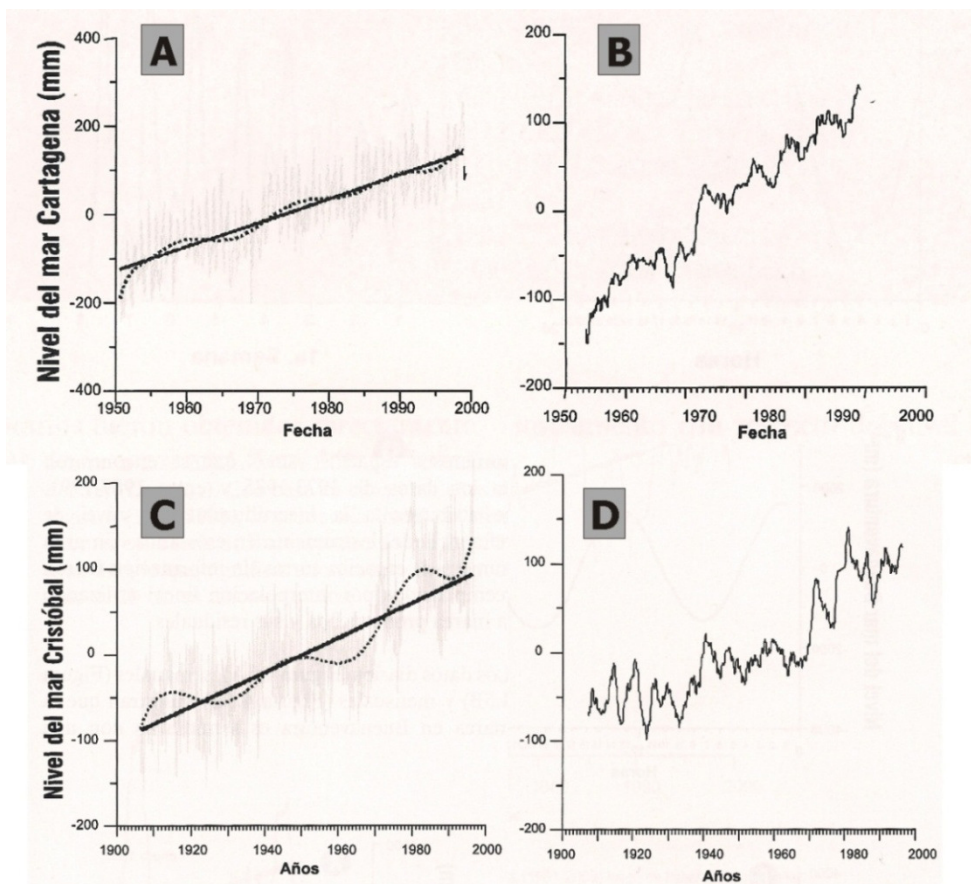


Figura 3.5. Registros de niveles del mar en el sur del Mar Caribe. (A) Media mensual multianual del nivel del mar entre 1951 y 2000 en Cartagena. La tendencia lineal muestra un ascenso constante en el nivel relativo del mar, mientras que la tendencia polinomial evidencia un pulso alrededor de 20 años. (B) Registro anterior filtrado para observar cambios estacionales. Obsérvese la periodicidad de 6.5 años en las últimas dos décadas. (C) Media mensual multianual del nivel del mar en Cristóbal, Panamá. La tendencia lineal muestra el ascenso en el nivel medio, en tanto que el ajuste polinomial indica los modos de variación con un periodo alrededor de 30 años. (D) Señal anterior filtrada, indicando pulsos de 6.5 años semejantes a los encontrados en Cartagena (modificado de Andrade, 2008).

3.5. Contexto físico de los sectores de acantilados blandos estudiados

3.5.1. Sector Los Córdoba – desembocadura del río Jobo

Arboletes y sus zonas aledañas se ubican sobre una terraza marina emergida durante los últimos miles de años debido a procesos neotectónicos e hidro-isostáticos, incluyendo deformaciones locales asociadas al diapirismo de lodos, evidentes por el domo circular sobre el cual se ubican los cráteres principal y secundarios del “volcán de lodo” de Arboletes (Page, 1982). Esta terraza forma una extensa superficie más o menos regular (aproximadamente 6 km de amplitud hacia tierra), cuya altura con relación al nivel del mar disminuye progresivamente hacia el norte, desde 10 m en Arboletes hasta 1 m en las cercanías de Punta Rey (ver **Figura 3.6**; González y Guarín, 2003).

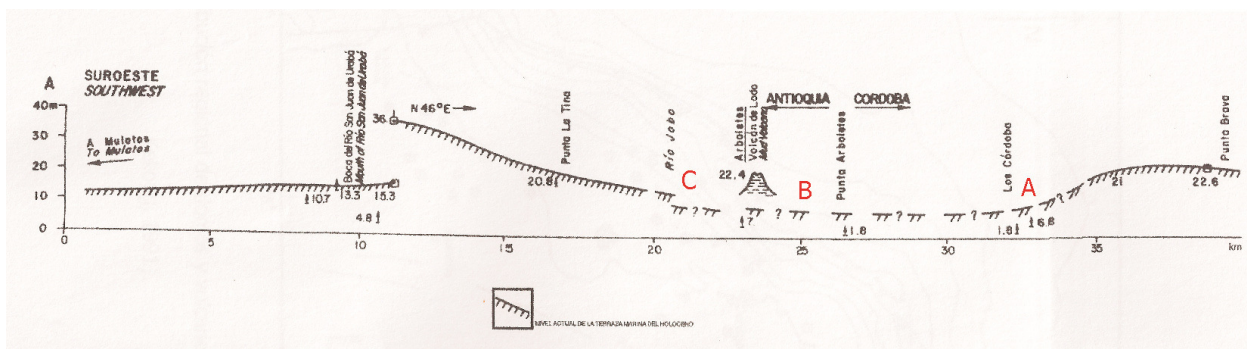


Figura 3.6. Perfil de la terraza marina emergida desde la desembocadura del río San Juan, departamento de Antioquia, hasta Punta Brava, departamento de Córdoba. Las letras corresponden a los sitios de estudio: (A) Los Córdoba, (B) Minuto de Dios, y (C) Arboletes – río Jobo (tomado de González y Guarín, 2003; modificado de Page, 1982).

El borde externo actual de esta terraza está marcado por escarpes acantilados cortados en arcillolitas y lodolitas con algunas intercalaciones de areniscas en las cercanías de la desembocadura el río Jobo. A lo largo de su mayor longitud, los escarpes están altamente meteorizados químicamente y muestran fracturamiento intensivo denso (espaciamiento centimétrico entre fracturas) por efectos de descompresión y, en los alrededores del volcán de lodos, claros efectos de cizallamiento muy probablemente asociado a la intrusión de lodos (Correa *et al.*, en prensa; **Figura 3.7A-C**). La baja competencia litológica, producto de estos procesos, se expresa en mayor medida en el estrato superior más alterado de los escarpes (arcillolita parda), en contacto tajante con un estrato de arcillolita gris más fresca susceptible, sin embargo, ante la acción del oleaje (**Figura 3.8**).

El retroceso de los escarpes presentes en este sector se produce por la acción conjunta de procesos marinos y subaéreos, manifestado en movimientos de masa de la capa superior de arcillolita parda producto de procesos subaéreos, y remoción de material en la capa de arcillolita gris por la acción del oleaje. Como nota adicional, este tipo de acantilados, formados por dos estratos, subyaciendo el de mayor resistencia, pueden catalogarse como tipo a-C según la clasificación presentada en la **Figura 2.5** (Emery y Kuhn, 1982).

En síntesis, existe un esquema cíclico de 7 etapas que explica la evolución de los acantilados de esta zona (González y Guarín, 2003; **Figura 3.9**). Algunos sitios, no obstante, retroceden de manera diferente, debido a diferencias relativas en la intensidad relativa de estos agentes, la formación de playas que protegen el escarpe del oleaje, y/o la ocurrencia de algunos de factores como la formación de estanques, la bioturbación o presencia de obras civiles en la terraza (**Figura 3.10** y **Figura 3.11**).

3.5.2. *Sector El Tié (municipio de Turbo)*

La franja litoral del sector El Tié se ubica en una amplia terraza semiondulada, con alturas entre 0.5 y 2 m, conformada por lodolitas poco consolidadas deleznable formadas en ambientes marinos y/o litorales durante el Holoceno, y limitada tierra-adentro por colinas de bajas a medias (máximo 200 m) pertenecientes a la Llanura Costera Urabá (este del Golfo de Urabá). La línea de costa tiene orientación general SSE, con presencia de playas de pendiente media de 7° en frente de los acantilados. El retroceso de estos escarpes, con magnitudes entre 1.4 y 4.3 m/año, está asociada con movimientos de masa (caídas de rocas) por la acción tanto de procesos subaéreos, produciendo erosión superficial, como marinos por la socavación debido al oleaje incidente (Correa *et al.*, en prensa; INVEMAR, 2010; *cf.* **Figura 3.7 D**).

Las características del perfil típico de estos escarpes permiten catalogarlos como tipo a-A (homogéneo con mayor protagonismo de la acción marina que la subaérea, Emery y Kuhn, 1982). La baja resistencia mecánica de las rocas que los conforman no permite que rebote el percutor del martillo Schmidt tipo L, teniendo en cuenta que en todos los casos de la zona de estudio este valor fue cercano a 10 (mínimo de correlación entre el rebote y la resistencia mecánica de la roca). Asociadas a esta magnitud, se tienen resistencias a la compresión simple entre 0.07 y 0.5 MPa para la zona de Los Córdoba y Minuto de Dios, que evidencian la presencia de acantilados de rocas blandas en la zona de estudio, o *soft cliffs* (González y Guarín, 2003).

3.6. *Resumen Contexto Físico*

La franja litoral de estudio está ubicada en la parte sur de la costa Caribe de Colombia, en el extremo noroccidental del departamento de Antioquia, República de Colombia. Comprende los municipios de Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá y Arboletes, con una longitud aproximada de 570 km. Su evolución espacio-temporal depende de interrelaciones complejas entre procesos físicos, químicos y biológicos vinculados con la geología, el clima y la oceanografía locales. En este sentido, los agentes-procesos más relevantes incluyen la tectónica, el diapirismo de lodos, la hidro-isostasia, la meteorización física y química, y la acción del oleaje. Dadas las condiciones erosivas presentes (tasas de retroceso de la línea de costa del orden de metros por año) y la baja capacidad litológica de los estratos (resistencias a la compresión entre 0.07 y 0.5 MPa), y considerando escenarios de ascenso del NMM futuros, son de esperarse aceleraciones en las velocidades de retroceso históricas registradas en los sectores de acantilados considerados.

Tabla 3.2. Factores naturales y antrópicos adicionales que afectan el retroceso de los escarpes entre Los Córdoba y Arboletes (tomado de González y Guarín, 2003).

Factores	Causas	Consecuencia
Bioturbación	Raíces sobre el estrato de arcillolita parda Madrigueras de cangrejos en ambos estratos	Cambios en la permeabilidad inicial de la roca
Estanques acuíferos	y Depresiones en las terrazas Litología Nivel freático	Formación de estanques naturales y artificiales Deslizamientos e inundaciones
Obras civiles	Construcción pozos y redes de tuberías	Filtración de fluidos de las estructuras a la roca
Sobrecarga	Alta densidad de palmeras Casas en el borde del talud Caminos de ganado Senderos en el borde del talud	Aumento de las fuerzas verticales de compresión Agrietamiento de los senderos Pequeños deslizamientos
Construcción desproporcionada de obras de defensa	Erosión de las playas en frente de los acantilados	Alteración de la dinámica del oleaje Desbalance de las fuerzas actuantes Formación de bahías en Z



Figura 3.7. Acantilados formados en rocas sedimentarias del Terciario pertenecientes al Relieve Costero de Antioquia. (A) Secuencia sub-horizontal de arcillolitas con lentes arenosos, una capa de arcillolita parda suprayaciendo a otra de arcillolita gris, municipio Los Córdoba, límites con Arboletes; (B) secuencia similar a la anterior, Minuto de Dios, municipio de Arboletes; (C) lodolitas, sur del casco urbano de Arboletes; y (D) lodolitas poco consolidadas, corregimiento El Tié, municipio de Turbo. Fotografías A-D por Iván D. Correa, B por Juan F. Paniagua.



Figura 3.8. Expresiones de la acción de los procesos marinos en los escarpes. (A) Lodolita gris afectada por la acción hidráulica del oleaje, con presencia de bloques abrasivos en la base, entre la desembocadura del río Los Córdoba y Galilea; (B) secuencia subhorizontal de arcillolitas con lentes arenosas, que presentan acanaladura de erosión en la base del acantilado, movimiento de masa del estrato superior y troncos arrastrados por el mar, norte de la desembocadura del río Los Córdoba; (C) pequeña bahía formada por las diferencias en la resistencia ante la acción marina del afloramiento, sur de Minuto de Dios; (D) pequeñas cavernas que aparecen al perderse los estratos menos resistentes en la secuencia de arcillolita gris, sur de Minuto de Dios; (E) estado avanzado de la formación de cavernas por la acción marina, una vez la capa de arcillolita parda se ha desplomado; (F) tendencia de retroceso vinculada con la dirección y el buzamiento de los estratos N70E/32 en Minuto de Dios. Fotografías tomadas en mayo 16 de 2012 (sector de Los Córdoba) por Juan F. Paniagua, y mayo 17 de 2012 (Minuto de Dios) por Iván D. Correa.

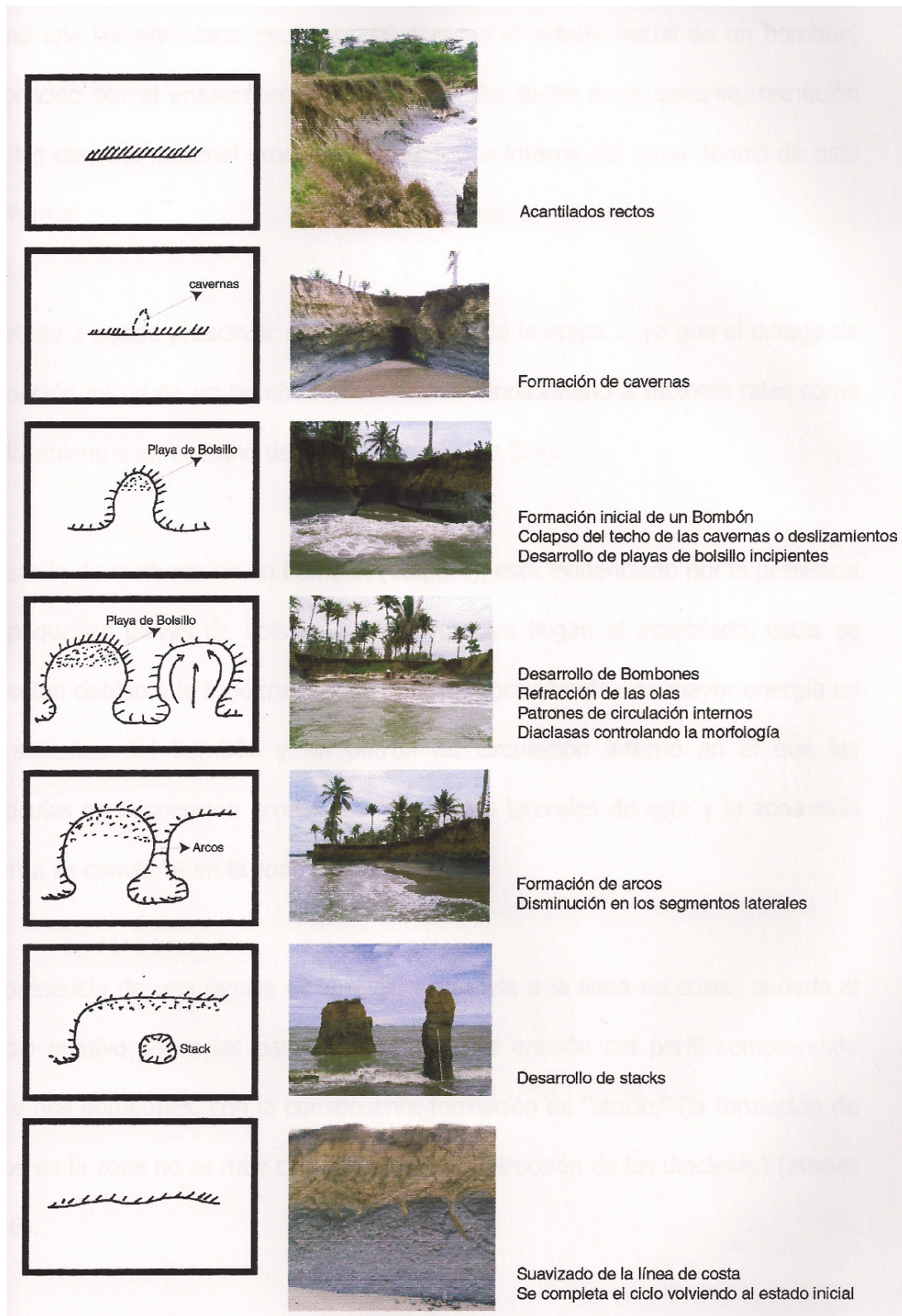


Figura 3.9. Esquema evolutivo temporal propuesto para sectores de acantilados blandos sin obras de defensa importantes. Las etapas consisten en: (1) acantilado recto; (2) formación de cavernas; (3) formación de bombones y playas de bolsillo; (4) desarrollo de bombones y playas de bolsillo, con la consecuente acentuación de la difracción y refracción del oleaje; (5) formación de arcos en los segmentos entre bombones; (6) formación de remanentes erosivos (*stacks*); (7) suavizado de la línea de costa acantilada, y vuelta al estado inicial. Tomado de González y Guarín, 2003.

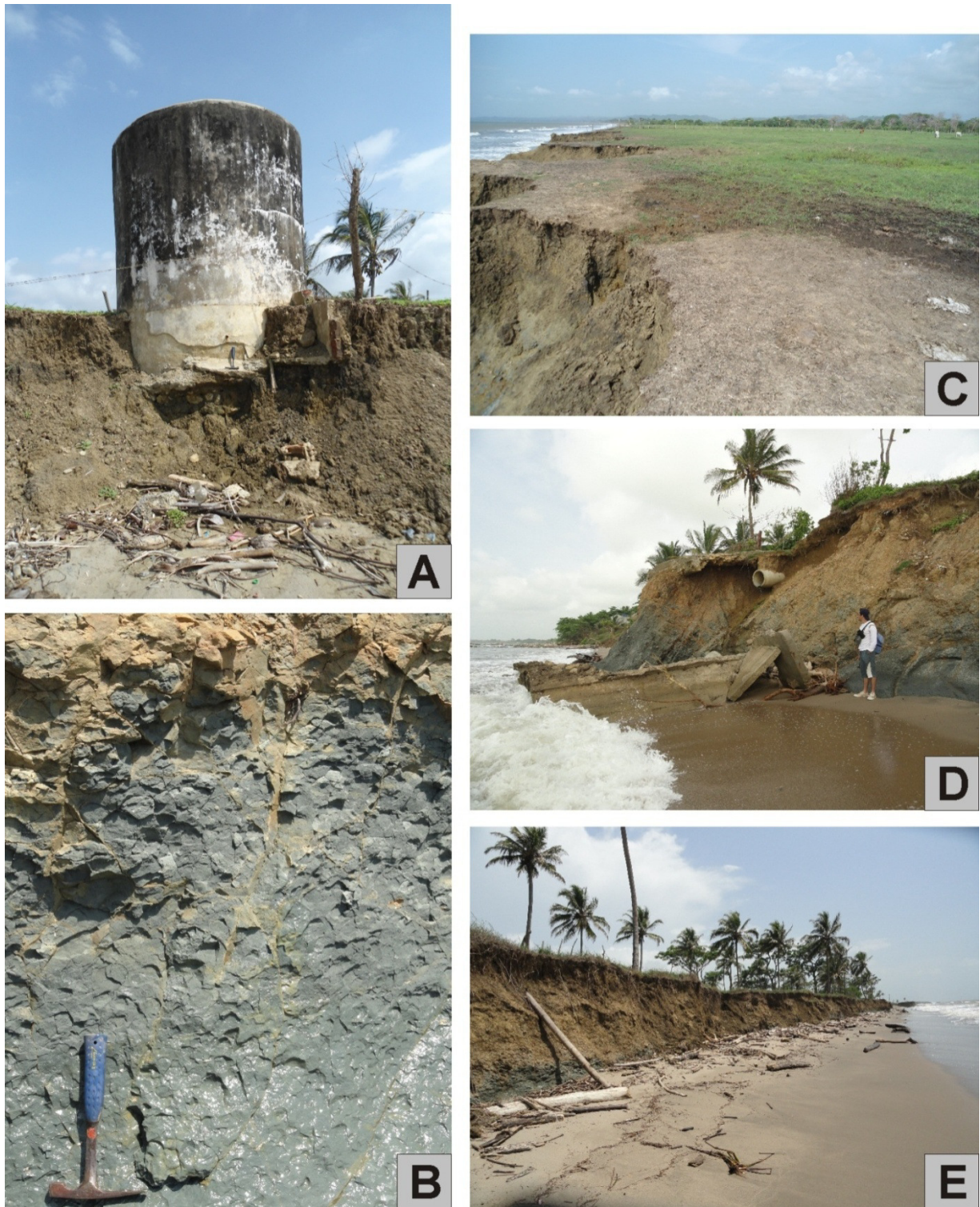


Figura 3.10. Agentes adicionales que afectan la resistencia de los acantilados ante los procesos marinos y subaéreos. (A) Presencia de estructuras en concreto utilizadas para almacenamiento de agua, cercanías de Galilea, Los Córdoba; (B) diaclasas y fracturas en los estratos de arcillolita parda y gris, típicos en los escarpes entre Los Córdoba y Galilea; (C) aguas estancadas que pueden desencadenar movimientos de masa, terraza entre la desembocadura del río Los Córdoba y Galilea; (D) retroceso reciente del acantilado con presencia de tuberías en concreto para evacuar las aguas residuales, cercanías desembocadura río Jobo; (E) sobrepeso por la presencia de palmeras en el escarpe, norte del río Los Córdoba. Fotografías tomadas el 16 y 17 de mayo de 2012, A y C por Juan F. Paniagua; B, D y E por Iván D. Correa.



Figura 3.11. Remanentes erosivos y afectación de viviendas presentes en los acantilados entre Puerto Rey y Arboletes. (A) Casa de recreo abandonada en la actual Punta Rey; (B) espolón sin ganancia de playa en su zona de acumulación, con la Isla Rey en el centro-arriba de la fotografía; (C) pérdida acelerada de terrenos en el barrio Minuto de Dios; (D) remanente erosivo (*stack*) al sur del barrio Minuto de Dios, con Isla Rey en el fondo. Fotografías tomadas el 17 de mayo de 2012 por Iván D. Correa.