

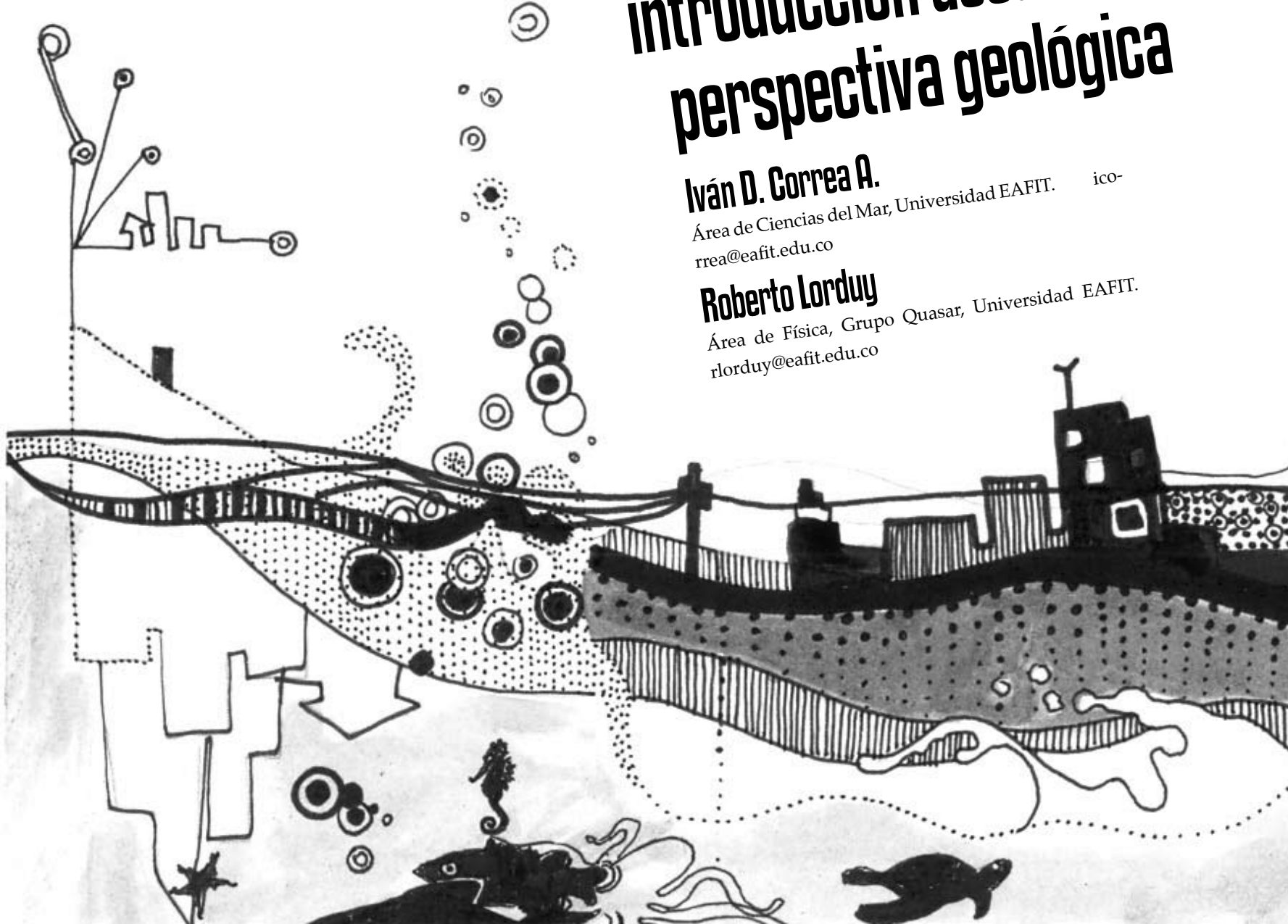
Implicaciones del ascenso del nivel del mar sobre los litorales de Colombia: introducción desde una perspectiva geológica

Iván D. Correa A.

Área de Ciencias del Mar, Universidad EAFIT. icorrea@eafit.edu.co

Roberto Lorduy

Área de Física, Grupo Quasar, Universidad EAFIT. rlorduy@eafit.edu.co



Introducción

La última comunicación del International Panel on Climate Change (Valencia, noviembre de 2007) reafirma que el calentamiento global es un hecho científico comprobado por fuera de toda duda; se evidencia hoy en día por los incrementos en las temperaturas medias globales del aire y del océano, por el extendido deshielo de los glaciares, y por el aumento global del nivel medio del mar (IPCC, 2007). Los datos sobre el nivel del mar confirman la tendencia ascendente identificada en estudios anteriores y son consistentes con las observaciones sobre aumentos en las temperaturas y deshielos: desde 1961, su nivel medio ha aumentando a tasas de 1.8 mm/año (1.3 – 2.8 mm/año). Entre 1993 y 2003, la velocidad media de ascenso fue de 3.1 mm/año (2.4 – 3.8 mm/año), cifra que muestra un incremento fuerte que podría reflejar cambios decadales “normales” y/o la aceleración de la tendencia histórica. Los escenarios sobre la posición del nivel del mar para fines de este siglo plantean alturas entre 18 y 60 cm por encima de los niveles del periodo 1980-1999.

Las implicaciones geológicas del Cambio Climático Global son tema prioritario de estudio, tanto por sus aspectos teóricos como por el convencimiento de que el ascenso del nivel del mar es una de las causas principales de muchos cambios físicos y biológicos drásticos que se están registrando en las costas del mundo (Bird, 1985, 1993; Finkl Jr., 1994; Viles y Spencer, 1995; Eurosion, 2008). En particular, la elaboración de escenarios de respuestas de los medios litorales al aumento del nivel del mar es fundamental para planificar racionalmente el desarrollo de las zonas costeras, cada día con mayores demandas, importancia socioeconómica y deterioro ambiental (Figura 1).

Los escenarios sobre la posición del nivel del mar para fines de este siglo plantean alturas entre 18 y 60 cm por encima de los niveles del periodo 1980-1999

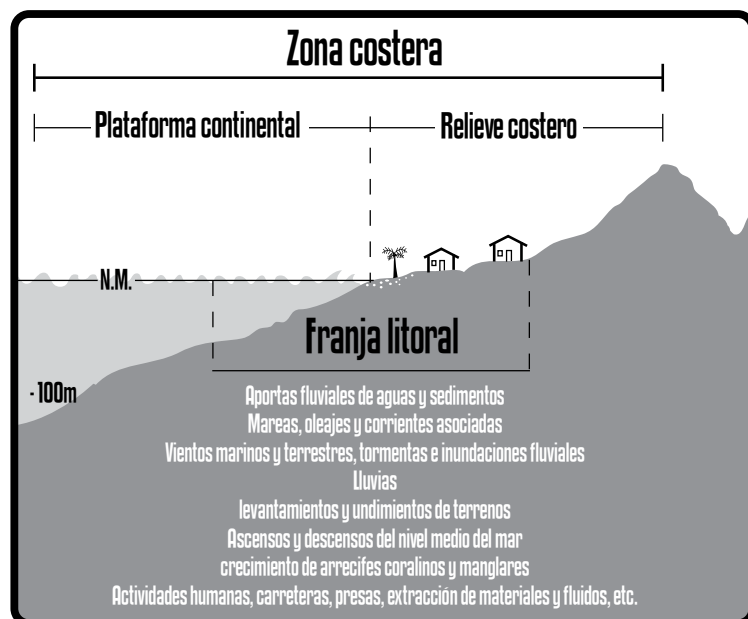
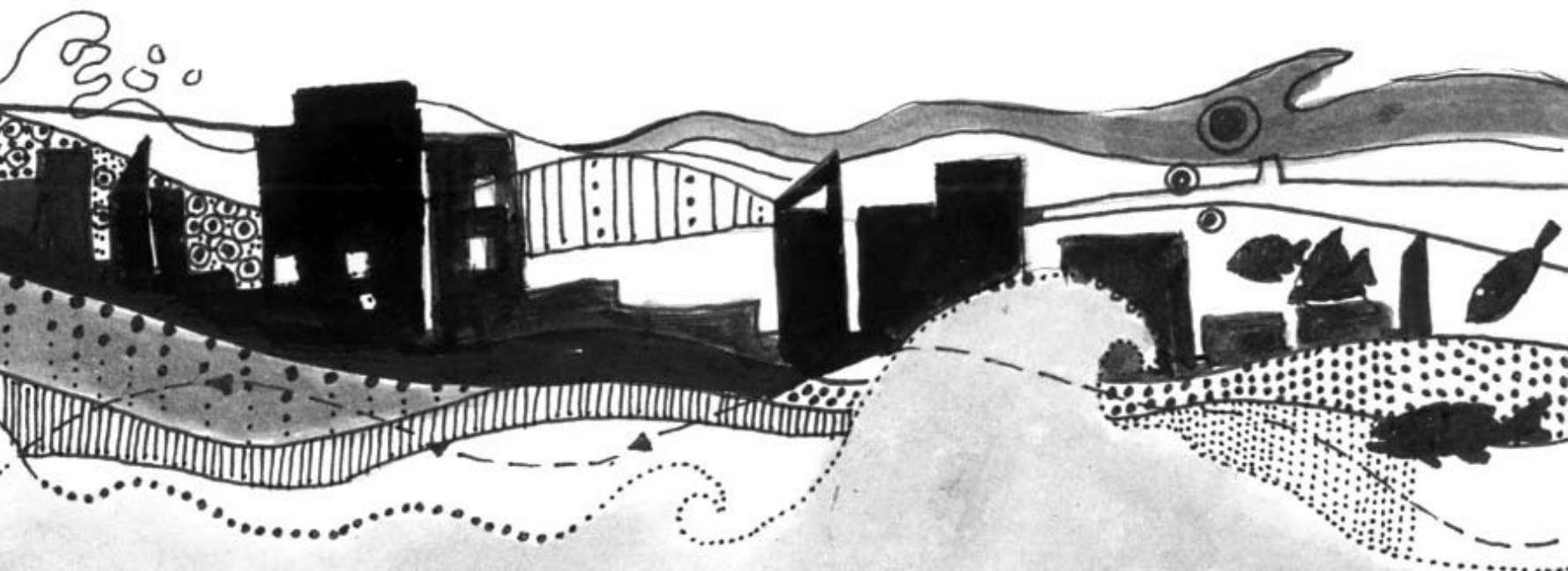


Figura 1. La zona costera es el área amplia de encuentro entre la tierra y el mar, y comprende tanto el relieve costero emergido como los fondos y la columna de agua de la plataforma continental. La franja litoral es la parte de la zona costera en donde las interacciones entre los procesos climáticos, oceanográficos y geológicos son más intensas. Los procesos naturales y las características biofísicas de muchos litorales han sido modificadas en gran medida por las intervenciones antrópicas. Tomada de Correa, 2006.

Controles de la evolución geológica de las franjas litorales

Las costas son los ambientes con la geografía y geología más cambiantes del planeta. Las interacciones múltiples entre procesos climáticos (vientos, lluvias, tormentas/huracanes, entre otros), oceanográficos (oleajes, mareas, corrientes asociadas, entre otros) y geológicos (aportes de aguas y sedimentos, levantamientos/hundi-



mientos tectónicos, terremotos/maremotos, entre otros) modifican continuamente el paisaje, especialmente el de las franjas litorales, donde la frontera tierra-mar se define mejor geográficamente (figuras 1 y 2). En la mayoría de los litorales el cambio es la regla, la estabilidad es la excepción. Aun a corto-mediano plazo (días-décadas) los cambios en el paisaje (morfología) litoral son significativos desde el punto de vista práctico: los fondos de la plataforma marina se profundizan y somerizan constantemente, las desembocaduras fluviales migran, las playas y dunas se crean, destruyen y desplazan hacia tierra; la extensión y distribución de los pantanos de manglares y otras inundables aumentan o disminuyen; entre otros. En ambientes geológicamente inestables como los ubicados en, o cerca, de zonas de subducción, sujetos comúnmente a fenómenos como terremotos/maremotos, actividad de fallas y volcanismo de lodos, etc. (como nuestras costas Pacífica y Caribe, Figura 3), la inestabilidad litoral alcanza en muchos casos expresiones máximas (Duque-Caro, 1984; Gómez, 1986; Page, W., 1986; Ingeominas, 1998a,b; Paris et al., 2000; Invenmar, 2003; Correa y Morton, 2008). En estas zonas, la evolución de los

paisajes litorales puede llegar a ser violenta y rápida en extremo, y se caracteriza, entre otros aspectos, por la erosión acelerada de las playas y zonas bajas adyacentes, por hundimientos de terrenos y pérdidas importantes y definitivas del relieve litoral. En muchos sectores los cambios pueden parecer imperceptibles para el observador no entrenado, pero sus efectos acumulativos en años y décadas tienen impactos fuertes, como la desaparición definitiva de muchas playas y la salinización de extensas zonas litorales.

En realidad, las costas y litorales nunca han sido estables, a ninguna escala de tiempo (Bird, 1993; Pinter, 1997; Eurosion, 2008). A largo plazo (cientos-miles de años), su ubicación geográfica y características geológicas han dependido en buena parte de la posición del nivel del mar, que ha sido altamente variable: hace tan sólo 20.000 años, coincidiendo con el Último Máximo Glaciar, el nivel medio del mar se encontraba 80-120m por debajo de su nivel actual. Por tanto, la correspondiente frontera tierra-mar se ubicaba muchos kilómetros "mar adentro" con respecto al presente, aproximadamente sobre los límites actuales de la plataforma continental sumergida

en la actualidad (Figura 4). Los repetidos cambios climáticos del planeta, materializados por la sucesión de periodos glaciales e interglacia-

En la mayoría de los litorales el cambio es la regla, la estabilidad es la excepción.

La evolución de los paisajes litorales puede llegar a ser violenta y rápida en extremo, (...) a diferencia de otros sectores donde los cambios pueden parecer imperceptibles para el observador no entrenado, pero sus efectos acumulativos en años y décadas tienen impactos fuertes.

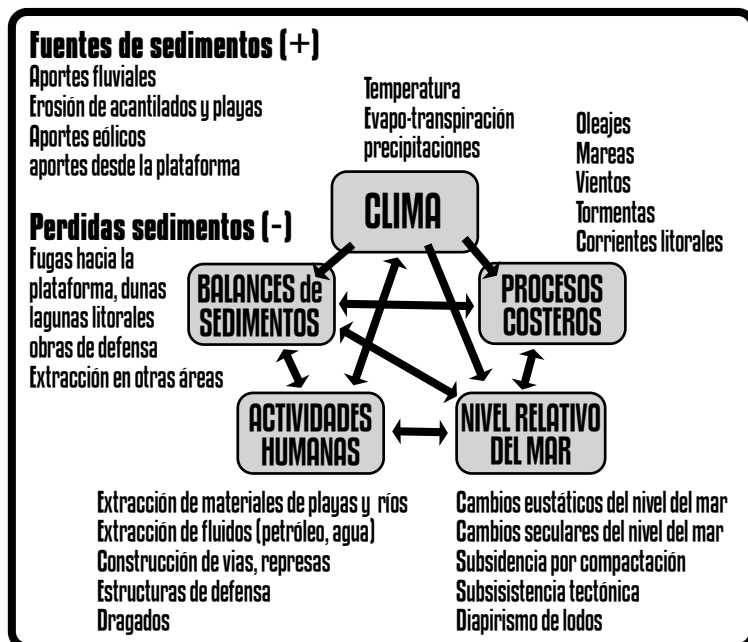


Figura 2. La evolución geológica de las zonas costeras y litorales es función de muchos factores, con interrelaciones de doble vía que actúan, además, a todas las escalas de tiempo. El Cambio Climático Global añade una nueva dimensión de complejidad a la evolución de las costas. Para propósitos prácticos, es necesario identificar al menos los factores principales y sus posibles interrelaciones. Modificada de Morton, 1977.

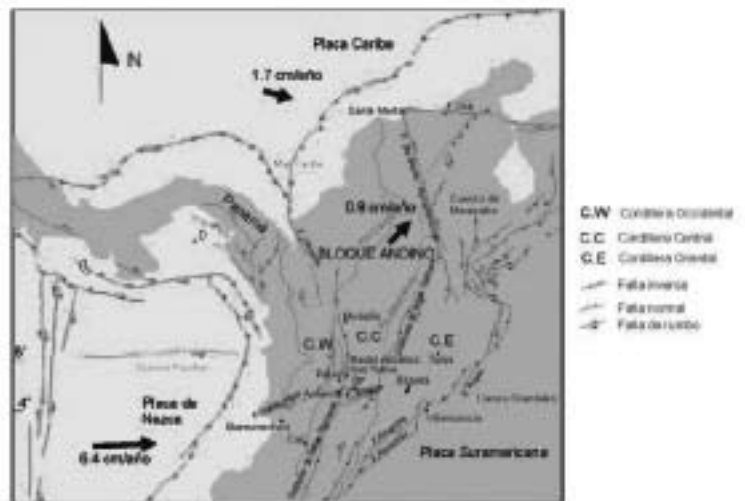


Figura 3. La zona costera es el área amplia de encuentro entre la tierra y el mar, y comprende tanto el relieve costero emergido como los fondos y la columna de agua de la plataforma continental. La franja litoral es la parte de la zona costera en donde las interacciones entre los procesos climáticos, oceanográficos y geológicos son más intensas. Los procesos naturales y las características biofísicas de muchos litorales han sido modificadas en gran medida por las intervenciones antrópicas. Tomada de Correa, 2006.

ciales, han condicionado los bajos y altos marinos (cambios eustáticos) y, en consecuencia, la posición de las franjas litorales. La última vez que el nivel del mar estuvo en su posición actual ocurrió hace unos 120.000 años, antes de que un enfriamiento climático causara la solidificación y acumulación de grandes cantidades de aguas marinas en los polos y glaciares de entonces.

A los factores geológicos de cambio de corto, mediano y largo plazo hay que adicionar los impactos de las intervenciones antrópicas, hoy en día uno de los aspectos fundamentales a considerar (Figura 2). Desde los inicios del siglo XX, las características naturales de muchas costas han sido modificadas fuertemente por sus usos (habitationales, portuarios, turísticos, minería, agricultura y acuicultura, militares, etc.) y por la construcción de las respectivas infraestructuras (National Research Council, 1987; Williams et al., 1995; Eurosión, 2008). Los impactos de las intervenciones humanas aceleran, reversan o impiden el curso de las tendencias naturales de cambio, y en numerosos litorales del mundo son actualmente los controles principales de evolución (Figura 2). La infraestructura física (edificaciones, canales, carreteras, puertos, presas, entre otras.), los dragados y la extracción intensiva de materiales y fluidos (rocas, arenas, petróleo, agua y gases) han modificado drásticamente la hidrodinámica costera y aumentado las condiciones de riesgo e inestabilidad. Como resultado, en muchos litorales se han inducido reducciones drásticas en la disponibilidad de sedimentos (balances de sedimentos negativos, Figura 2), sin los cuales las pla-

yas, dunas, pantanos y zonas aledañas no pueden existir y sostenerse, y los acantilados quedan totalmente desprotegidos de las acciones del oleaje; también se han generado hundimientos de terrenos (en algunos casos de hasta 7 m.) que equivalen, en la

práctica, a aumentar las magnitudes y velocidades de ascenso del nivel del mar (U.S. Environmental Protection Agency, 1987; Finkl Jr., 1994; Viles y Spencer, 1995; Morton y Purcel, 2001; Morton et al., 2004). La historia y evolución de las franjas litorales depende en gran medida de lo que sucede en las cuencas de drenaje costeras que aportan los sedimentos necesarios para su permanencia. Por lo tanto, los problemas de las playas, por ejemplo, pueden generarse muy lejos de su ubicación actual, y tienen que ver en muchos casos con la disminución de aportes arenosos al mar producidos por presas, proyectos de irrigación, extracción de agua, minería de arenas (Figura 2), entre otros.

La complejidad de los procesos costeros hace muy difícil la predicción detallada de los efectos del ascenso del nivel del mar, sobre todo si se considera que es sólo uno de muchos factores en juego (Figura 2) y

Los impactos de las intervenciones humanas aceleran, reversan o impiden el curso de las tendencias naturales de cambio, y en numerosos litorales del mundo son actualmente los controles principales de evolución.

Cada costa tiene su propia historia y es necesario un conocimiento muy profundo de los factores en juego para predecir en detalle su evolución futura.

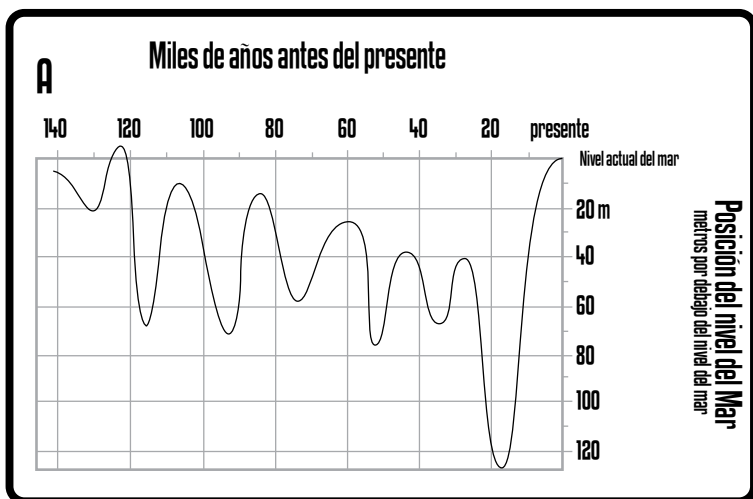
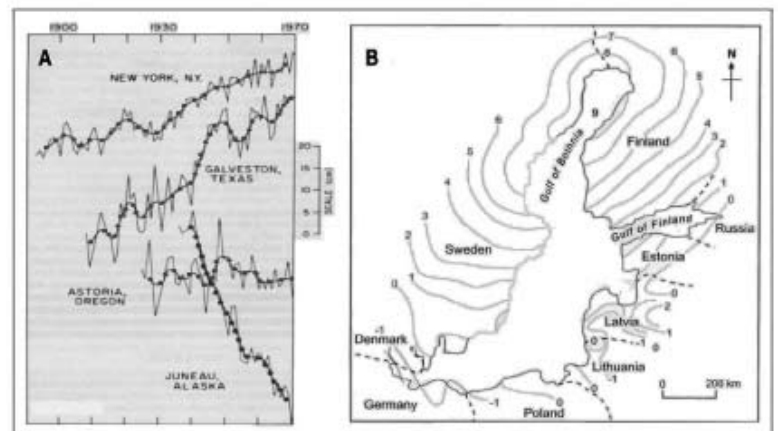


Figura 4. En los últimos 140.000 años el nivel global del mar ha oscilado al menos siete veces, como respuesta a cambios climáticos importantes. Modificada de Pinter, 1997.



la creciente importancia de las intervenciones antrópicas sobre la hidrodinámica y balances de sedimentos litorales. De hecho, en algunas regiones de latitudes altas (Alaska, Escandinavia), la fusión de los glaciares y la consecuente disminución de peso sobre el continente activan el llamado “rebote isostático” de la corteza (isostacia glacial, hidroisostacia) y el levantamiento de las zonas costeras, a velocidades mayores que el ascenso el nivel del mar (Figura 5). En estas zonas, el nivel relativo del mar con respecto al continente desciende (Figura 2) y la franja litoral emergida tenderá a ampliarse, no a inundarse. En el fondo, lo que interesa en la práctica son los aumentos y descensos relativos entre los niveles del mar y la tierra. Cada costa tiene su propia historia y es necesario un conocimiento muy profundo de los factores en juego para predecir en detalle su evolución futura.

Introducción a los posibles impactos del ascenso del nivel del mar sobre los litorales colombianos

Las evaluaciones sobre los efectos del ascenso del nivel del mar se realizan considerando, en primera aproximación, los elementos fisiográficos y geológicos principales de las zonas costeras, específicamente sus pendientes topográficas y la resistencia de los materiales a las acciones de los oleajes y las mareas (National Research Council, 1987; Euroision, 2008; Ideam, 2008; Figura 6). Si se considera el caso más simple en el cual el nivel de la tierra permanece constante, el desplazamiento del límite tierra-mar (línea de costa) dependerá del aumento neto del nivel del mar: en zonas con pendientes fuertes y/o materiales resistentes, el mar se desplazará relativamente poco hacia el continente (izquierda, Figura 6); en zonas bajas como las deltáicas y/o con materiales poco resistentes, el mar avanzará significativamente sobre las playas y acantilados (derecha, Figura 6), erosionando y/o inundando la franja litoral.

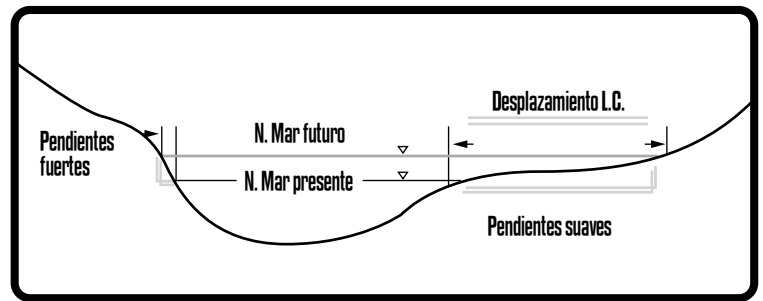


Figura 6. Concepto básico para visualizar cualitativamente el avance futuro del mar (desplazamiento de la línea de costa (LC)) sobre litorales con diferentes pendientes topográficas. Modificado de Kana et al., 1984.

La aplicación del concepto anterior a las costas del país, constituidas en su mayoría por áreas deltáicas y otras zonas de relieve bajo y/o con rocas poco resistentes (figuras 7 y 8), certifica a primera vista que el aumento del nivel del mar afectará extensas zonas litorales, incluidos los archipiélagos coralinos de San Andrés y Providencia, Islas del Rosario y San Bernardo, que en buena parte están conformados por terrenos ubicados a muy poca altura sobre el nivel del mar actual.

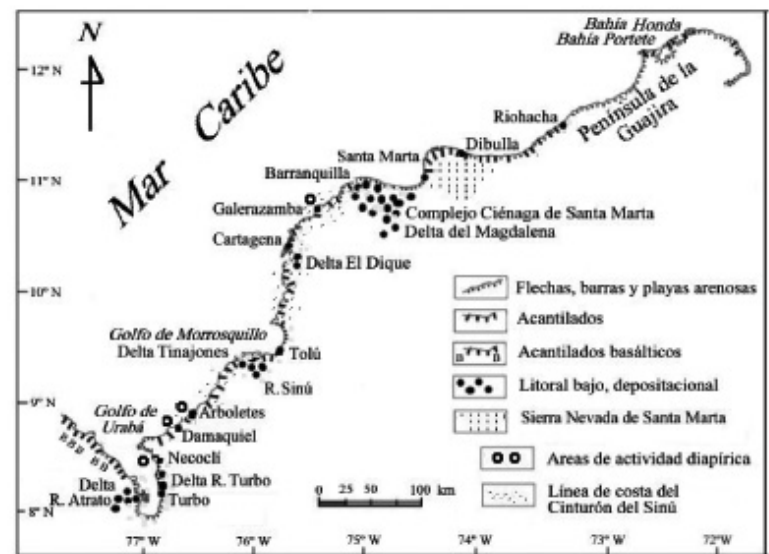


Figura 7. Tipos básicos de litorales de la Costa Caribe. El litoral Caribe está definido, en buena parte, sobre áreas con flechas, barras, playas y sectores depositacionales (deltas de los ríos Ranchería, Magdalena, Dique, Sinú, Atrato y otros menores en el Golfo de Urabá), todos fácilmente erosionables e inundables. La Sierra Nevada de Santa Marta, la montaña costera más alta del mundo (5575msnm, Pico Bolívar) representa el sector que será probablemente menos afectado por el ascenso del nivel del mar. La costa del Caribe sur está conformada por rocas con resistencias relativas bajas a la erosión (Cinturón del Sinú) y afectada por fenómenos como el diapirismo-volcanismo de lodos, asociado en muchos casos a hundimientos y levantamientos del terreno.



Figura 8. Tipos básicos de litorales de la Costa Pacífica colombiana. Exceptuando la costa rocosa del Baudó y otros sectores rocosos de poca extensión, el litoral Pacífico está dominado por deltas y depósitos de ríos (depósitos fluvio-deltaicos holocenos) formados recientemente, desde hace unos 6000 años. Estas zonas tienen relieves muy bajos, son fácilmente inundables y están constituidas por sedimentos (arenas y lodos) no consolidados, fácilmente erosionables.

En los sectores deltaicos (Figura 9), la migración del mar hacia las zonas interiores inducirá fuertes cambios morfológicos, relacionados con factores como: a) la erosión/inundación y migración de playas y dunas; b) la apertura/cierre y/o migración de desembocaduras y, c) la inundación permanente de zonas como los pantanos de manglares y los bosques adyacentes de agua dulce. Por otra parte, al alcanzar niveles mayores debi-

do al aumento del nivel del mar, la penetración "tierra adentro" de las aguas saladas y salobres de la marea aumentará progresivamente, salinizando acuíferos y suelos que en la actualidad se ubican por fuera de las influencias de aguas salinas o salobres. Por la misma razón, la marea será probablemente más efectiva en "taponar" periódicamente el flujo de los ríos hacia el mar (elevación del nivel de base) e inducirá aumentos significativos en los niveles fluviales, aumentando la recurrencia de inundaciones y la extensión de las áreas inundables en los cursos bajos y medios

En términos geológicos, el avance continuado del mar (transgresión marina) no implica necesariamente la destrucción de los ambientes litorales.

de los ríos. En esas circunstancias, es de esperar también el ascenso de los niveles freáticos y los correspondientes problemas sobre drenajes naturales y de aguas negras, y construcciones y actividades como la agricultura y acuicultura.

En términos geológicos, el avance continuado del mar (transgresión marina) no implica necesariamente la destrucción de los ambientes litorales. En los casos en que haya grandes áreas de bajo relieve, los conjuntos de playas-dunas-canales-planos intermareales-pantanos de manglares y pantanos de agua dulce migrarían progresivamente hacia tierra, seguramente con modificaciones importantes, pero sin destruirse, al menos totalmente (figuras 9, 10, 11B). En el otro extremo, cuando la cercanía del relieve costero impida la migración hacia tierra de las playas-dunas y lagunas, el resultado del ascenso del nivel del mar será muy probablemente la pérdida total de los terrenos litorales bajos (Figura 9C).

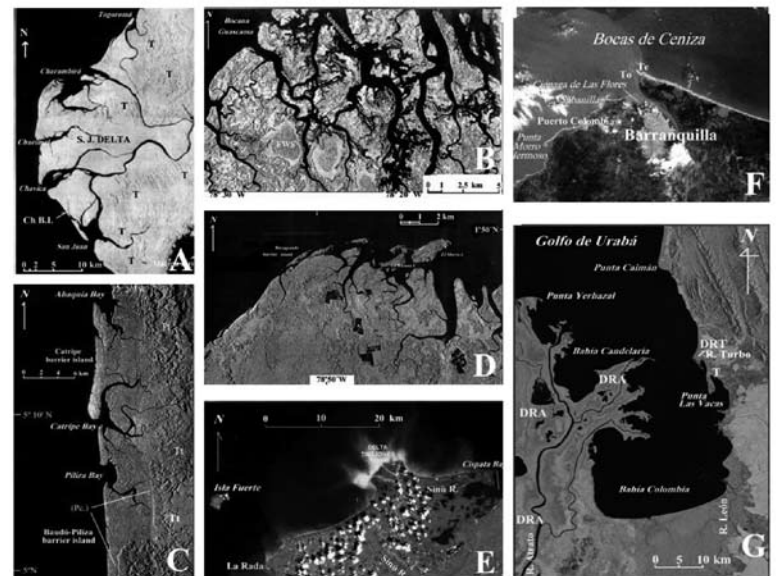
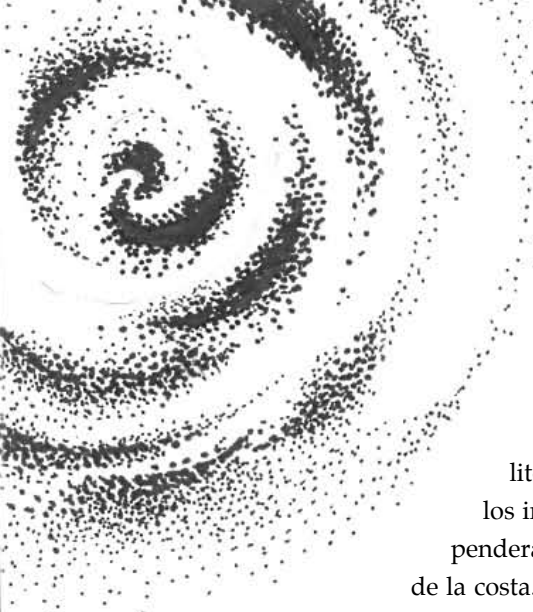


Figura 9. Áreas deltaicas de Colombia. En la costa Pacífica: A) Delta del río San Juan. B) Sector oeste del delta del Río Patía. C) Franja deltaica entre Cabo Corrientes y el delta del San Juan. En la Caribe: E) Delta del río Sinú; F) Delta del río Magdalena; G) Delta del río Atrato. Todas estas áreas se caracterizan por su poca altura sobre el nivel del mar actual y por estar constituidas principalmente por sedimentos (arenas y lodos) no consolidados y fácilmente erosionables.

El ascenso del nivel del mar, si no es contrarrestado por grandes cantidades de aportes de sedimentos o por levantamientos costeros, ocasionará el retroceso generalizados de los contornos deltaicos. Sin embargo, dado que hay amplios espacios con alturas menores a un metro y pendientes muy suaves, los diferentes ecosistemas podrían migrar hacia tierra, hasta donde la elevación de los terrenos más internos lo permita; las playas-dunas, manglares y pantanos de agua dulce no serán necesariamente destruidos, al menos en su totalidad. La franja litoral entre Cabo Corrientes y el delta del San Juan (C) tiene sólo seis Km. de amplitud y muy baja altura máxima sobre el nivel del mar actual (1 m., aproximadamente); en este sector, los pantanos de manglares y aguas dulces cuentan con poco espacio para migrar hacia tierra por lo cual su destrucción es altamente probable.



Aún a este primer nivel de generalización, el cálculo de las áreas afectadas requiere contar con cartas topográficas muy detalladas sobre la franja costera, no disponible para la mayoría de las franjas litorales del país. Obviamente, los impactos socioeconómicos dependerán del grado de intervención de la costa. A corto y mediano plazo serán menores en zonas despobladas sin o con aprovechamientos menores, pero serán críticos en

sectores urbanos con infraestructura desarrollada. Tumaco, Turbo y Cartagena (“rodeada” por cuerpos de agua (el Mar Caribe, la Bahía y la Ciénaga de Tesca)) plantean problemas de dimensiones mayores.

El estudio de los efectos de los sismos recientes permite precisar algunos puntos sobre las consecuencias del ascenso del nivel del mar en nuestras costas deltaicas. Terremotos con epicentros mar afuera como los de 1906, 1979 y 1992, ocasionaron numerosos hundimientos súbitos de terrenos (subsistencia) y licuefacción de suelos en muchos áreas de la Costa Pacífica, incluyendo las zonas de Tumaco, Guapi y Bahía Solano, entre muchas otras. (Herd et al., 1979; Page y James, 1981; Gómez, 1986; Vernet et al., 1992; Correa y González, 2002; Invemar, 2003; Correa, 2005). Estos hundimientos equivalen, en última instancia, a ascensos relativos del nivel del mar de hasta 1.5 m., que tuvieron por efectos el aumento de las velocidades de erosión de las playas y cambios drásticos en las profundidades de las desembocaduras fluviales. En los deltas de los ríos San Juan y Patía, la erosión continuada de las playas debida a la subsistencia fue acelerada aún más por las anomalías positivas del nivel del mar (aumentos temporales de 20-30 cm.) asociadas a El Niño (1978-1979). El resultado final fue la invasión parcial por el mar y la ruptura definitiva de las

extensas playas de El Choncho (delta del San Juan; Figura 10) y de la Isla San Juan de la Costa, en el delta del Patía (González y Correa, 2001; Correa y Restrepo, 2002; Morton et al., 2002). Evidencias de la ocurrencia de sismos similares en los últimos 1.000 años nos indican que éstos son recurrentes y que muy probablemente se repetirán en el futuro (Ideam, 2001; González et al., 2002). Cabe recordar que los sismos de 1906 y 1979 causaron alrededor de 2.500 víctimas fatales en las costas de Cauca y Nariño y que niveles marinos más altos

En el litoral Caribe, los ascensos del nivel del mar (“mares de leva”) y los coletazos de las tormentas tropicales están generando fuertes eventos erosivos (...)

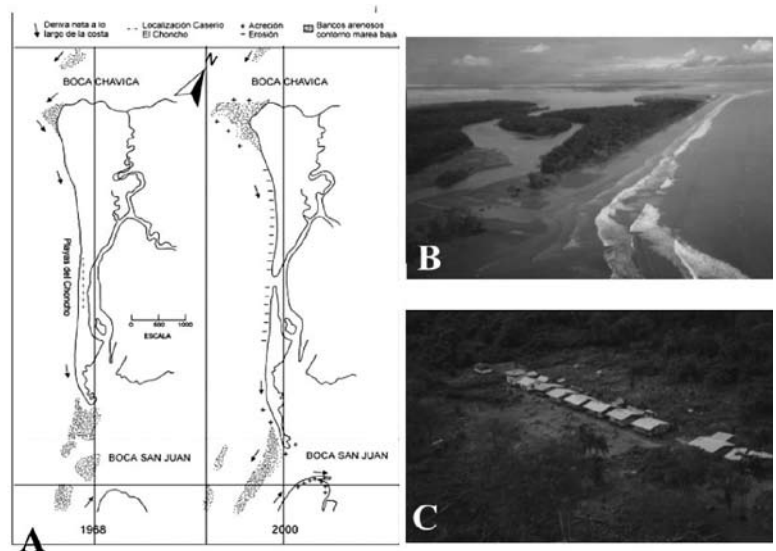


Figura 10. Cambios morfológicos en la Isla El Choncho, delta del río San Juan. A) Esquema que muestra la evolución de la isla (vista en planta), ubicada en el extremo suroeste del delta (Ch.B.I, Figura 9A). Entre los años 1968 y 2000, la longitud de la isla aumentó aproximadamente 1.5 Km. hacia el sur, debido al transporte neto de sedimentos en esa dirección. Sin embargo, la isla se rompió en su sector central (B) debido, entre otros factores, a hundimientos (20 cm.) generados por el terremoto de noviembre 19 de 1991 y a las anomalías positivas del nivel del mar (20 cm.) asociadas a El Niño, 1997-1998. La ruptura de la isla obligó a la relocalización del caserío El Choncho sobre terrenos internos del delta. La relocalización de los asentamientos humanos e infraestructura es una de las respuestas posibles al ascenso del nivel del mar, sobre todo en sectores donde hay espacios amplios para ocupar. Modificada de Correa y González, 2000.

aumentarán con toda seguridad los riesgos asociados a la ocurrencia de maremotos (Ramírez, 1970; Ramírez y Goberna, 1980; Meyer y Velásquez, 1992; Ideam, 2001; Invemar, 2003).

En el litoral Caribe, los ascensos del nivel del mar (“mares de leva”) y los coletazos de las tormentas tropicales están generando fuertes eventos erosivos, demostrando que eventos climáticos que causan elevaciones del nivel del mar (aún de corta duración) como El Niño y las tormentas también deben considerarse en las evaluaciones sobre las condiciones futuras de nuestras costas. (Invemar, 2003; Ideam, 2001, 2008). En consecuencia, los aumentos en las frecuencias de ocurrencia de este tipo de eventos



(muy posibles, según algunas evaluaciones) podrían ser determinantes en los impactos del Cambio Climático Global.

En el otro extremo de morfología costera, las consecuencias de la elevación del nivel del mar sobre litorales con relieves cercanos a la línea de costa (o que se sumergen directamente al mar) dependerán en buena medida de las resistencias de las rocas a los oleajes y a los procesos de erosión subárea (Figura 11). En última instancia, la elevación del nivel del mar pondrá al alcance de las olas, zonas de los acantilados no golpeadas actualmente, aumentando las posibilidades de movimientos de masa como deslizamientos, flujos, caídas de roca, entre otros. En estos litorales, las playas delgadas desaparecerán muy probablemente y el avance del mar será más o menos contenido dependiendo del grado de alteración física y química de las rocas y de la intensidad de fracturamiento, entre otros parámetros geotécnicos (figuras 11,12). La erosión del litoral rocoso de la Sierra Nevada de Santa Marta, por ejemplo, compuesto principalmente por rocas duras (gneisses, granitos, esquistos) será lenta y/o

despreciable en muchos lugares; ídem para los litorales basálticos de la Serranía del Baudó. Por el contrario, las velocidades de erosión y avance del mar sobre el relieve costero del Caribe Sur (constituido principalmente por lodolitas y arcillolitas alteradas químicamente y fracturadas) serán probablemente más altas que las actuales. En estas zonas, el no manejo o manejo inadecuado de las aguas lluvias y residuales ha sido uno de los factores principales del retroceso de las terrazas y acantilados: las velocidades mayores de erosión coinciden en muchos casos con los sectores más intervenidos.

El litoral de Antioquia y Córdoba, sujeto históricamente a una erosión intensa y generalizada (velocidades del orden de los m/año en muchos sectores) es un caso complejo en el cual los cambios del paisaje parecen estar asociados a efectos del diapirismo-volcanismo de lodos y de fallas geológicas activas que muy probablemente ocasionan hundimientos y/o levantamientos de terrenos (Ramírez, 1959, 1969; Briceño y Vernet, 1982; Page, 1984, 1986; Ingeominas, 1998a; Invemar, 2003; Correa y Vernet, 2004; Correa, 2005; Rangel y Posada, 2006; Correa et al., 2008). La información disponible (Figura 13) sobre cambios históricos del nivel del mar en el área sugiere ascensos entre 15-50 cm en los últi-

mos 100 años, suficientes para promover el retroceso rápido de los sectores rocosos débiles y zonas de playas adyacentes. En otras palabras, esta zona (de la cual también se han extraído durante al menos 70 años ingentes cantidades de materiales de playa, afectando sus balances de sedimentos) podría estar sufriendo ya las consecuencias del aumento del nivel del mar.

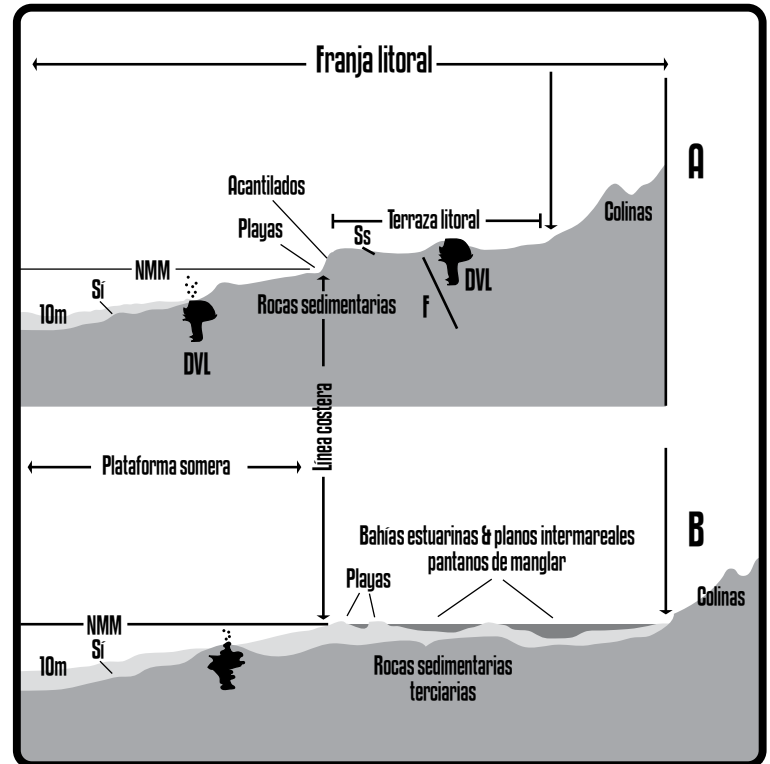


Figura 11. Esquema de tipos extremos de franjas litorales. El litoral A (típico de sectores de Antioquia y Córdoba) se caracteriza por relieves de superficies planas (terrazas) ubicadas a varios metros por encima del nivel del mar actual. A lo largo de la línea de costa, el mar erosiona estas terrazas formando los acantilados (escarpes verticales a subverticales), en algunos sectores con playas delgadas al frente. B esquematiza un litoral de relieve bajo, común en zonas deltaicas, en las cuales las lagunas litorales y los pantanos de manglares se ubican detrás de playas y barreras arenosas. En las costas del Caribe sur de Colombia, Córdoba, el diapirismo-volcanismo de lodos origina hundimientos y levantamientos locales, tanto de terrenos emergidos como de los fondos de la plataforma marina.

En última instancia, la elevación del nivel del mar pondrá al alcance de las olas, zonas de los acantilados no golpeadas actualmente, aumentando las posibilidades de movimientos de masa como deslizamientos, flujos y caídas de roca, entre otros.

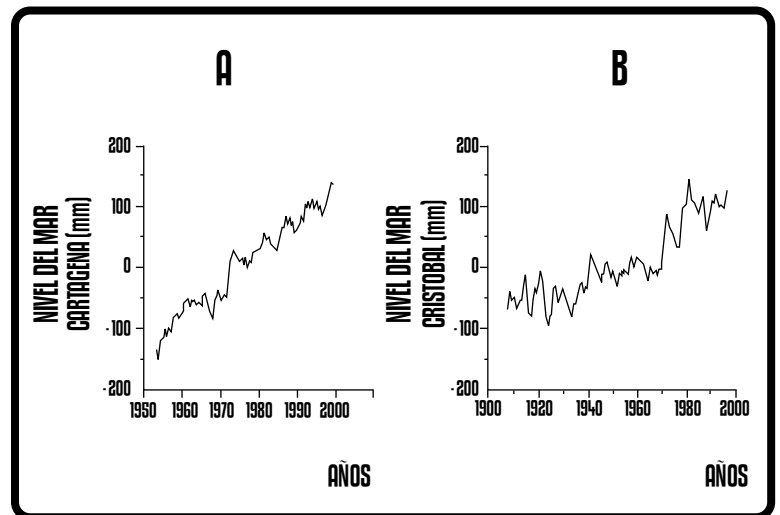
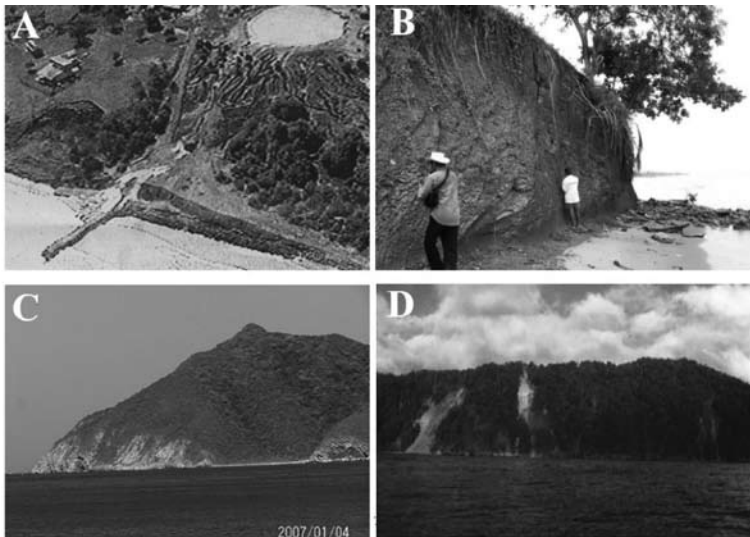


Figura 12. Litorales acantilados. A) Volcán de lodos de Arboletes: la línea de costa se define sobre materiales lodosos, prácticamente sin ninguna resistencia al embate de las olas. B) Acantilados verticales labrados en arcillolitas alteradas y fracturadas con resistencia baja a media al oleaje. C) Acantilados de la Sierra Nevada de Santa Marta, labrados sobre rocas ígneas y metamórficas, resistentes a la erosión marina. D) Acantilados de rocas basálticas de la Serranía de Baudó; los derrumbes se asocian a zonas fracturadas y a la destrucción del suelo y caídas de árboles ocasionadas por vendavales.

Figura 13. Gráfico de mareógrafos que muestran los cambios del nivel del mar en el Caribe sur. A) Entre 1954 y 2002, el nivel relativo del mar ascendió aproximadamente 30 cm en el sector de Cartagena B) Entre 1919 y 2002, el nivel relativo del mar ascendió aproximadamente 25 cm en el área de Cristóbal (Panamá). Este tipo de gráficos sugiere que la erosión generalizada de las playas y acantilados del Caribe sur colombiano podría estar relacionada, al menos en parte, con los ascensos históricos del nivel del mar en el área. Modificado de Invemar, 2003.

A modo de conclusiones

Las generalidades presentadas son sólo uno de los numerosos aspectos a considerar sobre las implicaciones futuras del ascenso del nivel del mar. Debido a la gran variedad de tipos de costas y de los factores que controlan su evolución, no hay fórmulas “mágicas” universalmente aplicables para evaluar y proyectar hacia el futuro los cambios en el paisaje costero y los efectos sobre los desarrollos e infraestructura: cada tipo de costa es un caso particular en función de su historia geológica, características climáticas y oceanográficas, e influencias de las intervenciones antrópicas. Puesto que la evolución costera depende también de lo que suceda en las regiones aledañas (erosionabilidad de las cuencas, aportes de aguas, sedimentos, entre otros), las evaluaciones detalladas deberán considerar los posibles efectos del Cambio Climático Global en las cuencas de drenaje y relieves continentales adyacentes a las costas.

A pesar de que el ascenso del nivel del mar a mediano plazo pueda parecer pequeño (10-30 cm.), hay consensos generales acerca de que, inclusive, en magnitudes tan pequeñas, sus efectos serán importantes, sobre todo en relación con tres aspectos principales (National Research Council, 1987):

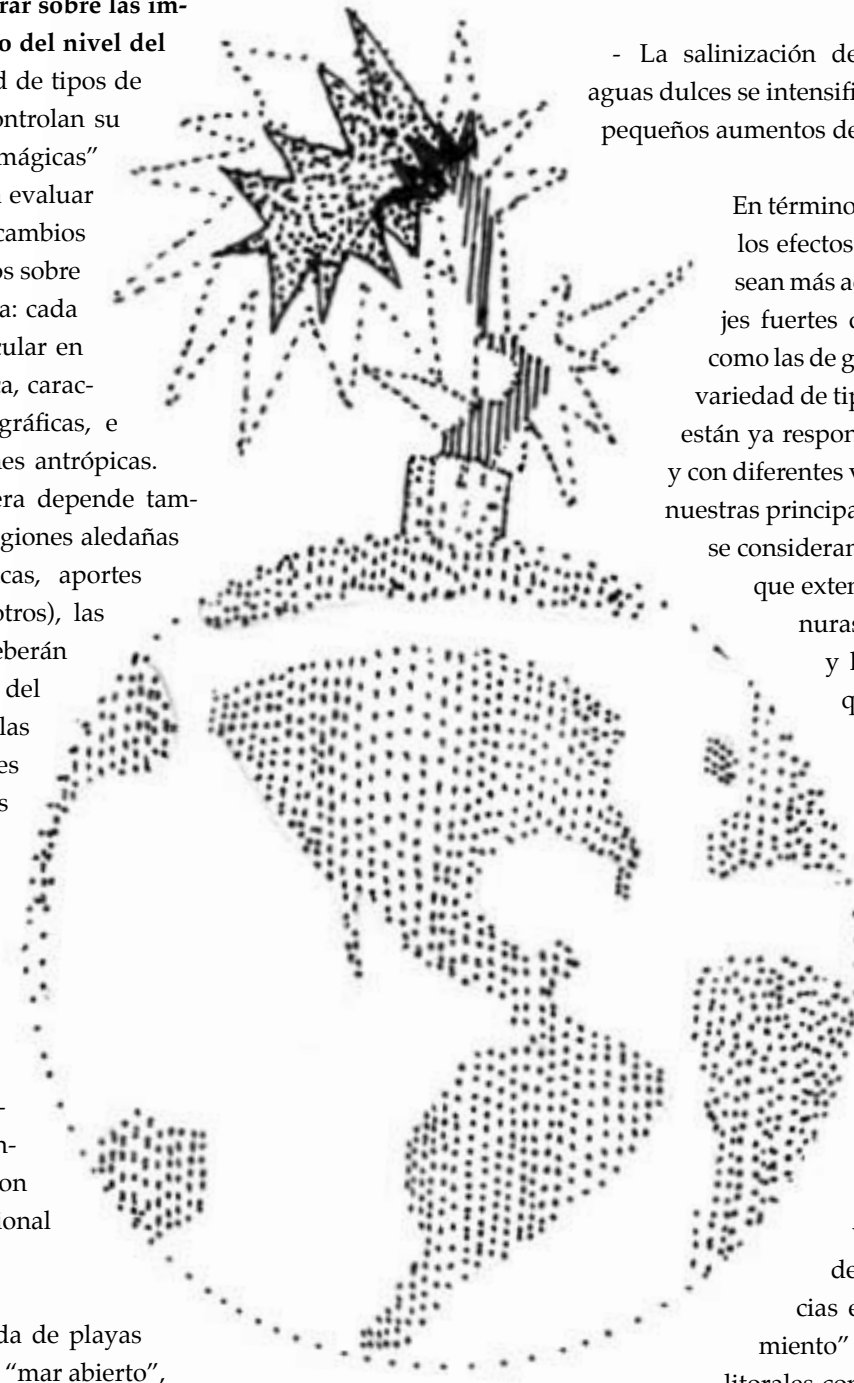
- La erosión generalizada de playas arenosas expuestas a oleajes de “mar abierto”, para las cuales se estima tentativamente (Ley de Brunn) que un aumento en el nivel del mar de 1 cm induciría una erosión de 1 m. o más.

- La penetración de la cuña de aguas salinas a través de los ríos y estuarios de costas con rangos de mareas importantes (nuestra Costa Pacífica, por ejemplo) podría ser del orden de 1 Km. por cada 10 cm. de ascenso del nivel del mar.

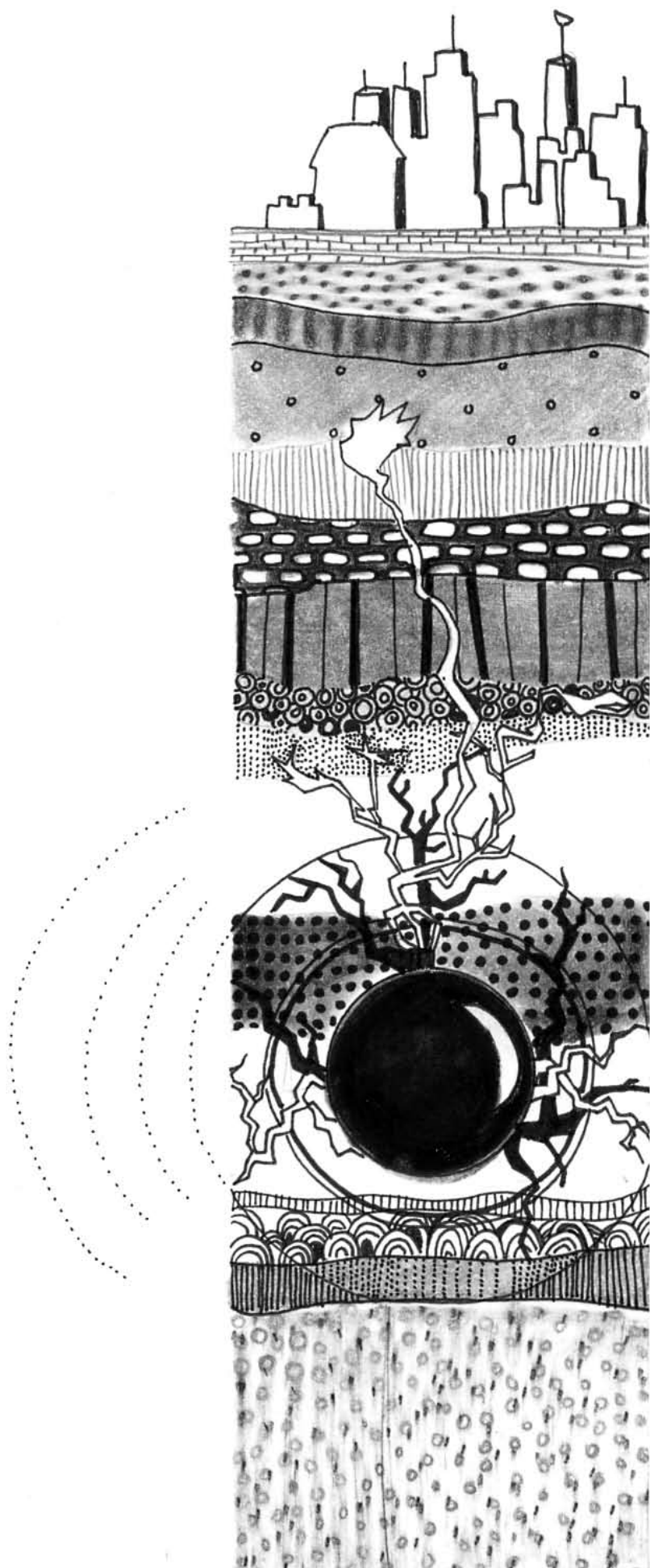
Lo anterior impactaría fuertemente la distribución y extensión de los ecosistemas en las zonas bajas y disminuiría la disponibilidad de aguas dulces en las franjas litorales.

- La salinización de las fuentes subterráneas de aguas dulces se intensificará fuertemente, inclusive con pequeños aumentos del nivel del mar.

En términos generales, es de esperarse que los efectos del aumento del nivel del mar sean más acusados en costas sujetas a oleajes fuertes que en costas semi-protegidas, como las de golfos y bahías. El país tiene gran variedad de tipos de costa que responderán (o están ya respondiendo) de diferentes maneras y con diferentes velocidades. Obviamente, todas nuestras principales ciudades en ambos litorales se consideran como sectores críticos, al igual que extensos sectores bajos como las llanuras fluviales costeras del Pacífico y los golfos de Urabá y Morrosquillo, y la barra de Salamanca-Ciénaga de Santa Marta, en el Caribe. A medida que el conocimiento científico sobre estas zonas aumente, tendremos los elementos para decidir como se enfrentarán más racionalmente (con visiones de largo plazo) problemas como los descritos (Invemar, 2003; Ideam, 2008). Al respecto, las experiencias a nivel mundial están mostrando una gran variedad de opciones, válidas de acuerdo con las circunstancias específicas: desde el “enfrentamiento” y los intentos de estabilizar los litorales con obras ingenieriles (espolones, rompeolas, muros de contención, entre otras), costosas y a menudo con fuertes impactos colaterales, hasta la adaptación gradual a los cambios, o la relocalización a prudente distancia de la línea de costa, evitando “medir fuerzas” con un mar en ascenso. Las implicaciones socioeconómicas de las decisiones presentes y futuras serán de la mayor importancia para el país.



A pesar de que el ascenso del nivel del mar a mediano plazo pueda parecer pequeño (10-30 cm.), hay consensos generales acerca de que, inclusive, en magnitudes tan pequeñas, sus efectos serán importantes (...)



Briceño, L. A. & Vernet, G., 1992. Manifestaciones del diapirismo de lodo en el margen colombiano del Caribe. *Geofísica colombiana*, 1:21-30.

Bird, E. C. F., 1985. *Coastline Changes: A Global Review*. 219p.

-----, 1993. *Submerging Coasts: The Effects of a Rising Sea Level on Coastal Environments*. John Wiley & Sons, New York. 150p

Correa, I. D. & González, J. L., 2000. Coastal erosion and village relocation; a Colombian case study. *Ocean & Coastal Management*, 43:51-64.

Correa, I. D.; González, J.L. & Siegert, E., 2002. Erosión marina en el Litoral Pacífico: introducción a sus causas y consecuencias socioeconómicas –el caso del caserío El Choncho, delta del Río San Juan. En: Correa, I., Restrepo, J. D. (eds.) *Geología y Oceanografía del Delta del Río San Juan, Litoral Pacífico Colombiano*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, Medellín: 113-132.

Correa, I. D. & J. D. Restrepo (eds.), 2002. *Geología y Oceanografía del Delta del Río San Juan, Litoral Pacífico colombiano*. Fondo Editorial Universidad Eafit. Medellín. 221p.

Correa I. D. y Vernet, G., 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Turbo-Arboletes) Costa Caribe Colombiana. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, V. 33, 5-26. Santa Marta.

Correa I. D., 2005. Erosión litoral en Colombia. En: Michel Hermelin (ed.): *Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004*. Fondo Editorial Universidad EAFIT (Primera edición, julio 2005), 213-224. Medellín

Correa, I. D., 2006. El Litoral Antioqueño. En: Michel Hermelin (ed.) *Geografía de Antioquia*. Fondo Editorial Universidad EAFIT. 137-151.

Correa, I.D., Acosta, S. y Bedoya, G., 2007. *Análisis de las Causas y Monitoreo de la Erosión Litoral en el Departamento de Córdoba*. Convenio CVS-Universidad EAFIT. Fondo Editorial Universidad EAFIT. 125p.

Correa, I.D. y Morton, R.A.; 2008. *Coasts of Colombia*. En: <http://www.coastal.er.usgs.gov/coasts-colombia/> . Consultado enero 15 de 2008.

EuroSION, 2008. Portal Web del Proyecto Manejo sostenible de la erosión costera en Europa. En: <http://www.euroSION.org/>.

Ideam, 2001. Colombia Primera Comunicación nacional ante la

Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. Bogotá. 307p.

Ideam, 2008. El ascenso el nivel del mar: una realidad. En: <http://ideam.gov.co/biblio/paginaabierta/pZONA%20COSTERA.pdf>. Consultado el 20 de enero de 2008.

Invemar; 2003. Programa Holandés de Asistencia para Estudios en Cambio Climático: Colombia. Resumen Ejecutivo. Santa Marta. Invemar, 172 páginas. En: Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debidos a un cambio en el nivel del mar en la zona costera colombiana (Caribe continental, caribe insular y Pacífica) y medidas para su adaptación. VII tomos, Resumen ejecutivo y CD-Atlas digital. Programa de Investigación para la gestión marina y de la zona costera – GEZ. Santa Marta. Colombia.

Duque-Caro, H., 1984. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecimiento del terreno Sinú - San Jacinto en el noroccidente de Colombia. Bol. Geológico Ingeominas, 27 (2): 1 - 29.

Finkl Jnr., C. (ed.), 1994 .Coastal Hazards: Perception, susceptibility and mitigation. The Coastal Education and Research Foundation (C.E.R.C.), Fort Lauderdale, FLA. 372p.

Gómez, H., 1986. Algunos aspectos neotectónicos hacia el suroeste del Litoral Pacífico colombiano. Revista CIAF, 11:281-289.

González, J. L. & Correa, I. D., 2001. Late Holocene evidence for co-seismic subsidence on the San Juan Delta, Pacific Coast of Colombia. Journal of Coastal Research 17 (2):459-467.

González, J. L.; Correa, I. D. & Aristizábal, O. C., 2002. Evidencias de subsidencia cosísmica en el Delta del San Juan. En: Correa, I. D. y Restrepo, J. D. (eds.) Geología y Oceanografía del Delta del Río San Juan, Litoral Pacífico Colombiano. Fondo editorial Universidad EAFIT. Medellín: 91-112.

Herd, D.G.; Leslie Y. T.; Meyer, H., Arango, J.L.; Person, W.J. & Mendoza, C., 1981. The Great, Tumaco, Colombia Earthquake of 12 December 1979. Science, 211:441-445.

Ingeominas, 1998a. Geomorfología y aspectos erosivos del Litoral Pacífico colombiano. Publ. Geológicas Especiales del Ingeominas, 21:1- 75.

Ingeominas, 1998b. Geomorfología y aspectos erosivos del Litoral Pacífico colombiano. Publ. Geológicas Especiales del Ingeominas, 21:76-111.

Invemar, 2004. Definición de la vulnerabilidad de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del

mar en la zona costera colombiana (Caribe continental, Caribe insular y Pacífico) y medidas para su adaptación, Informe Técnico No. 2: Caracterización e inventario: 40-44.

Ideam, 2003. Programa Integral y Multidisciplinario para el Estudio sobre el fenómeno El Niño – Comité Técnico Nacional para el Estudio del Fenómeno El Niño. Publ. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Medio Ambientales. Bogotá. 67p.

Kana, T.W., J.Michel, M.O. Hayes, J.R. Jensen, 1984. The physical impacts of sea-level rise in the area of Charleston, S.C. en: Greenhouse Effect and Sea-level rise, M.C. Barth and J.G.Titus eds. New York, Van Nostrand Reinhold.

Meyer, H. & Velásquez, A., 1992. Aproximación al riesgo por tsunami en la costa del Pacífico de Colombia. Publ. Ocasionales del O.S.S.O., 2. 43p.

Morton, R. A., 1977. Historical shoreline changes and their causes, Texas Gulf Shoreline. Geol. Circ. 77-6, Bureau of Econ. Geology, The Univ. of Texas at Austin. 15p.

Morton, R. A. & Purcell, N.A., 2001. Wetland subsidence, fault reactivation, and hydrocarbon production in the U.S Gulf Coast Region., U.S.G.S. Fact sheet FS-091-01. 4p.

Morton, R. A.; González, J. L.; Correa, I. D.; Salazar, O.; Tabárez, N. & López, G. I., 2002. Causas y efectos de eventos atípicos de sobrelavado en la Costa Pacífica de Colombia –los eventos de sobrelavado de mayo a agosto de 1997 en la Isla el Choncho, Delta del Río San Juan. En: Correa, I. D. y Restrepo, J. D. (eds.) Geología y Oceanografía del Delta del Río San Juan, Litoral Pacífico colombiano. Fondo Editorial Universidad Eafit. Medellín: 133-150.

Morton, R. A.; Miller, T. & Moore, L. J., 2004. National Assessment Of Shoreline Change: Part 1 Historical Shoreline Changes and Associated Coastal Land Loss Along the U.S. Gulf of México. U. S. G. S Open-File Report 2004-1043. 43p

Musselink & Huges, 2003. Introduction to Coastal Processes&Geomorphology. Arnold, Londres. 354p.

National Research Council, 1987. Responding to changes in sea level – engineering implications. Comitee on Engineering Implications of Changes in Relative sea level. National Academy Press. 148p.

Page, W. y James, M., 1981. Tectonic subsidence and evidence for the recurrence of large magnitude earthquakes near Bahía Solano, Colombia. Memorias III Congreso Colombiano de Geología: 14-20.

Page, W., 1986. Geología sísmica y sismicidad del Noroeste de

Colombia. ISA-INTEGRAL-Woodward -Clyde Consultants. Versión española por Rodrigo Alvarez, Ingeniería e Hidrosistemas (I.E.H.) Ltda. Bogotá. 156p.

Paris, G.; Machette, M.; Dart, R. L. & Haller, K., 2000. Map and database of Quaternary faults and folds on Colombia and its offshore regions. U.S.G.S. Open-File Report 00-284.

Pinter, N., 1986. Exercises in Active Tectonics. Prentice Hall, INC. 154p.

Rangel, N. y Posada, B. O., 2006. Geomorfología y Procesos erosivos en la Costa Norte del Departamento de Córdoba, Caribe colombiano (sector Paso Nuevo - Cristo Rey) Bol. Invest. Mar. Cost. INVEMAR, Santa Marta, 34: 101-119.

Ramírez, J.E., 1959. El Volcán de lodo de Galerazamba. Rev. de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. V 10 (41), 301-314.

-----, 1969. Los Diapiros del Mar caribe colombiano. Mem. I Congreso colombiano de Geología. Bogotá: 31 -39.

-----, 1970. El terremoto de Bahía Solano. Revista Universidad Javeriana, 70: 573-585.

Ramírez, J. E. & Goberna, J. R., 1980. Terremotos colombianos: noviembre 23 y diciembre 12 de 1979. Preliminary Report, Instituto Geofísico de los Andes Serie A: Sismología, 45: 5-95.

U.S. Environmental Protection Agency (E.P.A.), 1987. Saving Louisiana's coastal wetlands : the need for a long-term plan of action. Report of the Louisiana Wetland Protection Panel, Rep. No. EPA-230-02-87-026. 45p.

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

Viles, H. & Spencer, T., 1995. Coastal Problems. Edward Arnold (Ed.). 350p.

Williams, S. J; Dodd, K. & Gohn, K., 1995. Coasts in crisis. U. S. G. S. Circular 1075. 32 p.

IPCC – International Panel on Global Change. (2007). Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Synthesis Report: Summary for Policymakers (Valencia España). Consultado enero 7 de 2008, en : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spn.pdf. 24 pp

