

# *Sistema de información geográfica para el estudio de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba, Colombia:*

## Herramientas de diseño, implementación y uso

*Recibido para evaluación: 10 de Octubre de 2006*

*Aceptación: 13 de Diciembre de 2006*

*Recibido versión final: 19 de Diciembre de 2006*

*Artículo de reflexión que se inscribe en el marco de varios estudios sobre el litoral atlántico, desarrollados por la Universidad EAFIT con la CVS y Colciencias.*

**Natalia Hoyos**<sup>1</sup>

**Susana Acosta**<sup>2</sup>

**Iván D. Correa**<sup>3</sup>

### RESUMEN

El estudio y monitoreo de los factores que inciden en los procesos de erosión litoral requieren el uso de sistemas de información geográfica (SIG) que permitan integrar y analizar datos diversos. El objetivo de este proyecto fue diseñar e implementar un SIG para analizar los procesos erosivos que afectan el litoral del Departamento de Córdoba, Colombia. En este artículo presentamos algunas herramientas utilizadas en el diseño e implementación del SIG, así como una aplicación específica para el análisis del retroceso de la línea de costa. La aplicación "Geodatabase diagrammer" (ArcGISâ) se usó para documentar la estructura del SIG, semiautomatizando este proceso y generando un formato comprensible para los usuarios finales. Las herramientas de referenciación lineal y segmentación dinámica (ArcGISâ) se utilizaron para caracterizar la línea de costa de acuerdo con varios criterios, sin duplicarla o segmentarla de manera excesiva. El retroceso de la línea de costa entre 1938 y 2004 se analizó con la herramienta DSAS ("Digital shoreline analysis system", USGS). La distancia máxima entre ambas líneas se registró en Punta Arboletes (972 m). El máximo valor real es mayor (aproximadamente 1.5 km). Sin embargo, éste no fue registrado por ninguno de los transectos generados por esta aplicación.

**PALABRAS CLAVE:** SIG, geodatabase, referenciación lineal, erosión litoral, DSAS, Córdoba, Colombia.

### ABSTRACT

The study and monitoring of factors that cause shoreline erosion processes require the use of geographic information systems (GIS) to integrate and analyze data on different topics and with various formats. The scope of this project was to design and build a GIS for the study of erosion processes along the coastline of Córdoba Department, Colombia. In this article, we present some of the tools used for the SIG design and implementation, as well as a specific application for shoreline erosion analysis. The "Geodatabase diagrammer" tool (ArcGISâ) was used to document the geodatabase structure. The process is semiautomatic and delivers a comprehensive and friendly format for the end users. Linear referencing and dynamic segmentation tools (ArcGISâ) were used to characterize the coastline according to several criteria, without subdividing or duplicating it. Shoreline retreat between 1938 and 2004 was analyzed with DSAS ("Digital shoreline analysis system", USGS). Maximum distance between both shorelines was recorded by a Punta Arboletes transect (972 m). Real (on the ground) maximum distance however, was larger (around 1.5 km). Nevertheless it was not recorded by any of the DSAS generated transects.

**KEY WORDS:** GIS, geodatabase, linear referencing, coastal erosion, DSAS, Córdoba, Colombia.

**1. PhD. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Universidad EAFIT. Asistente de Investigación.**

**2. M.Sc. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Universidad EAFIT. Docente, Investigador, dirección técnica grupo SIG. sacosta@eafit.edu.co**

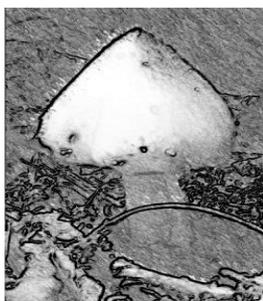
**3. PhD. Departamento de Geología, Universidad EAFIT. Director del Área de Ciencias del Mar.**

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de información geográfica (SIG) se han utilizado en numerosas aplicaciones relacionadas con el manejo de los recursos naturales y el ordenamiento territorial. Ejemplos de estudios recientes a nivel nacional incluyen la caracterización del estado de hábitats terrestres y marinos (Molina & Barros, 2005; Flórez & Etter, 2003; López-Victoria & Díaz, 2000), la zonificación de terrenos para el ordenamiento territorial (Botero et al., 2003), la caracterización de la erosión potencial de suelos (Hoyos, 2005; Montoya et al., 2005), los análisis de datos hidroclimatológicos (Vélez et al., 2002), y la distribución espacial de contaminantes (Santamaría, 2000).

En el caso específico de las zonas costeras, los SIG se han utilizado para el estudio de procesos erosivos y efectos de la construcción de obras de defensa y mitigación, como espolones y rompeolas (Anfuso & Martínez del Pozo, 2005) y también para los análisis de vulnerabilidad por inundación bajo distintos escenarios de aumento del nivel del mar, considerado como uno de los factores dentro del cambio climático global (Thumerer et al., 2000; El-Raey et al., 1999).

La aplicación que presentamos en este artículo se enmarca dentro de la primera categoría, y hace parte de los proyectos: “Análisis de las causas y monitoreo de la erosión litoral en el Departamento de Córdoba”, Universidad EAFIT - Corporación para el Desarrollo Sostenible de los Valles del Sinú y del San Jorge CVS (convenio de cooperación No. 30) y “Geomorfología de la zona costera (plataforma somera) del Departamento de Córdoba”, Universidad EAFIT - COLCIENCIAS (Programa Nacional de Ciencias Básicas, proyecto código 1216-05-16911). Estos estudios se formularon con el objetivo de evaluar la magnitud y posibles causas naturales y antrópicas de la erosión del litoral cordobés, proceso que durante las últimas seis décadas viene afectando de manera generalizada las áreas urbanas y rurales a lo largo de la línea de costa del departamento. Los objetivos específicos del componente SIG fueron: (1) Diseñar e implementar la base de datos geográficos, formal y estructurada, que describa las características sistémicas del territorio (entorno geográfico, ambiental y antrópico) relevantes al propósito del proyecto y gestión de la CVS, (2) integrar, procesar y evaluar espacialmente, de forma eficaz y eficiente, los datos geográficos requeridos para el desarrollo del estudio, con un enfoque sistémico (holístico-integrativo), (3) permitir la actualización periódica de la base de datos para el monitoreo de dichos procesos. A pesar de que la base de datos desarrollada no incluye de manera estricta todos los elementos que conforman un sistema de información geográfica (e.g. diferentes niveles de acceso para usuarios), nos referimos a ella como SIG debido a la familiaridad de este término.

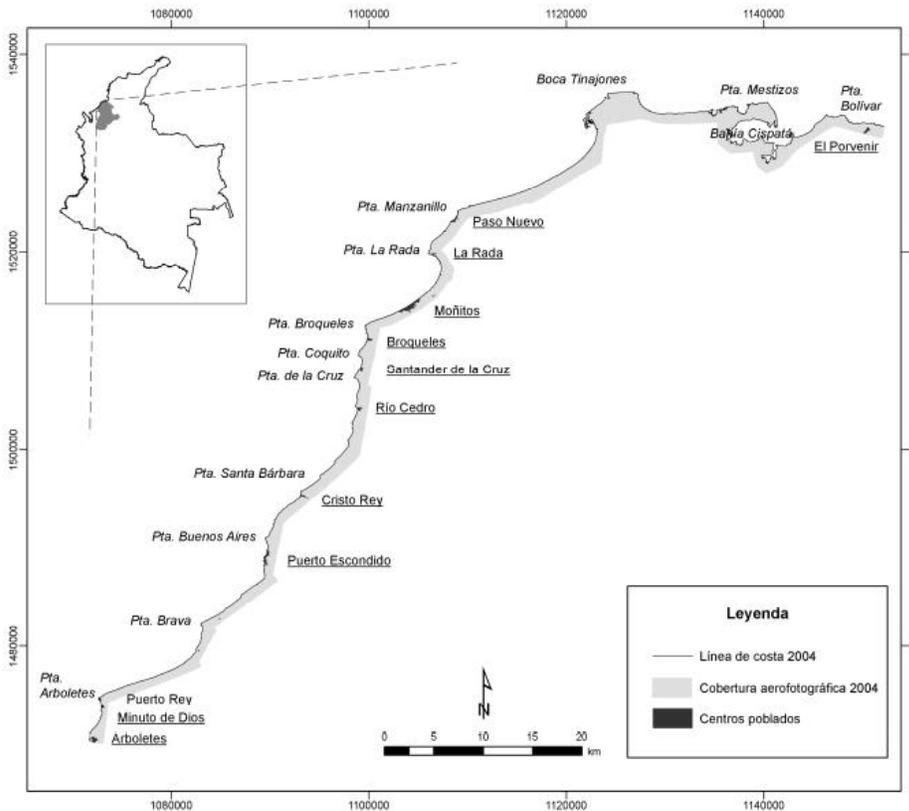


El objetivo de este artículo es presentar algunas de las herramientas utilizadas en el diseño e implementación del SIG, que consideramos de utilidad para aplicaciones similares. No se pretende realizar un análisis de las causas de la erosión litoral, sino mostrar las ventajas de dichas herramientas en los aspectos específicos de: (1) Documentación del SIG de manera eficiente y accesible para el usuario final; (2) caracterización de un mismo elemento geográfico utilizando criterios diferentes, sin duplicar o segmentar de manera excesiva dicho elemento, e.g. descripción de la geología y geomorfología de la línea de costa; (3) análisis multitemporal de la línea de costa.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Area de estudio

El contorno litoral del Departamento de Córdoba tiene una extensión aproximada de 124 km, entre los límites con el Departamento de Antioquia al sur, y con el Departamento de Sucre al norte. El área de estudio está definida por una franja paralela al contorno litoral, que se extiende aproximadamente 1 km hacia tierra adentro (franja litoral emergida), y hasta una profundidad de 10 metros mar adentro (plataforma marina somera) (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de la zona de estudio. La franja litoral emergida se extiende aproximadamente 1 km hacia tierra adentro. Proyección Transversa de Mercator; datum Observatorio Astronómico de Bogotá, origen Colombia Occidente (4°35'56.57"N y 77°04'51.30"W).

## 2.2. Datos fuente

Los datos fuente integrados en el SIG, así como sus características principales, se presentan en la Tabla 1.

Datos	Fuente primaria	Fuente SIG
<b>Línea de costa</b>		
Contorno litoral (líneas costa 2004, 1938)	Fotos aéreas <sup>1</sup>	Ortofotos <sup>2</sup>
Litología	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Geomorfología y rasgos geomorfológicos	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Carácter (erosional, acrecional, estable)	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Perfiles playa	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Muestras sedimentos	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Columnas estratigráficas	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Estructuras defensa	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
<b>Plataforma somera</b>		
Líneas geofísicas	Trabajo campo <sup>3</sup>	Capa formato dxf (Surfer)
Batimetría	Trabajo campo <sup>3</sup>	Capa formato dxf (Surfer)
Muestras sedimentos	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
Deriva litoral neta	Trabajo campo <sup>3</sup>	Coordenadas XY (GPS)
<b>Franja litoral</b>		
Cobertura vegetal/uso del suelo	Fotos aéreas 2004 <sup>1</sup> , trabajo campo <sup>3</sup>	Ortofotos <sup>2</sup>
Geología (unidades geológicas y estructuras)	Fotos aéreas 2004 <sup>1</sup> , trabajo campo <sup>3</sup> , mapas geológicos INGEOMINAS	Acetatos de fotointerpretación
Geomorfología y rasgos geomorfológicos	Fotos aéreas <sup>1</sup> , trabajo campo <sup>3</sup>	Acetatos de fotointerpretación
Cartografía base (hidrografía, vías, etc.)	Fotos aéreas <sup>1</sup>	Ortofotos <sup>2</sup>

**Tabla 1.** Datos integrados en el SIG y sus fuentes respectivas, agrupados por sector (línea de costa, plataforma somera y franja litoral). La fuente SIG se refiere al formato específico en el cual se incorporaron los datos en el SIG.

<sup>1</sup> Línea de costa 2004: Fotos aéreas escala 1:8.000, Diciembre 2004, Aeroestudios Ltda.

<sup>2</sup> Línea de costa 1938: Fotos aéreas escala 1:30.000, Junio 1938, IGAC.

<sup>3</sup> Ortorrectificación realizada por Aeroestudios Ltda. con base en puntos de control levantados en campo y en la cartografía existente.

<sup>4</sup> Universidad EAFIT (Área Ciencias del Mar) - CVS.

## 2.3. SIG

### 2.3.1. Estructura del SIG

La base de datos geográficos –espaciales se generó siguiendo la metodología y los aspectos (sintácticos y semánticos) formalmente establecidos para el desarrollo de bases de datos: Modelo conceptual, modelo lógico y modelo físico. Para definir su estructura, se utilizaron los siguientes criterios:

- Temática y naturaleza de los datos fuente: características espaciales, de estado y comportamiento.
- Asociaciones y reglas de integridad geográfica.
- Evaluación sistémica: Análisis integrado de la red de variables involucradas en el fenómeno bajo estudio.
- Mantenimiento de la base de datos y su integración con los demás sistemas institucionales (e.g. cartografía base y temática) de la CVS.
- Aplicación de estándares nacionales: Estándares de información geográfica para objetos geográficos y metadatos (INGEOMINAS, 2001; ICONTEC, 2000; ECOPELROL-ICP, 1998).

Para el modelo conceptual se definieron, en conjunto con todos los participantes del proyecto, los datos a integrar en el SIG y su representación geográfica. En el modelo lógico se estructuró la base de datos espaciales en grupos temáticos, se definieron los atributos de cada capa de datos y los dominios de valores, reglas de integridad espacial y los aspectos de generalización, composición, agregación, subtipos y multiplicidad entre clases, teniendo presente el criterio de consistencia y no-redundancia de datos. Éstos se implementaron (modelo físico), utilizando el software ArcInfo 9.1 y la estructura del modelo Geodatabase propuesto por ESRI®.

### 2.3.2. Documentación de la base de datos espaciales

La documentación de la base de datos espaciales, geodatabase en ArcGIS, se realizó utilizando la herramienta para diagramación de geodatabase “Geodatabase Diagrammer” (Nichols, 2005), descargable desde internet (<http://arcscripts.esri.com/>). Este comando que se incorpora y ejecuta desde ArcCatalog™, crea de forma semi-automática elementos gráficos en formato de Microsoft Office Visio que representan el esquema de la geodatabase. De esta manera se documenta de manera eficaz el contenido y detalle estructural de los objetos de la misma: clases, atributos, tablas, relaciones entre clases espaciales y entre clase y tabla.

### 2.3.3. Caracterización de la línea de costa

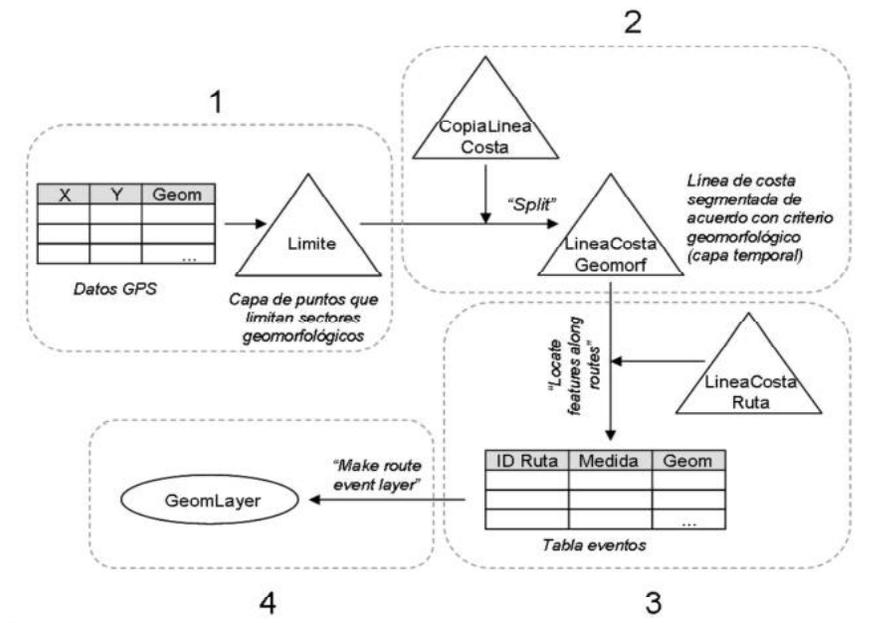
Al analizar los datos fuente relacionados con la línea de costa, se determinó la necesidad de caracterizarla de acuerdo con tres criterios: Geomorfología (i.e. acantilado, playa, etc.), litología (i.e. arcillolita, arenisca, etc.) y carácter (i.e. estable, acrecional, erosional). Teniendo en cuenta estas consideraciones, se decidió utilizar las herramientas de referenciación lineal (*linear referencing*) y segmentación dinámica (*dynamic segmentation*) de ArcInfo 9.1 (ESRI, 2005).

Dos modelos permiten referenciar espacialmente los elementos geográficos. El primero utiliza las coordenadas XY del elemento para ubicarlo con respecto al origen de un sistema de coordenadas específico. El segundo método, conocido como referenciación lineal, posiciona elementos puntuales y lineales con base en su ubicación sobre otro elemento lineal ya georreferenciado. Este elemento lineal de referencia se denomina “ruta”, mientras que los puntos y segmentos a posicionar se califican como “eventos”. De esta manera, los eventos se ubican en términos de su distancia desde el punto de inicio de la ruta y siguiendo la dirección de la misma. Los eventos de tipo segmento tendrán entonces como georreferenciación dos valores: Uno representando la distancia desde el origen de la ruta hasta el inicio del segmento, y otro representando la distancia desde el origen de la ruta hasta el punto final del segmento. Por ejemplo, la descripción del carácter de la línea de costa se haría como: sector 1 (erosional) se ubica entre los km 10 y km 20 de la línea de costa, el sector 2 (estable) se ubica entre los km 21 y km 30, etc.



Los eventos de tipo punto contienen un solo valor de georreferenciación que representa su distancia desde el origen de la ruta. Los eventos se representan a través de tablas, donde cada fila corresponde a un evento; las columnas o campos contienen el identificador de la ruta, los valores de ubicación sobre la misma, y atributos descriptivos adicionales. Finalmente, para visualizar y consultar los eventos se genera una capa (*map layer*) con simbología que sea de fácil interpretación para el usuario final. Este paso dentro del proceso completo se denomina segmentación dinámica.

La referenciación lineal se utilizó para representar la geomorfología, litología y carácter de la línea de costa como eventos lineales. Adicionalmente, se utilizó esta herramienta para representar los rasgos geomorfológicos (i.e. deslizamientos) como eventos de tipo puntual sobre la línea de costa. El proceso completo de referenciación lineal se ilustra en la Figura 2.



**Figura 2.** Secuencia para la referenciación lineal y segmentación dinámica de eventos de tipo línea, ilustrada para la geomorfología de la línea de costa: (1) se genera una capa de puntos con las coordenadas iniciales y finales de cada sector geomorfológico, (2) se segmenta la línea de costa con base en dichos puntos, (3) se ubican los sectores sobre la línea de costa definida como ruta, para generar la tabla de eventos, (4) se genera la capa que contiene la simbología. Los triángulos indican capas en formato vector (feature class), las elipses indican capas de simbología (map layers), y las palabras entre comillas se refieren al comando específico de ArcGIS.

### 2.3.4. Análisis multitemporal de la línea de costa

El estudio de los cambios en la línea de costa constituye una de las principales herramientas para determinar las tasas de erosión/acreción en un sector determinado. Este análisis puede realizarse manualmente, midiendo las diferencias de posición entre las líneas de costa de diferentes periodos, sobre perfiles trazados perpendicularmente a una de ellas. Esta misma evaluación puede hacerse de manera más rápida y precisa dentro del SIG, a través de aplicaciones como "Digital Shoreline Analysis System - DSAS -" (Thieler et al., 2005). Ésta puede descargarse desde internet y funciona como una extensión dentro de ArcGIS. Requiere tener: (1) mínimo dos líneas de costa de diferentes periodos, y (2) una línea base a partir de la cual se trazan los perfiles o transectos. Como resultado se obtienen:

- Transectos perpendiculares a la línea base, con un intervalo especificado por el usuario.
- Tabla de intersecciones: Cada registro de esta tabla representa una intersección entre los transectos y las líneas de costa. Los campos incluyen la distancia a la línea base, y coordenadas XY de la intersección.
- Tabla de distancias: Cada registro de esta tabla corresponde a un transecto. Los campos incluyen, entre otros, distancia entre líneas de costa y línea de costa - línea base.

Las tablas anteriores contienen estadísticas útiles para el análisis multitemporal, tales como la tasa de cambio anual, y tasas de cambio promedio obtenidas por diferentes métodos de regresión en el caso de tener más de dos líneas de costa.

Para este análisis se utilizaron las líneas de costa de 2004 y 1938 entre Minuto de Dios y Cristo Rey (sector cubierto por ambas líneas). La línea base se generó como una línea paralela a la línea de costa de 2004, desplazada 100 m hacia el continente, de manera que siempre estuviera sobre el mismo costado de ambas líneas de costa. Los transectos se generaron con un intervalo de 50 m y una longitud de 2 km estimada en el sector de mayor cambio entre ambas fechas (Punta Arboletes). La precisión de las líneas de costa se especificó como 5 m para la línea del 2004, y 30 m para la de 1938.

La superficie de los terrenos erosionados entre ambas fechas se calculó de dos maneras. Primero, se estimó la suma de las áreas de los polígonos formados por ambas líneas de costa para los sectores con retroceso; este valor representa el área perdida, sin corrección asociada a la precisión de ambas líneas de costa. Luego se generó una línea de costa paralela a la del 2004, y desplazada 35 m en dirección oeste (hacia la línea de costa de 1938 en la mayoría de la zona de estudio). Se cuantificó de nuevo el área de los polígonos en los sectores con retroceso. Este valor tiene en cuenta la precisión de ambas líneas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Estructura y documentación del SIG

Los datos fuente se agruparon de acuerdo con su temática, ubicación y naturaleza geográfica en tres grupos: Línea de costa, plataforma somera y franja litoral. Vale la pena aclarar que a pesar de que los datos asociados a la línea de costa hacen parte de la franja litoral, se agruparon dentro de un grupo independiente debido a su importancia dentro de este proyecto. La litología, geomorfología, rasgos geomorfológicos y caracter de la línea de costa se presentan como eventos asociados a la línea de costa del año 2004, de acuerdo con el concepto de referenciación lineal expuesto anteriormente. La figura 3 presenta una sección del diseño lógico de la geodatabase. Este diagrama se realizó en Microsoftâ Office Visioâ usando la notación del Lenguaje de Modelado Unificado - UML.

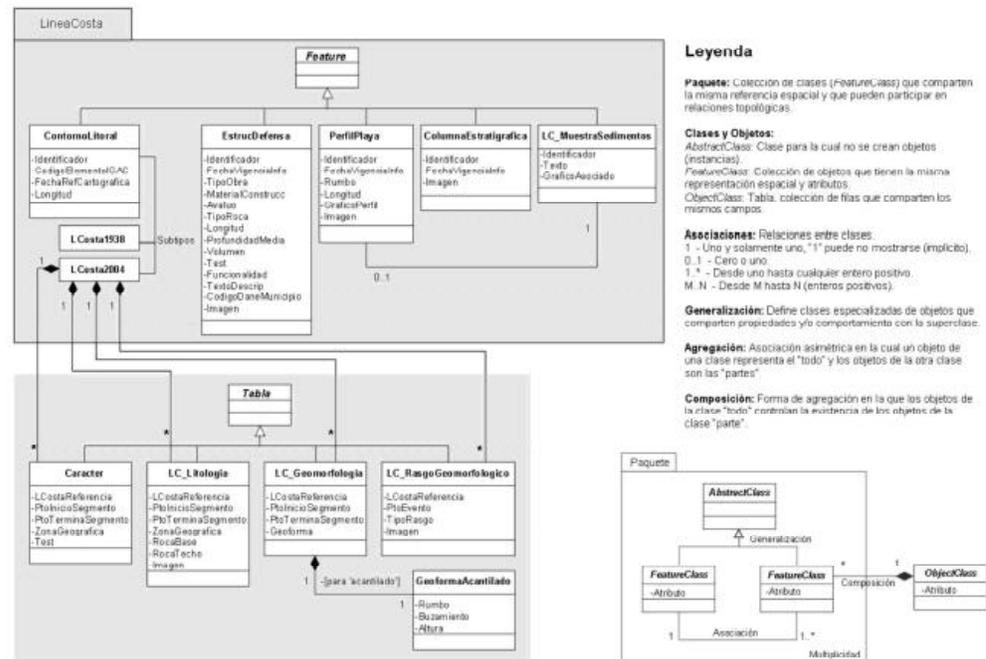
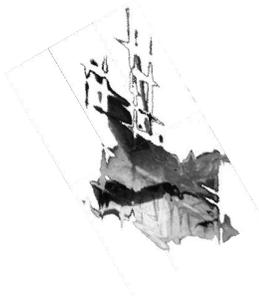
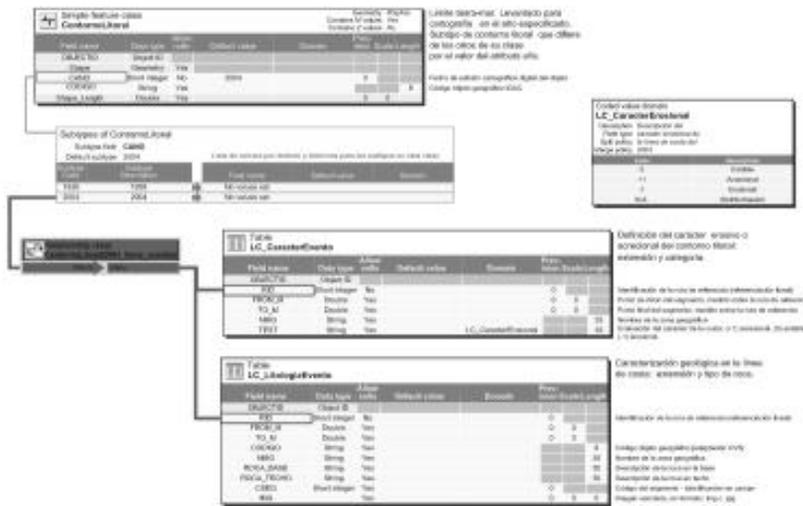


Figura 3. Sección del modelo lógico de la base de datos espacial, que incluye el grupo de datos de la línea de costa y sus clases correspondientes. Para cada clase se incluyen sus atributos y relaciones.

El modelo físico de la geodatabase se documentó con ayuda de los elementos gráficos generados por la herramienta “Geodatabase Diagrammer” (Nichols, 2005) (Figura 4). Estos elementos representan los objetos de la geodatabase: clases, tablas y relaciones entre los mismos. Además, para cada objeto se detallan propiedades tales como tipo de dato, dominio asociado, valor por defecto, precisión, longitud, etc. Por lo tanto, este diagrama reemplaza el diccionario de datos utilizado tradicionalmente, cuya creación es dispendiosa. Adicionalmente, constituye una alternativa más comprensible y didáctica para quienes no estén familiarizados con los SIG. Cabe anotar como limitaciones, que esta herramienta no extrae de forma automática los elementos gráficos para diagramar topologías y capas de simbología (*map layers*).



**Figura 4.** Sección del diagrama de la geodatabase que ilustra diferentes objetos y sus propiedades. Se incluyen como ejemplos: Clase ContornoLitoral, subtipos (1938, 2004), eventos asociados (LC\_CaracterEvento, LC\_LitologiaEvento), y dominio (CaracterErosional). Para cada uno de estos objetos se listan sus atributos y una descripción general.

### 3.2. Caracterización de la línea de costa

Las tablas de eventos generadas para caracterizar la línea de costa presentan para cada registro dos atributos básicos: El identificador de la ruta asociada – elemento lineal de referencia (línea de costa del 2004) -, y la ubicación relativa del punto o segmento sobre la misma (medida en metros) (Figura 5). Adicionalmente, pueden contener atributos descriptivos (e.g. tipo de geomorfología, litología, etc.) y de tipo raster. Estos últimos son útiles para asociar fotos que ilustren las características del elemento/segmento. Todos estos atributos se conservan en la capa (*map layer*) generada a partir de la segmentación dinámica.

El uso de estas herramientas permitió caracterizar un mismo elemento geográfico – línea de costa - a partir de tres criterios diferentes, evitando una representación digital que:

- Tuviera segmentación excesiva, ya que los segmentos correspondientes a cada criterio no eran coincidentes.
- Presentara duplicidad del mismo elemento, lo cual hubiera sido necesario si cada criterio se hubiera representado como una clase individual.
- Violara las reglas de integridad y principios de consistencia de la base de datos, según las cuales no debe existir redundancia en el almacenamiento de un mismo objeto espacial.

Lo anterior se traduce en una buena práctica de modelado de objetos espaciales, permitiendo el óptimo desempeño y mantenimiento de la base de datos geográficos.

**Figura 5.**  
Tabla de eventos para la caracterización de la geomorfología de la línea de costa. Cada registro o línea en la tabla representa un evento, en este caso, un sector de la línea de costa con geomorfología definida. Los atributos indican: Identificador de ruta (RID), comienzo y fin del evento sobre la ruta (FROM\_M, TO\_M), descripción del evento (ABR; Ac = acantilado, AcPI = Acantilado con playa, etc.).

OBJECTID	RID	FROM_M	TO_M	ABR*
1	2004	31.914171	4516.347725	Ac
2	2004	4516.347725	6679.866854	AcPI
3	2004	6679.866854	10045.576259	Ac
4	2004	10045.576259	11998.353801	AcPI
5	2004	11998.353801	12864.354495	Ac
6	2004	12864.354495	13057.231445	AcPI
7	2004	13057.231445	13148.447505	PI
8	2004	13148.447505	13224.873751	DeFI
9	2004	13224.873751	13244.257138	PI
10	2004	13244.257138	18142.818630	Ac

### 3.3. Análisis multitemporal de la línea de costa

La longitud de línea de costa analizada fue de aproximadamente 36.5 km (sobre la línea de costa del 2004). El 72% de los transectos (730 en total) registraron diferencias significativas (mayores de 35 m) entre ambos periodos, todas correspondientes a retrocesos reales de la línea de costa. El análisis de dichos transectos indica un retroceso promedio de 132 m entre 1938 y 2004, correspondiente a una velocidad promedio (tasa) de erosión de 2 m a<sup>-1</sup>. Este valor se encuentra dentro del rango (0.5 a 4 m a<sup>-1</sup>) indicado por Correa et al. (2005) para la costa Caribe en el sector entre Cartagena y el Golfo de Urabá.

La distancia máxima registrada por los transectos entre ambas líneas de costa es de 972 m, en Punta Arboletes. Este valor es, sin embargo, menor que la distancia real máxima, del orden de 1.5 km, la cual no fue registrada por ningún transecto debido a la configuración de los mismos en este sector (Figura 6). La magnitud de los procesos erosivos en el sector de Punta Arboletes (o Punta Rey) se confirma al seleccionar los transectos que registran diferencias mayores de 500 m (tasas de erosión promedio de 7.6 m año<sup>-1</sup>); todos éstos se encuentran entre Punta Arboletes y unos 800 m al norte de la misma. Estudios anteriores indican que la erosión acelerada en esta zona se debe a varios factores naturales y antrópicos, e.g. la litología de la línea de costa (arcillolitas Terciarias) y la extracción de arena para construcción (Correa et al., 2005, Correa & Vernet, 2004; Morton & Correa, 2004).

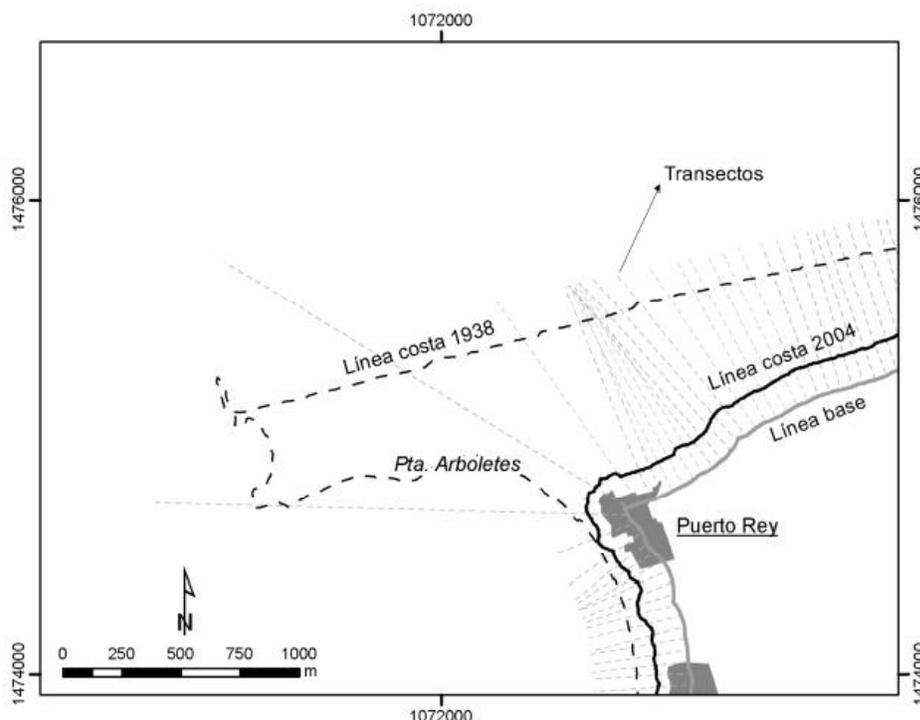
Los transectos que no registraron diferencias significativas entre 1938 y 2004 (distancia entre líneas de costa menor de 35 m) se ubican al norte de Punta Brava. Sin embargo, las evidencias de campo y los resultados de estudios anteriores indican que toda la línea de costa considerada en esta investigación presenta un carácter erosional, a excepción de algunos sectores aledaños a deltas, con altos aportes de sedimentos (i.e. Tinajones, carácter acrecional) y algunas puntas rocosas con alta resistencia a la erosión marina (i.e. Punta Brava, carácter estable) (Correa et al., 2005).

El área perdida entre ambas fechas es de 414 ha; cuando se toma en cuenta el valor de precisión de ambas líneas de costa, este valor se reduce a 298 ha.

## 4. CONCLUSIONES

La documentación de las bases de datos espaciales ha sido un aspecto al que en general no se le ha dado la importancia que amerita, tanto por parte de los diseñadores e implementadores de las mismas, como de los usuarios finales. Lo anterior puede deberse a varios factores tales como el tiempo que debe invertirse y el formato del producto final (diccionario de datos). Sin embargo, es un aspecto crítico para su uso y actualizaciones posteriores. Las herramientas presentadas tanto para el diseño lógico como para el físico, permiten semiautomatizar los procesos de documentación y ofrecen un producto final más comprensible para el usuario final y para el DBA





**Figura 6.** Líneas de costa y transectos en el sector de Punta Arboletes. Sólo los dos transectos ubicados en la punta conservan su longitud original (2 km); el resto fueron recortados para facilitar la visualización de la figura. Notar que ninguno de los transectos captura el retroceso máximo en este sector. Proyección Transversa de Mercator; datum Observatorio Astronómico de Bogotá, origen Colombia Occidente ( $4^{\circ}35'56.57''N$  y  $77^{\circ}04'51.30''W$ ).

SIG (administrador de la base de datos espaciales). Estas herramientas tienen por lo tanto aplicabilidad en cualquier proyecto de SIG; el uso del "Geodatabase Diagrammer" está sin embargo, limitado a proyectos desarrollados con el programa ArcGIS. Adicionalmente, consideramos que las bases de datos espaciales deben diseñarse e implementarse utilizando metodologías formales y comunicarse en lenguajes apropiados como el UML, de manera que permitan su total comprensión y la facilidad en su uso, mantenimiento y expansión.

El uso de las herramientas de referenciación lineal y segmentación dinámica posibilita la caracterización de elementos lineales con base en tantos criterios como se considere necesario. Permite además obtener de manera automática la ubicación sobre dicho elemento de la característica de interés. Consideramos que su aplicación puede extenderse a cualquier elemento lineal para evitar su segmentación y duplicación, e.g. caracterización de drenajes, vías, líneas de transmisión, etc.

De las aplicaciones presentadas, el DSAS es sin duda de interés para estudios de erosión costera, cuantificando de forma automática las tasas de erosión y acreción. Este es un aspecto de la mayor importancia en litorales como el colombiano, caracterizados por variaciones drásticas del contorno litoral en periodos cortos, cuya documentación e interpretación exigirán métodos de bajo costo y cada vez más precisos. En conjunto con esta aplicación, se pueden utilizar otras herramientas básicas del SIG para identificar los sectores más críticos, i.e. selección por atributos, cálculo de áreas. La interpretación de estos resultados debe considerar las evidencias de campo, ya que se pueden presentar inconsistencias por factores como la baja precisión de las líneas de costa antiguas, obtenidas generalmente a partir de mapas y fotos con escalas pequeñas (de poco detalle).

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Anfuso, G. y Martínez del Pozo, J.A., 2005. Towards management of coastal erosion problems and human structure impacts using GIS tools: case study in Ragusa Province, Southern Sicily,

- Italy. *Environmental Geology*, 48, pp. 646-659.
- Botero, V., Smith, R.A. y Patiño, J.E., 2003. Zonificación del uso de microcuencas urbanas como base para el ordenamiento territorial. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 10, pp. 33-46.
- Correa, I.D., Alcántara-Carrió, J. y González, D.A., 2005. Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean coast. *Journal of Coastal Research*, special issue 49, pp. 52-57.
- Correa, I. D. y Vernet, G., 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras Invemar*, 33, pp. 5-26.
- ECOPETROL-ICP, 1998. Estándares de información geográfica. 179 P.
- El-Raey, M., Frihy, O., Nasr, S.M. y Dewidar, K.H., 1999. Vulnerability assessment of sea level rise over Port Said Governorate, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 56, pp. 131-128.
- ESRI, 2005. Linear referencing in ArcGIS. ESRI Press, Redlands, 164 P.
- Flórez, C.A. y Etter, A., 2003. Caracterización ecológica de las islas Múcura y Tintipán, archipiélago de San Bernardo, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(104), pp. 343-356.
- Hoyos, N., 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Catena*, 63 (1), pp. 85-108.
- ICONTEC, 2000. Información geográfica: Metadatos. Norma técnica colombiana NTC 4611. Bogotá, 79 P.
- INGEOMINAS, 2001. Estándar institucional para información de cartografía base, versión 1.0. Bogotá, 32 P.
- López-Victoria, M. y Díaz, J.M., 2000. Morfología y estructura de las formaciones coralinas del archipiélago de San Bernardo, Caribe Colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 24(91), pp. 219-230.
- Molina, A.M. y Barros, J.F., 2005. Aplicación de los SIG para la evaluación del estado de conservación del hábitat del paujil de pico azul *Crax alberti* (aves: *Cracidae*) en el nororiente de Antioquia, Colombia. *Revista EIA*, 3, pp. 95-105.
- Montoya, R.D., Montoya, L.J. y Anaya, J.A., 2005. Evaluación de la producción de sedimentos en la cuenca del río La Miel. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 12, pp. 119-134.
- Morton, R. y Correa, I.D., 2004. Introducción al uso de los geoindicadores de cambios ambientales en costas húmedas tropicales. *Geología Norandina*, 12, pp. 1-56.
- Nichols, G., 2005. Geodatabase diagrammer for ArcGIS 9. <http://arcscripsts.esri.com/>. Fecha de acceso: Mayo 2006.
- Santamaría, M.P., 2000. Generación de un mapa de concentración de SO<sub>2</sub> en Bogotá con el uso de sistemas de información geográfica. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 10(40), pp. 18-23.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L. y Miller, T.L., 2005. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304. <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/index.htm>. Fecha de acceso: Junio 2006.
- Thumerer, T., Jones, A.P. y Brown, D., 2000. A GIS based coastal management system for climate change associated flood risk assessment on the east coast of England. *International Journal of Geographical Information Science*, 14, pp. 265-281.
- Vélez, J.I., Mesa, O.J. y Poveda, G., 2002. HidroSIG Java: Una herramienta para la visualización y análisis de datos hidroclimatológicos. *Meteorología Colombiana*, 6, pp. 65-71.

