

# Aplicación metodológica para obtener modelos digitales de elevación

-MDE- de escala local en zonas de humedales

## Methodological application so as to obtain digital elevation models

-DEM- in wetland areas

Recibido para evaluación: 31 de Octubre de 2008

Aceptación: 1 de Julio de 2009

Recibido versión final: 21 de Julio de 2009

Deiby Alejandro Quintero<sup>1</sup>  
Diana Maria Montoya Velilla<sup>2</sup>  
Teresita Betancur Vargas<sup>3</sup>

### RESUMEN

Para el entendimiento de los sistemas hidrológicos y la descripción de los procesos de flujo que se dan entre sus componentes, es fundamental contar con una descripción fisiográfica que comprenda la caracterización hidrográfica, morfométrica y del relieve. Cuando se van a adelantar estudios locales, la cartografía básica disponible, en el mejor de los casos a escala 1:25.000, suele no obedecer a las necesidades requeridas para representar de forma adecuada, la dinámica hídrica que caracteriza las interacciones entre corrientes de agua, acuíferos y cuerpos lénticos en zonas planas, particularmente, en aquellas donde existen humedales asociados a antiguas llanuras de inundación de ríos.

Limitaciones para resolver esta situación la constituyen la escasez de recursos financieros para obtener nueva y suficiente información, acorde con la escala de los proyectos locales. En la búsqueda de alternativas, las condiciones geomorfológicas de zonas con relieve plano brindan una oportunidad para la "construcción" de nuevos datos. Con la cartografía básica disponible y estos datos, utilizando las herramientas de modelación espacial acopladas a los SIG, se puede obtener Modelos Digitales de Elevación -MDE- mejorados y concordantes con las dinámicas de flujo superficial y subterráneo del sistema hidrológico. En este artículo, se presenta una aplicación metodológica en este sentido, para el entorno geográfico de la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en el Bajo Cauca antioqueño.

**PALABRAS CLAVE:** Modelo digital de elevación, modelo hidrológico, relieve plano, humedales, modelación espacial, Topo to Raster, Ciénaga Colombia.

### ABSTRACT

In order to understand hydrological systems and the description of flow processes that occur among its components it is essential to have a physiographic description that includes hydrographic, morphometric and relief characteristics. When local studies are performed, the basic cartography available, in the best case 1:25,000 scale, tends not to obey the needs required to represent the water dynamics that characterize the interactions between streams, aquifers and lentic water bodies in flat zones, particularly in those where there are wetlands localized in ancient flood plains of rivers.

A lack of financial resources is the principal obstacle to acquiring information that is current and sufficient for the scale of the project. Geomorphologic conditions of flat relief zones are a good alternative for the "construction" of the new data. Using the basic cartography available and the new data, it is possible to obtain DEMs that are improved and consistent with the dynamics of surface and groundwater flows in the hydrological system. To accomplish this one must use spatial modeling tools coupled with Geographic Information System - GIS -. This article present's a methodological application for the region surrounding the catchment of wetland Cienaga Colombia in the Bajo Cauca region of Antioquia.

**KEY WORDS:** Digital elevation model, hydrologic model, flat relief, wetland, spatial model, Topo to Raster, Ciénaga Colombia.

1. Esp. en medio ambiente y geoinformática.
2. Ing. Sanitaria, candidata a Magister en Ingeniería.
3. Doctora en Ingeniería. Directora del Grupo GIGA (Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental)

Universidad de Antioquia.  
Medellín. Colombia.

terebetav@udea.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

La construcción de un modelo hidrológico independiente de la escala necesita una caracterización fisiográfica que permita describir las condiciones geomorfológicas de la zona de estudio, identificar la configuración de la red de drenaje y sus características morfométricas y establecer las posibles interacciones entre los compartimientos atmosférico, superficial y subterráneo del sistema hidrológico. Desde hace aproximadamente dos décadas, esta caracterización ha comenzado a obtenerse apoyados en la utilización de modelos computacionales que representan numéricamente la distribución continua de la altitud de la superficie del terreno, comúnmente conocidos como Modelos Digitales de Elevación - MDE-.

Un MDE puede ser descrito mediante una expresión matemática (1) en la que el terreno se representa como una función bivariable continua; "z" corresponde a la altitud en el punto de coordenadas (x,y) y "ζ" es una función que relaciona la variable con su localización geográfica, y es aplicada sobre un dominio espacial concreto, D. En consecuencia, un MDE puede describirse genéricamente como  $MDE = (D, \zeta)$  (Felicísimo, 1994).

$$z = \zeta D_{x,y} \quad (1)$$

En la práctica, la función no es continua, sino que se resuelve a intervalos discretos, por lo que el MDE esta compuesto por un conjunto finito y explícito de elementos. Los valores "x" y "y" suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente de un sistema de proyección cartográfica. Dado que la superficie del terreno está formada por un número infinito de puntos, no es posible su modelización sin cierta pérdida de información, proceso equivalente al de generalización cartográfica en los mapas convencionales. En la versión digital, es posible presentar de forma explícita, al menos teóricamente, la ecuación anterior que relaciona la altitud con la localización geográfica. Sin embargo, la complejidad del relieve hace que su representación matemática mediante funciones no tenga más que un significado simbólico. En la práctica, las cotas correspondientes a una zona sólo pueden representarse mediante una ecuación cuando la parcela descrita es pequeña y el relieve implicado muy simple. Este método puede ser utilizado para aplicaciones concretas, operando sobre zonas muy limitadas, pero en cuanto el relieve se complica o la superficie aumenta, el ajuste de una ecuación para su descripción se hace imposible. Como alternativa, se ha buscado soluciones para representar la altitud mediante conjuntos limitados de cotas, diseñando las estructuras de datos que buscan un equilibrio entre la facilidad de manejo y la descripción realista del relieve (Felicísimo, 1994).

Esta forma de representación digital de los modelos ha venido de la mano, a lo largo de las últimas décadas, de la evolución tecnológica y la consecuente aparición de herramientas geoinformáticas, permitiendo gestionar la información espacial a través de instrumentos versátiles que aportan las utilidades necesarias para el análisis del espacio geográfico y las relaciones e interacciones que en él se presentan (Quintero, 2008).

La integración de la información espacial digital, herramientas informáticas y modeladores constituyen verdaderos sistemas que deben estar articulados de manera tal que las modelaciones tengan validez en cuanto a la efectiva representación de la realidad. Bajo estas circunstancias operan los Sistemas de Información Geográfica, SIG, cuyas fortalezas radican en la posibilidad de obtener representaciones más certeras a medida que la información de entrada al sistema mejora, cualitativa y cuantitativamente. Para el caso de los MDE, su construcción y precisión dependen de los insumos disponibles, por lo que es necesario contar con información digital adecuada que guarde dentro de sus atributos, características orográficas e hidrológicas de la zona y principalmente un número significativo de datos que representen el valor de la altitud del terreno.

En segunda instancia, el modelador tendrá la capacidad de aplicar las técnicas necesarias para hacer la modelación con los instrumentos que le brinda la herramienta geoinformática, la cual está fundamentada en operaciones espaciales usadas en algoritmos especialmente diseñados para tal fin. En este caso, los Modelos Digitales de Elevación se generan a partir de la



interpolación de la información de entrada, lo que supone que a medida que los vacíos de dicha información sean menos distantes, la representación realista del modelo será más aproximada.

En el caso colombiano, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, ha construido a escala 1:25.000 la cartografía básica de casi todo el territorio nacional y sólo recientemente se empiezan a materializar esfuerzos para obtener cartografía a escala 1:10.000. Para muchos efectos, entre ellos para la realización de análisis hidrológicos locales, cuando la zona de estudio es de topografía plana, con contrastes altitudinales del orden de 50 metros, no se logra representar de una manera adecuada la realidad fisiográfica, geomorfológica e hidrográfica.

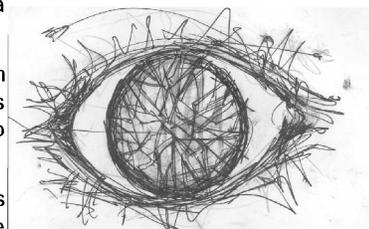
En este contexto, obtener un MDE a escala 1:10.000 exige información espacial con un mayor nivel de detalle, lo que genera nuevos retos para la adquisición. Así se recurre a métodos directos, tomando medidas sobre el terreno, o indirectos, utilizando documentos analógicos o digitales elaborados previamente (Felicísimo, 1999).

La realización de levantamientos topográficos y cartográficos requiere suficientes recursos tecnológicos y humanos, así como suficiente tiempo para obtener un número importante de datos; la captura de información remota a través de satélites representa una alternativa extremadamente precisa, pero por lo general costosa. La fotogrametría digital, incorporada a los SIG, se ha convertido en uno de los principales métodos para obtener información geográfica. Esta técnica utiliza fotogramas aéreos de eje vertical tomados desde un avión que sobrevuela la zona de estudio para extraer, en un proceso de restitución a través de la orientación de las imágenes, la información contenida en ellas; concretamente la información relacionada con la elevación del terreno. Sin embargo, esta metodología igualmente está sujeta a ciertas restricciones de precisión.

La captura de información mediante la digitalización de mapas topográficos preexistentes, ya sea de forma manual a través de tableros digitalizadores, o automática a través de escáneres, representa elementos de entrada para la modelación con herramientas geoinformáticas de Modelos Digitales de Elevación.

En la literatura especializada, se encuentra gran cantidad de trabajos que documentan diferentes técnicas para la construcción de un MDE. Bosque (1992), Guilarte et al. (1995) y Uribe (1996) abordan la creación del MDE a partir de la digitalización de mapas topográficos de forma manual y/o mediante escáner. Toutin (1995b) presenta un método digital fotogramétrico para generar el MDE a partir de imágenes digitales de diferentes plataformas (aéreas y espaciales) y de diferentes sensores (infrarrojo visible, VIR, y radar de apertura sintética, SAR). Yumar et al. (1997) y Cheng et al. (1999) muestran la manera de obtener, de forma precisa y a bajo costo, MDEs a partir de fotos aéreas o imágenes de satélite. Con el mismo propósito, Arbiol et al. (1997); Polidori et al. (1998) resaltan las ventajas de la radargrametría, la radarclinometría y la interferometría. Estereopares de imágenes satelitales tipo SPOT (Costa et al., 1997), estereopares RADAR (García, 1997; Toutin, 1995a, 1998) y estereopares de ASTER, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, (Toutin et al., 2001) han sido manipulados para lograr el mismo fin.

La aplicación de estas técnicas y estos métodos en el contexto de proyectos de investigación está condicionada por la accesibilidad a recursos económicos suficientes para adquirir información; siendo éste un aspecto crítico que en muchos casos, es necesario explorar y aplicar herramientas metodológicas de análisis para suplir estas necesidades; las condiciones de topografías planas con cartografía básica a escala pequeña representan áreas con condiciones propicias para utilizar criterios geomorfológicos que permitan obtener MDEs con mejor resolución. Un ejercicio en tal sentido fue realizado en la región de Urabá, en la cuenca del río León (Betancur, 1996) utilizando criterios que siguen siendo vigentes (Vandenberghe, Vanacker, 2008). Con la cartografía básica disponible y una serie de datos "construidos", utilizando las herramientas de modelación espacial acopladas a los SIG, se puede obtener MDEs adecuados con mejor sentido fisiográfico, y concordantes con la dinámica de flujo del sistema hidrológico. Para este propósito, se exploraron diferentes métodos de interpolación espacial, entre los que se destacan las geoestadísticas tipo Kriging y los empleados tradicionalmente para la interpolación de variables distribuidas en el espacio como: Triangulated Irregular Network (TIN), Inverse Distance Weighted (IDW), Spline, y Topo to Raster.



En el curso del proyecto "Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño" que se adelanta en convenio con el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, se tiene un caso de estudio en el país correspondiente a la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia en un área de 72 Km<sup>2</sup>. Esta zona de estudio requiere precisamente la caracterización fisiográfica a escala 1:10.000.

Ciénaga Colombia y su área de captura desde y hacia donde discurre el flujo de agua superficial y subterráneo, se encuentra ubicada en la cuenca baja del río Man, haciendo parte de un complejo sistema de humedales (Figura 1). Este sistema léntico dista seis kilómetros de la cabecera urbana de Cauca y es uno de los más importantes de la región gracias a su alta biodiversidad, belleza escénica, por constituir el principal afluente del río Man y por los recursos hidrobiológicos que ofrece a los pobladores de la zona. Su topografía es suave, con relieves planos y ondulados que varían latitudinalmente entre 50 y 100 m.s.n.m, con pendientes inferiores al 7%; geomorfológicamente hace parte de la superficie de erosión Cauca y las superficies aluviales de los ríos Cauca y Man (CORANTIOQUIA- Universidad Nacional, 2002). Ciénaga Colombia es sostenida hidrológicamente a escala local por las influencias de las corrientes Aduana, Quebrada Ciénaga y Caño Ucrania y por el flujo base proveniente del acuífero libre regional del Bajo Cauca. Regionalmente, la dinámica del río Cauca determina complejidades hidrodinámicas que deberán ser objeto de estudio en futuras investigaciones. En la actualidad, este sistema cenagoso presenta una alta presión por actividades antrópicas que han intervenido la dinámica del sistema natural, degradándolo (Betancur, 2008). Algunas de ellas son las construcciones de obras civiles como jarillones y canales de desecación, con el objetivo de extender las fronteras para la práctica de la ganadería extensiva.

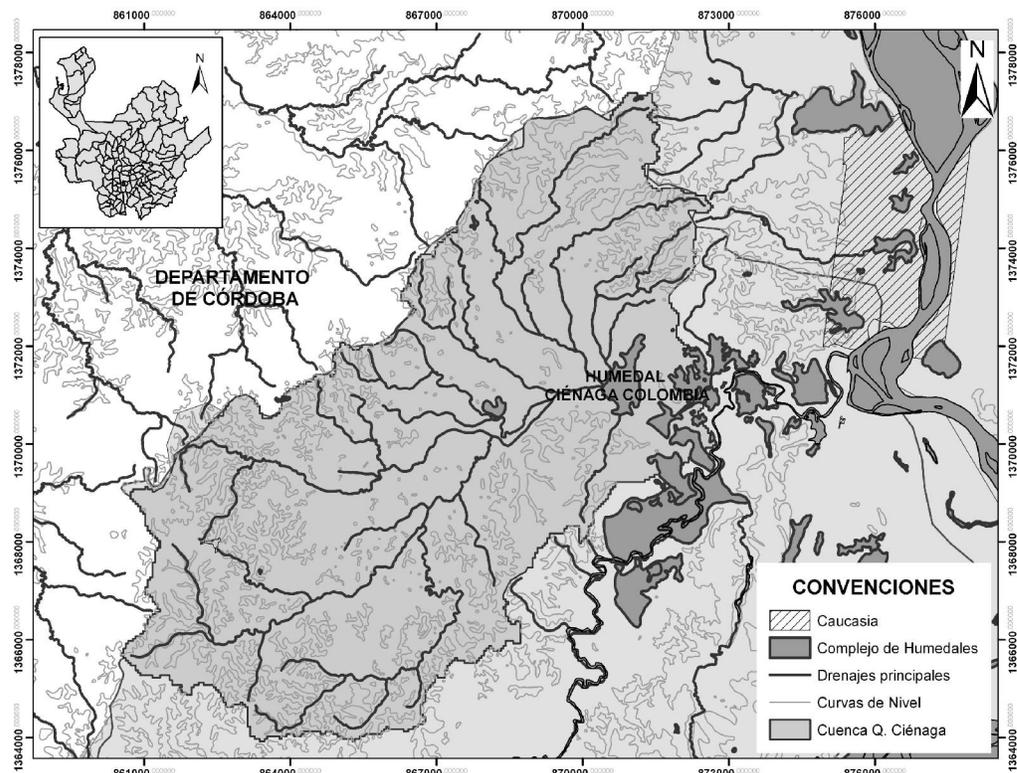


Figura 1. Localización geográfica de la Zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de que se disponga, la información que de ellos pueda extraerse y las herramientas para su manipulación, representan los insumos o materiales para llevar a cabo la

aplicación de la metodología aquí descrita para la construcción de un MDE a escala 1:10.000, adecuado para representar la dinámica de flujo de agua en relieves planos, que comprendan la zona de captura de sistemas cenagosos.

## 2.1. Materiales

Se describe aquí la información disponible del área de estudio donde se utilizó la metodología aplicada y las principales características del software para SIG.

### 2.1.1 Información disponible

Se utilizó la cartografía básica digital, escala 1:25.000, producida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (planchas 82IVA, 82IVB, 82IVC y 82IVD -1979- ) y suministrada con propósitos de investigación por CORANTIOQUIA. Los rasgos empleados corresponden a los drenajes, tipo línea; los contornos de curvas de nivel con cotas del área de estudio cada 25 metros, tipo línea y la delimitación de cuerpos lénticos, tipo polígono.

### 2.1.2. Software empleado

La preparación y organización de la información cartográfica digital disponible y el análisis espacial para construir el MDE, se realizaron mediante la herramienta ArcGIS Desktop, en sus módulos de ArcMap y ArcCatalog. Como propiedades principales, este software permite descubrir patrones, relaciones y tendencias de datos de manera espacial; provee la facilidad del manejo y la integración de los datos para realizar análisis avanzados, modelamiento y automatización de procesos operacionales, y muestra los resultados en mapas de gran calidad. Dado que el ArcGIS es un software que debe ser operado con la respectiva licencia, se utilizó el paquete ArcGIS- ArcView 9.2 con las siguientes extensiones: 3D Analyst, Spatial Analyst y Geostatistical Analyst, disponibles en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

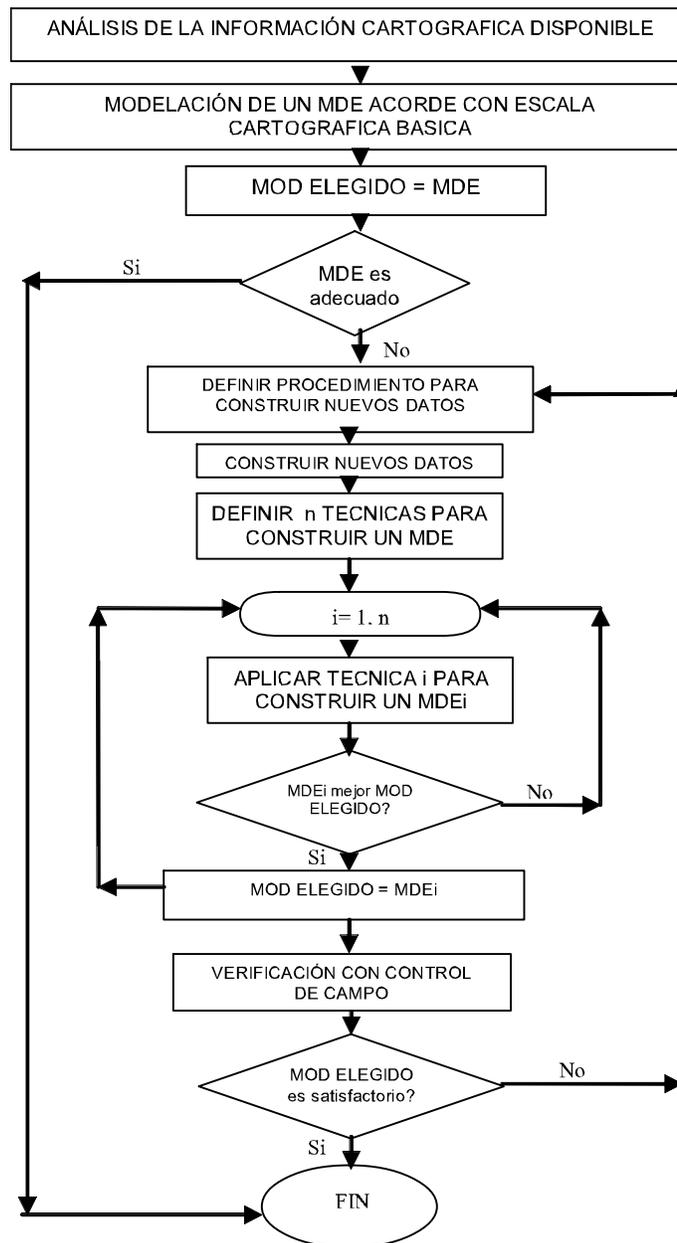
## 2.2. Métodos

La metodología aquí adaptada para mejorar la calidad de un MDE (Figura 2) es aplicable a zonas con relieve suave o plano, de las que se tenga cartografía básica a escala 1:25.000 con una buena representación de la red de flujo, pero en las cuales los métodos estándar de interpolación espacial no permiten obtener representaciones adecuadas de la fisiografía y condiciones de flujo de agua acordes con la lógica de los sistemas hidrológicos, razón por la cual se hace necesario recurrir a procedimientos alternativos para la construcción de nuevos datos que permitan el desarrollo de un MDE con la resolución espacial requerida para los propósitos de los proyectos, sea escala 1:10.000 o mayor.

Frente a la realidad cotidiana de no contar con recursos financieros para la obtención de nuevos datos a partir de fotografías aéreas, imágenes de satélite, utilización de GPS de alta precisión y levantamientos topográficos de detalle, se recurre a la aplicación de criterios geomorfológicos (Betancur, 1996 y Harmar y Clifford, 2007) para "construir" información.

La metodología parte de la evaluación del MDE inicial desarrollado a partir de la cartografía básica disponible; si este modelo no es adecuado, se establece la necesidad de uno mejor y para lograrlo, se definen los criterios para "construir" nuevos datos en nuevos puntos de control. Posteriormente, se realizan los ejercicios de modelación espacial utilizando los métodos de interpolación disponibles en el software para SIG. Mediante sucesivas comparaciones entre los resultados y apoyados en el control de campo y en el conocimiento del modelador acerca de la zona de estudio, se define cuál es el modelo elegido; siendo éste el que mejor representa la fisiografía del dominio. Este procedimiento se detalla a continuación:





**Figura 2.** Diagrama metodológico para la construcción de un MDE mejorado.

### 2.2.1. Evaluación y análisis de la información cartográfica disponible y el MDE obtenido a partir de ella

Teniendo en cuenta la información disponible, se procede a estructurar las capas y sus atributos a través de la herramienta SIG, buscando definir las características que permitan obtener un MDE con una resolución equivalente a la de la escala de la cartografía básica, y si el resultado no es adecuado, se procede a definir alternativas.

### 2.2.2. Definición de procedimientos y construcción de nuevos datos a partir de criterios geomorfológicos

La idea general es tratar de contar con puntos de control que proporcionen información altitudinal con diferencia de cota de 5 metros, en lugar de 25 metros como está dispuesto en la cartografía básica a escala 1:25.000.

A partir del análisis de las características geomorfológicas de la zona de estudio por parte de profesionales de las ciencias de la tierra, es posible realizar una serie de inferencias apoyados en el comportamiento de la dinámicas hídricas y los procesos de transporte de sedimentos para zonas con topografía plana (Harmar y Clifford, 2007); de esta manera, se establece que para esas condiciones, las pendientes de los cauces principales son lineales. Además la homogeneidad relativa del relieve imprime fuerza a esta inferencia cuando se tienen circunstancias de pendiente que no supera el 12%.

El procedimiento para obtener los puntos de control mediante esta metodología, se basa en la configuración cartográfica de curvas de nivel y drenajes principales, buscando identificar algunas de las siguientes características que faciliten su aplicación:

- La cobertura de drenajes debe poseer como mínimo un atributo que permita la agrupación de los drenajes afluentes (generalmente digitalizados como segmentos), de acuerdo con el orden de la cuenca principal a la que tributan, para luego seleccionarlos y unificarlos en un nuevo mapa de drenajes principales con su correspondiente longitud. Es necesario que cada drenaje tenga una única extensión para proceder luego a su segmentación de acuerdo con la pendiente y la diferencia de altura entre los sitios de nacimiento y afluencia a otra corriente o cuerpo de agua.
- La cobertura de curvas de nivel debe poseer información correcta respecto a la cota de elevación sobre el nivel del mar de acuerdo con la escala, para ser empleado en la creación del MDE.
- El polígono que representa la zona de estudio debe permitir establecer los límites sobre los cuales se extenderá el análisis espacial de la información y los resultados.

Cada corriente principal es segmentada, y el nodo de ruptura de las líneas constituye un punto de control al que se le asignan valores de elevación con intervalos de 10, 5 o 2 metros (según criterio

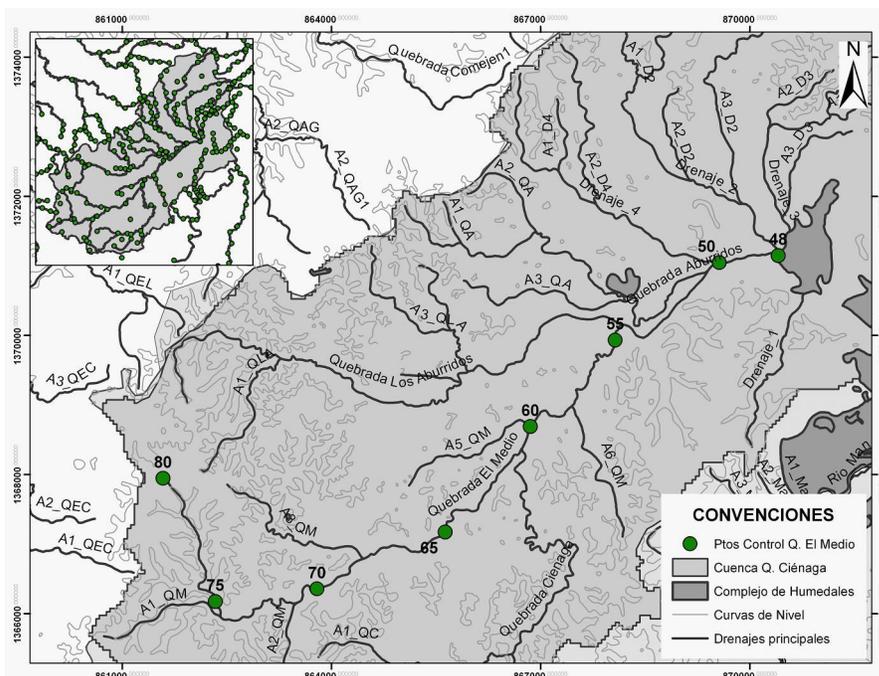


Figura 3. Mapa de puntos de control y cotas disponibles para la zona de estudio.

del modelador), de acuerdo con la longitud y la pendiente de cada drenaje. Algunos puntos de control se pueden localizar en el centro de algunas colinas para mantener la tendencia suavemente ascendente del relieve. Para el caso de la zona de captura de Ciénaga Colombia, se construyeron un total de 375 puntos de control a los que se les asignó un valor de altura (Figura 3).

**2.2.3. Definición de las "n" técnicas a aplicar para la construcción del MDE**

Generar una superficie continua de un atributo particular lo más cercana posible a la realidad a partir de los datos muestreados, caracterizando el error y la variabilidad en la predicción, es uno de los mayores retos de los modeladores de fenómenos espaciales. De allí que entender las potencialidades y limitaciones de estas herramientas, pueda mejorar notablemente los resultados en los modelos obtenidos. Las técnicas de interpolación exploradas en este trabajo están normalmente incorporadas a los módulos de análisis espacial de los software SIG, e incluyeron: Triangulated Irregular Network, Inverse Distance Weighted, Spline Regularizado - Tensión, Geoestadística (Kriging Ordinario) y Topo to Raster (Tabla 1). No obstante, es importante mencionar que de acuerdo con la metodología descrita, es posible que el modelador explore o proponga otros métodos de interpolación.

Tabla 1. Métodos de análisis espacial explorados en la construcción de un MDE

| Método de interpolación              | Extensión en ArcGIS 9.2         | Descripción  |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|
| Triangulated Irregular Network (TIN) | 3D Analyst                      | Consiste en una red de nodos con los valores de altitud que se encuentran conectados por ejes, originando una red de triángulos con sus correspondientes caras. Tiene la ventaja de que esta red alcanza una densidad variable en función del nivel de detalle que exija el terreno.   |
| Inverse Distance Weighted (IDW)      | Spatial Analyst – 3D Analyst    | Este interpolador asume que cada punto en el conjunto de datos tiene una influencia local que disminuye con la distancia y que por tanto los valores de los puntos cercanos al nodo que se procesa tienen mayor importancia o peso en la estimación del valor que será asignado, que el de los puntos más lejanos.   |
| Spline Regularizado – Tensión        | Spatial Analyst – 3D Analyst    | Estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura de la superficie total, lo que resulta en una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos de entrada.   |
| Geoestadística (Kriging Ordinario)   | Geostatistical Analyst - Wizard | El método de interpolación Kriging asume que la distancia y/o la dirección entre puntos de muestreo es una expresión de la correlación espacial entre los puntos y que por tanto dicha información puede utilizarse para explicar la variabilidad encontrada en la superficie muestreada. Es considerado como uno de los mejores métodos de interpolación ya que provee estimaciones insesgadas y de varianza mínima, pero requiere suficiente información para evaluar la normalidad en los datos y los efectos por valores extremos. |
| Topo to Raster                       | Spatial Analyst – 3D Analyst    | Este método usa una técnica iterativa de interpolación en diferencias finitas, lo que lo convierte en un interpolador ArcGIS específicamente diseñado para la creación de MDEs, a partir de los contornos como datos de entrada y de la estructura del drenaje para crear superficies hidrológicamente correctas.  |

Mediante un proceso iterativo y pruebas de sensibilidad, se comparan sucesivos resultados obtenidos con cada una de las técnicas de interpolación y, apoyados en los criterios de la física hidrológica y en el conocimiento adquirido en campo de la zona de estudio, se selecciona la que mejor representa las características fisiográficas e hidrológicas: El MDE elegido.

**2.2.4. Verificación con control de campo**

Hasta que se cuente con un levantamiento cartográfico detallado, el MDE elegido puede ser verificado con actividades de campo que permitan capturar información de elevación para algunos puntos.

### 3. RESULTADOS: CASO DE APLICACIÓN

Siguiendo el mismo orden de la descripción metodológica, a continuación se presentan los resultados de su aplicación en la construcción de un MDE para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

#### 3.1. Modelo Digital de Elevación obtenido a partir de la cartografía básica

Ninguna de las herramientas de modelación espacial de que se dispuso permitió obtener partir de la cartografía básica del IGAC a escala 1:25.000 un MDE que represente adecuadamente los contrastes altitudinales y la física de flujo de agua de la zona de estudio. El humedal Ciénaga Colombia registra valores de cota superior a las de las corrientes que tributan a él, es decir, no muestra una relación hidráulica lógica entre la configuración del relieve y la red de drenaje (Figura 4).

El resultado anterior evidenció la necesidad de contar con una cartografía mas refinada, con información cada 5 metros, como mínimo en lugar de 25 metros como está dispuesto en la cartografía básica a escala 1:25.000, teniendo en cuenta que para el área de interés, sólo se identificaban curvas de nivel de 75 m y 100 m.

#### 3.2. Construcción de nuevos datos a partir de criterios geomorfológicos

Para la construcción de nuevos puntos de elevación, se aplicaron, apoyados en la información disponible y en el conocimiento de la zona de estudio por parte de profesionales de las ciencias de la tierra, los criterios geomorfológicos expuestos en el numeral 2.2.2. Los detalles correspondientes a algunos puntos, contornos de cota, drenajes y cuerpos de agua se presentan en la figura 3 y en la tabla 2.

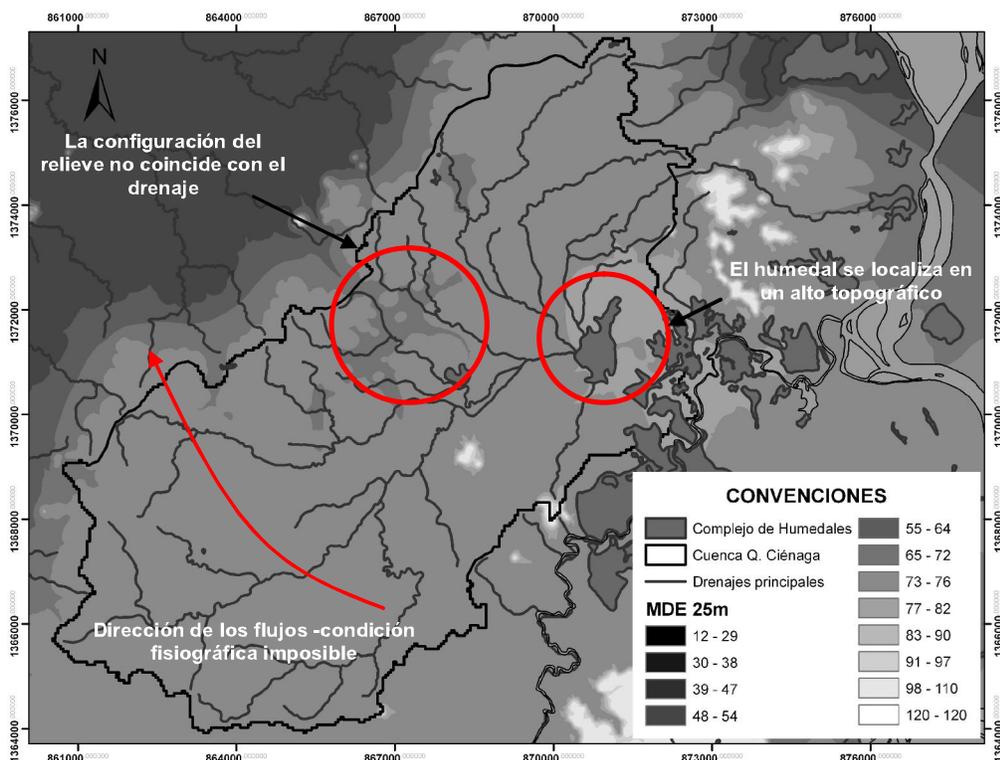


Figura 4. MDE obtenido a partir de la cartografía IGAC a escala 1:25.000, empleando la herramienta Topo to Raster.

Tabla 2. Puntos de elevación los principales afluentes de la Q. El Medio.

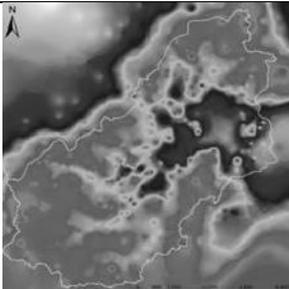
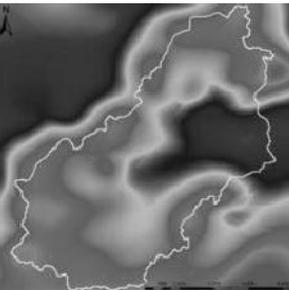
A1\_QM: Afluente Q. El Medio

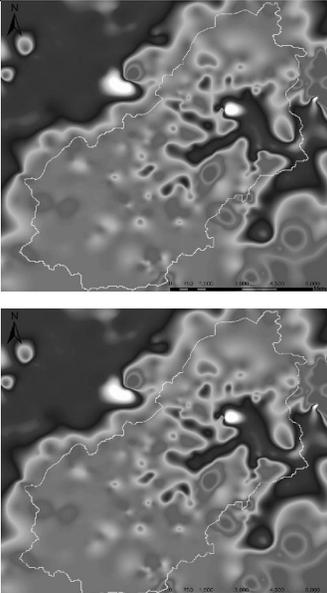
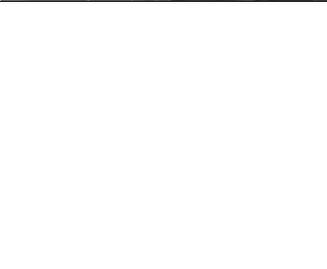
| ID | X           | Y            | Código | Altura |
|----|-------------|--------------|--------|--------|
| 1  | 860739.2520 | 1365673.1770 | A1 QM  | 80.00  |
| 2  | 862177.7502 | 1366165.5003 | A1 QM  | 75.00  |
| 3  | 862408.5440 | 1365953.8168 | A1 QM  | 74.00  |
| 4  | 863133.1690 | 1364761.6360 | A2 QM  | 75.00  |
| 5  | 863508.4347 | 1366156.8408 | A2 QM  | 72.00  |
| 6  | 862506.6290 | 1367851.9160 | A3 QM  | 80.00  |
| 7  | 863142.6606 | 1367204.9716 | A3 QM  | 75.00  |
| 8  | 864070.1600 | 1366941.0059 | A3 QM  | 70.00  |
| 9  | 864461.3370 | 1366789.9040 | A3 QM  | 68.00  |
| 10 | 865115.0800 | 1367843.5800 | A5 QM  | 70.00  |
| 11 | 865998.9190 | 1368250.3830 | A5 QM  | 65.00  |
| 12 | 866839.7700 | 1368685.1500 | A5 QM  | 60.00  |
| 13 | .           | .            | .      | .      |
| .  | .           | .            | .      | .      |
| n  | .           | .            | .      | .      |

### 3.3. Aplicación de técnicas de modelación espacial para la construcción del MDE

Con la "nueva información" y con la cartografía básica del IGAC, se exploraron las potencialidades de las herramientas geoespaciales disponibles en ArcGIS 9.2, con sus variantes y posibles combinaciones y se obtuvieron varios MDEs con resolución espacial de 10 m (escala 1:10.000) para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia (Tabla 3).

Tabla 3. Modelos Digitales de Elevación, MDEs, generados con el software ArcGIS 9.2

| Técnica Geoespacial                  | Resultado  | Observaciones   |
|--------------------------------------|--|---|
| Triangulated Irregular Network (TIN) |  | A pesar de mostrar una configuración hidráulica lógica del drenaje hacia las zonas bajas de acumulación (humedal Ciénaga Colombia), para algunas corrientes principales se identificaron para representar la dinámica de flujo.   |
| Inverse Distance Weighted (IDW) 10 m |  | Este resultado no logra representar una correspondencia entre la configuración fisiográfica y el drenaje principal.   |
| Geostatística (Kriging Ordinario)    |  | Se aplicó al conjunto de datos constituido por los 375 nuevos puntos de elevación definidos dentro de la metodología y, los generados a partir de la transformación de los contornos en puntos de control, con el objetivo de reforzar los contrastes altitudinales (1423 puntos). Se realizaron los respectivos análisis exploratorios, estructurales y de validación cruzada para definir que el mejor modelo que describe el relieve en la zona de estudio es un modelo de semivariograma teórico tipo Hole Effect con efecto pepita y anisotropía de 1.4343 de acuerdo con la Expresión (2).<br>$\gamma_{(z)} = 0.84762 \left( 1 - \frac{\text{sen}(h)}{h} \right) + 40.199 \quad (2)$ No obstante, como puede apreciarse este MDE no logra representar adecuadamente la dinámica hídrica de flujo entre las corrientes superficiales y humedal Ciénaga Colombia. |

| Técnica Geoespacial                 | Resultado  | Observaciones  |
|-------------------------------------|--|--|
| <p>Spline Regularized y Tension</p> |   | <p>Se realizaron numerosos ensayos variando los pesos y el número de puntos empleados en ambas opciones de interpolación. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, en tanto la superficie raster generada está fuertemente influenciada por los valores de los puntos empleados, generando altos y sumideros intermitentes que no permiten representar adecuadamente la configuración del relieve y la realidad hidráulica de la zona de estudio.</p>   |
| <p>Topo To Raster</p>               |  | <p>Finalmente, se realizaron ensayos con la herramienta <i>Topo To Raster</i>, desarrollada para la creación de MDE hidrológicamente correctos. Para este propósito, se emplearon las coberturas de la cartografía básica: contornos, redes de drenaje y cuerpos lénticos, reforzados con los nuevos puntos de elevación construidos para la zona de interés.</p> <p>Este modelo, logra representar mejor la realidad geomorfológica e hidrológica de la zona de estudio. Permitiendo identificar las principales corrientes que alimentan el humedal Ciénaga Colombia como principal zona de acumulación.</p> |

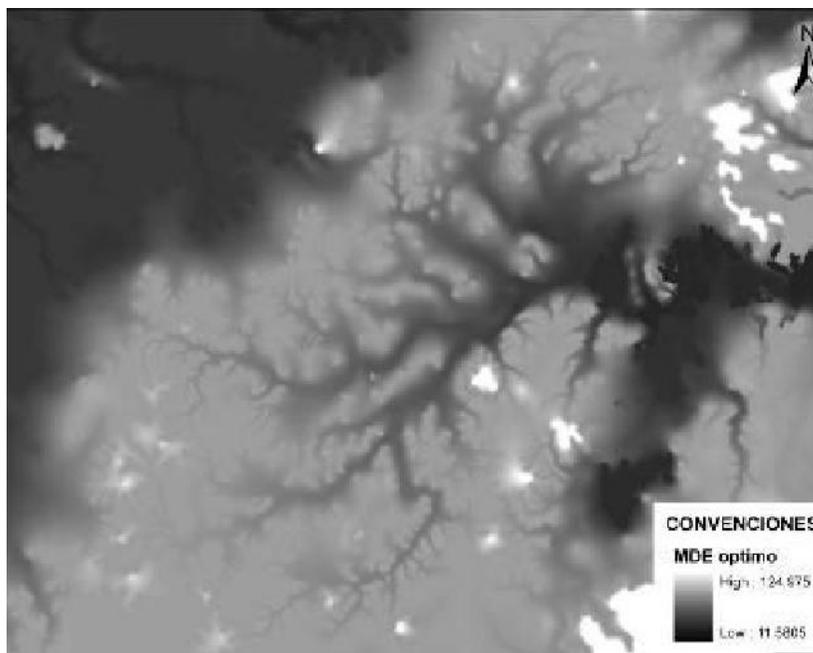
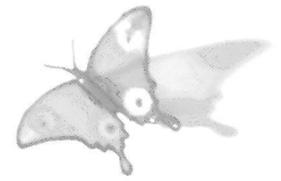


Figura 5. MDE escala 1:10.000 para la zona de captura de Ciénaga Colombia.

Finalmente, se seleccionó como modelo elegido el MDE que mejor representa la geomorfología, la dinámica de flujo de agua y las condiciones fisiográficas en la zona de estudio: el modelo obtenido mediante la herramienta Topo to Raster (Figura 5).

### 3.4. Verificación con control de campo

El MDE elegido fue verificado a partir de observaciones y toma de datos en campo durante las campañas de reconocimiento y monitoreo en el marco del proyecto "Hydrochemical and Isotopic techniques for the assessment of hydrological processes in the wetlands of Bajo Cauca Antioqueño" que adelanta actualmente la Universidad de Antioquia, en convenio con el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA.

## 4. DISCUSIÓN FINAL Y CONCLUSIONES

La construcción de un modelo hidrológico conceptual independiente de la escala necesita el conocimiento, análisis e interpretación de las características fisiográficas de la zona de estudio, con el objetivo de extraer información necesaria acerca del relieve, la configuración de la red de drenaje y características morfométricas, las posibles conexiones entre sistemas hídricos, la identificación de zonas de recarga y la interpretación de la dinámica de flujo en los sistemas subterráneos. Un insumo indispensable para obtener estos elementos lo constituye un MDE con adecuada resolución para los propósitos del estudio que se adelante (Figura 6). Dependiendo de la información de que se disponga, ese MDE encarna mayor o menor incertidumbre y en el ámbito de la investigación aplicada que se adelanta desde instituciones académicas, la mayoría de las veces sólo se cuenta con información secundaria y cartografía básica provista por el IGAC a escalas pequeñas para las metas de estudios locales. Los investigadores, cada día, se enfrentan al reto de obtener resultados con información escasa, recurriendo a sus conocimientos y creatividad para desarrollar metodologías de análisis con suficiente soporte conceptual para dar fuerza a los resultados. Adicionalmente, la observación y el control de campo se convierten en un elemento validador de ambos: metodologías y alcances.

Aquí se ha descrito y aplicado una propuesta para obtener un MDE en un área de 72 Km<sup>2</sup> para la construcción posterior de un modelo hidrológico en un entorno de humedales, en ciénaga Colombia, Bajo Cauca antioqueño. Entre las diferentes posibilidades de modelación espacial que ofrecen los programas para SIG, la opción Topo To Raster incluida en ArcGIS 9.2 proporcionó en este caso los mejores resultados al permitir combinar información correspondiente a puntos de altura, cotas de nivel, drenajes y cuerpos lénticos de agua.

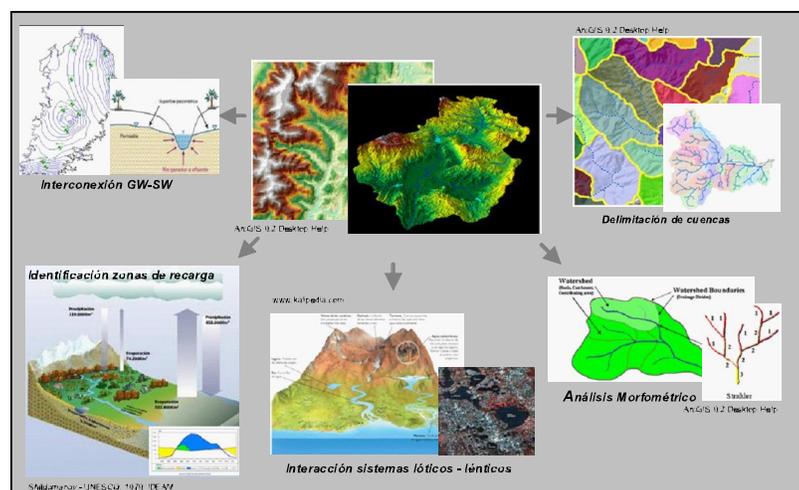


Figura 6. Utilidad del MDE en la construcción de modelos hidrológicos.

A cada momento surgen nuevas ideas, es más, hoy se sabe que no se puede hablar de resultados definitivos, si se logra acceder a más y mejor información, y mientras la tecnología avance y surjan nuevos equipos, técnicas, metodologías y software, se podrá obtener más y seguramente, mejores resultados. Sin embargo, para el caso particular de estudio en el que se quiere entender la dinámica de los flujos superficial y subterránea desde y hacia un humedal riveroño, los resultados obtenidos a partir de la metodología expuesta son satisfactorios: se logró una representación coherente del relieve y del sistema de drenaje superficial (Figura 5), de patrones de flujo subterránea, en épocas de sequía y lluvia, según la distribución piezométrica del acuífero libre como se muestra en la figura 7. Los resultados finales de varios proyectos de investigación en curso, como el del OIEA y los proyectos de Maestría que tienen que ver con la utilización de técnicas hidrogeoquímicas, isotópicas (Santa, 2008) y numéricas (Montoya, 2008), darán cuenta de la pertinencia del trabajo aquí presentado.

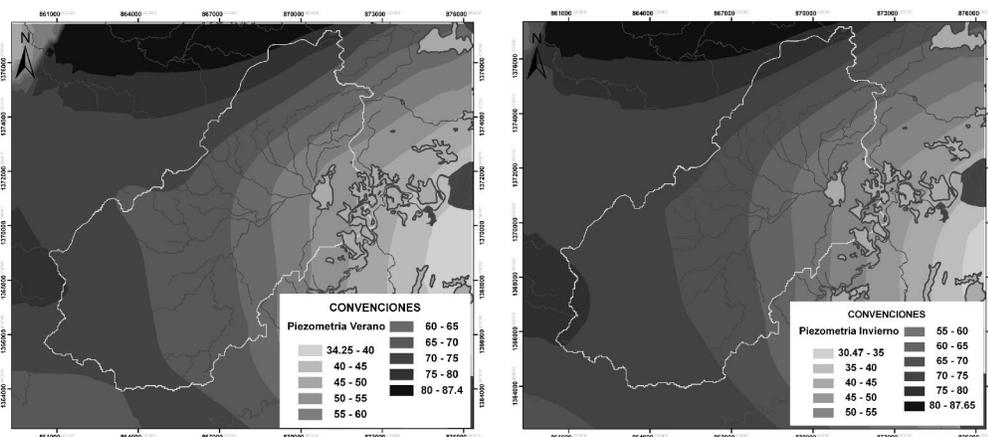


Figura 7. Superficie freática promedio verano (izq) e invierno (der) para la zona de captura del humedal Ciénaga Colombia.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a las entidades que han facilitado la información utilizada en la realización de este estudio: CORANTIOQUIA, Universidad de Antioquia y Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, y a las personas que han realizado aportes durante la adaptación y aplicación de esta metodología: Profesor Humberto Caballero Acosta de la Universidad Nacional y compañeros del grupo GIGA de la Universidad de Antioquia: John Fernando Escobar, Diana Santa, Carolina Martínez, Angélica Gómez, Jackeline Correa y Paola Palacio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arbiol, R., Castillo, M., et al, 1997. Radar para la generación de un DEM a partir de las imágenes. Comparación de la radargrametría y la interferometría de satélite. En VIII Simposium Latinoamericano de Percepción Remota, Venezuela, Resúmenes, pp. 112- 113.
- Betancur, T., 2008. Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: El Bajo Cauca antioqueño. Universidad de Antioquia. Medellín. 227 P.
- Betancur, T., 1996. Modelamiento de acuíferos utilizando sistemas de información geográfica para la región de Urabá. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 215 P.
- Bosque, J., 1992. Sistema de Información Geográfica. Ediciones Rialp S.A. Madrid. 49 P.
- Cheng, P., Toutin, T., et al, 1999. Automated DEM extraction from aerial photos or optical satellite

- images. En Thirteenth International Conference Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canadá, Proceedings, Vol. I, pp. 56- 63.
- CORANTIOQUIA y Universidad Nacional de Colombia., 2002. Memorias del mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA escala 1:100.000.
- Costa, C., Devoreux, B., et al, 1997. Aplicación de tecnología reciente en la construcción de modelos digitales de elevación a partir de estereopares SPOT: resultados en la isla de Creta. En VIII Simposium Latinoamericano de Percepción Remota, Venezuela, Resúmenes. pp. 445- 446.
- Felicísimo, A. M., 1994. Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. 122 P. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/>.
- Felicísimo, A. M., 1999. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico. 16 P. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/feli/>.
- García, J. y Hilacha, V., 1997. Evaluación de la precisión altimétrica en la generación de modelos digitales de elevación utilizando imágenes de RADARSAT. En VIII Simposium Latinoamericano de Percepción Remota, Venezuela, Resúmenes. 109 P.
- Guilarte, C., Astraín, P., et al, 1995. Tecnología para la creación del modelo digital del relieve y cálculo de los modelos digitales morfométricos. [inédito] Unión de Construcciones, EMPI.
- Harmar, O. and Clifford, N., 2007. Geomorphological explanation of the long profile of the lower Mississippi River. En: *Geomorphology* 84, pp. 222-240. Disponible en: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- Montoya, D., 2008. Modelo Conceptual y Numérico del sistema Hidrológico Ciénaga Colombia, Bajo Cauca antioqueño. Proyecto de Investigación Universidad de Antioquia. En ejecución.
- Polidori, L., Toutin, Th., y otros, 1998. Cartographie du relief par imagerie RADAR: l'état de l'art. *Bulletin SFPT* No. 152, 4 P.
- Quintero, D., 2008. Caracterización de la Cuenca del Humedal Ciénaga Colombia a partir de Información Secundaria y utilizando Herramientas Geoinformáticas. Universidad de Antioquia: Monografía. Medellín. 65 P.
- Santa, D., 2008. Identificación de interacciones hidrológicas entre el humedal Ciénaga Colombia y el acuífero libre del Bajo Cauca antioqueño, mediante la utilización de técnicas hidroquímicas. Proyecto de Investigación Universidad de Antioquia. En ejecución.
- Toutin, Th., 1995a. Radarsat for stereoscopy GIM Internacional.
- Toutin, Th., 1995b. Generating DEM from stereo images with a photogrammetric approach: examples with VIR and SAR data. *EARSeL Advances in Remote Sensing* Vol. 4, N° 2- X. pp.110-117.
- Toutin, Th., 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications En *Proceedings 2nd International ADRO Symposium*, Montreal Canada, CD-ROM
- Toutin, Th., y Cheng, P., 2001. DEM generation with ASTER Stereo Data. Disponible en: <http://www.eomonline.com/Common/currentissues/June01/thierry.htm>
- Uribe, J., 1996. Modelo digital de elevación a partir de curvas de nivel de una carta topográfica y su uso en geología. *Boletín SELPER*, Mexico No. 35, pp. 30-39.
- Vandenberghe, J. and Vanacker, V., 2008. Editorial: Towards a system approach in the study of river catchments. En *Geomorphology* 98. pp. 173- 175. Disponible en: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- Yumar, J. E., Martín, G., et al, 1997. Variante para la obtención del modelo digital del terreno a partir de fotografías aéreas. En VIII Simposium Latinoamericano de Percepción Remota, Venezuela, Resúmenes. 506 P.

