

# Relaciones entre la geomorfometría y las propiedades físicas de los suelos de la zona central del humedal la Florida

## Relationships between geomorphometry and the physical estates of the soils in the central area of wetland Florida

**José Miguel Cepeda Rendón\***  
Ingeniero Agrícola, Magíster en Ciencias Agrarias

**Adriana Patricia Restrepo Villamil**  
Ingeniera Topográfica, Especialista Gestión de Proyectos de Ingeniería

**Ximena Lozano Gómez**  
Ingeniera Topográfica

### RESUMEN

En el humedal la Florida en la localidad de Engativá (Cundinamarca) se realizó un levantamiento topográfico utilizando una grilla de 20 por 20 metros. Para el análisis geomorfométrico se parametrizaron las variables topográficas: gradiente de la pendiente a y b, pendiente, orientación y rugosidad. En cada punto de la grilla se efectuaron sondeos a 2 metros de profundidad y se midieron las propiedades físicas de los suelos: profundidad, color, estrato, textura, densidades aparente, densidad real y humedad. El análisis cualitativo de las interrelaciones permitió establecer que la migración de partículas finas origina variaciones en los valores de las propiedades físicas del suelo dependiendo de su posición topográfica o de la topografía preexistente en estos suelos de origen sedimentario.

**PALABRAS CLAVE:** humedal, geomorfometría, suelos, profundidad, color, estrato, textura, densidad aparente, densidad real, humedad, gradiente de la pendiente a y b, pendiente, orientación, rugosidad.

### ABSTRACT

In the Florida Wetland, in the town of Engativá Cundinamarca, an outside topographical study was taken that using a grid of 20 for 20 meters. The quantitative study of topography, the measurement and analysis of those of Landform characteristics or general geomorphometry includes: slope, slope gradient a, b, orientation and ruggedness. In each point of the grid auger holes were made to 2 meters deep, and the physical estates of the soils were measured: Depth, Color, Stratum, Texture, Bulk Density, Real Density and Humidity. The qualitative analysis of the interrelations, allowed establishing that the migration of fine particles, originates variations in the physical estates of the soil depending on its topographical position or of the early topography in these soils of sedimentary origin.

**KEYWORDS:** wetland, geomorphometry, soils, depth, color, stratum, texture, bulk density, real density, humidity, slope, slope gradient a, b, orientation, ruggedness.

\* Enviar correspondencia a José Miguel Cepeda: [Jcepeda@distrital.edu.co](mailto:Jcepeda@distrital.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

Las características genéticas de un suelo dependen de factores litológicos, climáticos, geomorfológicos y geomorfométricos; la importancia de cada uno de estos factores varía según la escuela, pero es claro que al estudiar la capacidad de un suelo habrá que considerar no solo el relieve sobre el cual se ha formado, sino, a la vez, cómo dicho relieve, por su configuración, incide sobre las capacidades potenciales del suelo. Se trata de una relación causa-efecto. Los mapas geomorfológicos constituyen la base para los levantamientos edafológicos; el principio consiste en efectuar un levantamiento geomorfológico de las unidades en que se desarrolla la edafogénesis; hacer luego un levantamiento edafológico sumario, fundamentado en el estudio estructural y morfológico de los suelos, y los análisis clásicos de laboratorio en número más restringido que el que efectúan los edafólogos (Tricart, 1969). El análisis cuantitativo de la super-

ficie del terreno, o geomorfometría, permite la obtención de modelos digitales de la elevación del terreno (MDT) (Pike, 2000).

## 2. ASPECTOS GENERALES DEL HUMEDAL DE LA FLORIDA

El humedal se encuentra localizado sobre 4°44'0" de latitud Norte y 74°08'43" de longitud Oeste, sobre el extremo noroccidental del límite urbano de la ciudad de Bogotá, y hace parte del sistema de humedales asociados al valle aluvial del río Bogotá (figura 1). Posee una extensión de 93 ha. Se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 2.540 m, temperatura de 13°C, los valores promedio de precipitación y humedad relativa son 710 mm/año y 78%, respectivamente. Se encuentra fuera del perímetro del Distrito Capital pero su manejo le corresponde al DAMA porque el predio es propiedad de la ciudad.

Figura 1. Ubicación del humedal de la Florida respecto al río Bogotá.



## 3. GEOMORFOMETRÍA

La geomorfología cuantitativa, o geomorfometría, es una herramienta para los estudios basados en el análisis de campo (topografía) y la modelación física de los procesos geomorfológicos. El análisis geomorfométrico permite obtener una medida de la forma del paisaje

si se toman en cuenta los diversos fenómenos endógenos y los subsiguientes procesos de erosión de las superficies topográficas.

### 3.1. Variables topográficas

Las variables topográficas permiten la descripción del relieve a partir de un conjunto de medidas que definen las características geomé-

tricas del terreno a diferentes escalas, proceso conocido como la parametrización del relieve o la descripción numérica de las formas topográficas. Los parámetros pueden ser descriptores globales o locales. Los descriptores locales aportan un conjunto de datos que pueden analizarse con el mismo nivel de resolución que el original; los parámetros deben tener relación con los procesos geomorfológicos que modelan el relieve; el conjunto de parámetros no debe proporcionar información redundante, deben medir características distintas. Existen varias propuestas sobre las variables que se deben incluir en la parametrización del relieve, la menos discutida es la pendiente, aunque se usan con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura (Weibel y Heller, 1991).

Florinsky (1998) menciona cinco parámetros básicos: pendiente, gradiente de la pendiente, orientación, curvatura y rugosidad. Estas variables pueden ser modelos digitales derivados con la misma resolución que el MDT original, lo cual permitirá el análisis multivariado del relieve, teniendo en cuenta de manera simultánea la totalidad de los descriptores topográficos.

### 3.1.1 El gradiente

El gradiente de la pendiente de una función lo determina la dirección en que la función presenta su mayor tasa de variación; en un modelo topográfico la dirección en la cual Z es máxima, está dada por el gradiente de la pendiente  $\nabla f(x, y)$  y apunta en la dirección del mayor declive. La pendiente o inclinación es máxima en la dirección del gradiente de la pendiente (figura 2).

En un modelo digital de elevación, la altitud en el entorno inmediato de un punto puede describirse de forma aproximada mediante un plano de ajuste, cuyo modelo es:

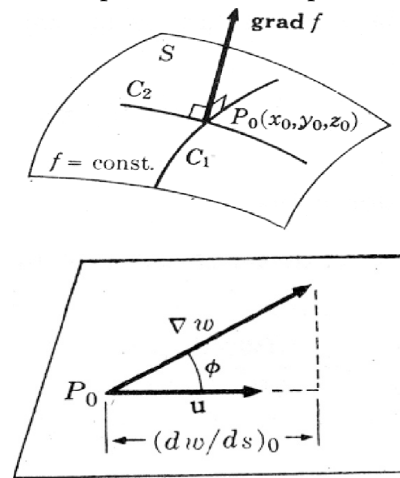
$$Z = ax + by + c$$

donde los coeficientes a y b representan las primeras derivadas parciales de la altitud con respecto a los ejes X y Y

$$a = \delta z / \delta x; b = \delta z / \delta y$$

donde a y b representan la tasa de cambio de la altitud respecto a los ejes X y Y; a estos valores se les ha llamado gradiente de la pendiente de Z en los puntos (x, y) (Muñoz, 1999).

**Figura 2.** Esquema del gradiente de la pendiente en un punto.

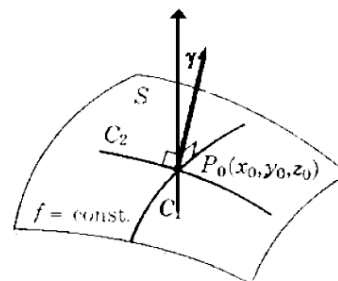


### 3.1.2 La pendiente

Se define como el ángulo que existe entre el vector normal a la superficie en el punto considerado y la vertical (figura 3). La pendiente  $\gamma$  se puede calcular a partir de los componentes del gradiente mediante la expresión:

$$\gamma = \tan^{-1} (a^2 + b^2)^{1/2}$$

**Figura 3.** Esquema de la pendiente en un punto.



Dada la expresión del gradiente, el valor de  $\gamma$  refleja la pendiente media en el entorno utilizado para calcular los componentes a y b. Esta expresión es la más común en los modelos matriciales, pero para los modelos vectoriales la pendiente  $\gamma$  se determina en función de los puntos vecinos limitados por un radio de cobertura (Muñoz, 1999).

Para el cálculo de la pendiente existe un buen número de alternativas cuyas ventajas y problemas se deben evaluar en cada caso y para cada aplicación. Los métodos más habituales se clasifican en función del número de puntos que intervienen en el cálculo:

a) Con dos puntos: la pendiente máxima al vecino más próximo, para lo cual se calcula la pendiente local entre el punto problema y sus vecinos; es el algoritmo más rápido, no da una medida de la orientación y propone los valores de pendiente más elevados. En este último caso:

$$\gamma = \max \left[ \operatorname{tg}^{-1} \frac{z_{i+m,j+n} - z_{i,j}}{d} \right] \text{ donde}$$

$$m = (-1,0,+1) \quad \text{y} \quad d = \begin{cases} 1 & \text{si } m \cdot n = 0 \\ \sqrt{2} & \text{si } m \cdot n \neq 0 \end{cases}$$

b) Con tres puntos: el uso del punto problema y de los vecinos Norte y Este para definir un plano. La pendiente de este se asigna al punto problema. La selección de los vecinos mencionados es arbitraria y cambiarlos puede modificar el resultado tanto de la pendiente como de la orientación. La formulación sería equivalente a la expresión general, donde los componentes del gradiente son locales:

$$\gamma = \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{(z_{i,j+1} - z_{i,j})^2 + (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2}$$

c) Con cuatro puntos: utiliza los valores del gradiente calculados con los 4 vecinos más próximos, lo que equivale a estimar la pendiente del plano de ajuste a estos puntos. El punto problema no interviene en el cálculo.

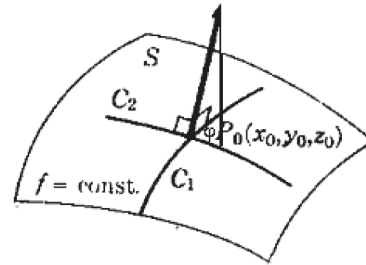
d) Con ocho puntos: se propone el operador de Prewitt para estimar la pendiente, con lo que los ocho vecinos tienen el mismo peso en el cálculo del gradiente.

El uso de cualquiera de los métodos anteriores debe valorarse en función del tipo de aplicación a desarrollar posteriormente. Los algoritmos basados en la pendiente local tienen a su favor que no introducen suavización en los datos como los basados en 4 y 8 puntos. El uso de solo 4 vecinos no tiene justificación aparente y parece más adecuada la búsqueda de pendiente máxima con la totalidad de vecinos con control de la distancia en el caso de las diagonales. Los métodos basados en operadores de Prewitt y Sobel son menos sensibles al error en el MDE ya que, al intervenir un número elevado de puntos, las posibles desviaciones individuales pierden peso y pueden compensarse parcialmente entre ellas.

### 3.1.3 La orientación

De un punto se define como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto (figura 4)

Figura 4. Esquema de la orientación en un punto.



Como en el caso de la pendiente, el valor de orientación se estima directamente a partir de los valores del gradiente:

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} (a / b)$$

### 3.1.4 La curvatura

En un punto  $z$ , se define como la tasa de cambio en la pendiente y depende, por tanto, de las derivadas de segundo grado de la altitud,

o sea, de los cambios de pendiente en el entorno del punto.

Para el cálculo de las derivadas de segundo grado no es posible utilizar la aproximación simple empleada en la estimación de la pendiente y orientación, basada en un plano de ajuste. En este caso se utiliza una superficie de ajuste de segundo grado de acuerdo con la expresión general

$$z = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$$

Para simplificar, se representa el punto problema y sus vecinos con la notación que se muestra en la tabla 1. En el caso concreto de la ventana de 3 x 3 centrada en el punto problema, los coeficientes de la ecuación cuadrática (Evans, 1972) se calculan mediante las expresiones siguientes:

**Tabla 1.** Representación del punto en estudio y sus vecinos.

Z1	Z2	Z3
Z4	Z5	Z6
Z7	Z8	Z9

$$f = (2(z_2+z_4+z_6+z_8)-(z_1+z_3+z_7+z_9)+5z_5)/9$$

$$d = (z_3+z_6+z_9-z_1-z_4-z_7)/6d$$

$$e = (z_1+z_2+z_3-z_7-z_8-z_9)/6d$$

$$b = (z_3+z_7-z_1-z_9)/4d^2$$

$$a = (z_1+z_3+z_4+z_6+z_7+z_9)/6d^2 - (z_2+z_5+z_8)/3d^2$$

$$c = (z_1+z_2+z_3+z_7+z_8+z_9)/6d^2 - (z_4+z_5+z_6)/3d^2$$

En la curvatura media,  $h$ , se mide la concavidad/convexidad general de la forma definida por el punto problema y sus 8 vecinos (tabla 1).

Una expresión simple para el cálculo ha sido propuesta por Papo y Cuevas (1984), mediante la suma de las derivadas parciales de segundo orden con respecto a los ejes X y Y, de la forma siguiente:

$$\eta = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

Sustituyendo las segundas derivadas se tiene que

$$\eta_L = 2(a + c)$$

La curvatura media puede separarse en dos componentes ortogonales: la curvatura longitudinal  $h_L$  que mide la concavidad/convexidad en el sentido de la máxima pendiente, y la curvatura transversal  $h_T$ , normal a la anterior. Wood (1996) plantea las siguientes expresiones para su cálculo:

$$\eta_L = -2 \cdot ad^2 + c^2 + bde$$

$$\eta_T = -2 \cdot ad^2 + c^2 - bde$$

Puede observarse que sumando  $\eta_L$  y  $\eta_T$  se obtiene un nuevo  $\eta$ ; si es negativa existe una concavidad; de lo contrario la curvatura es convexa.

### 3.1.5 La rugosidad

Al contrario de lo que ocurre con la pendiente, la orientación y la curvatura, no existen criterios uniformes para llevar a cabo la medida de la rugosidad (figura 5). Se han aplicado métodos significativamente distintos para su evaluación; por ejemplo, se utiliza la pendiente media como estimador de un factor de rugosidad. Evans (1972) realiza una revisión de métodos, entre los cuales menciona desde rangos de altitud hasta la desviación estándar de la elevación en entornos limitados. Hobson (1972) propone que, dado un punto del terreno, se calculen los vectores unitarios perpendiculares a la superficie en él y en los puntos de su entorno. Si el terreno es uniforme la suma vectorial será elevada y la dispersión baja; en el caso de terrenos rugosos, con cambios en orientaciones y pendientes, la suma vectorial será pequeña y la dispersión elevada. Las estimaciones de la rugosidad deben ser independientes de otros parámetros del relieve para reducir la información redundante (Franklin, 1987).

La independencia de la escala del análisis elimina algunas aproximaciones excesivamente simples como las que usan el rango de altitud. Una variante del método de Hobson

es la siguiente: se calculan los vectores normales a los segmentos que conectan al punto problema y sus vecinos más próximos. Para ello se calcula la pendiente local  $\gamma_i$  y se le asigna la orientación que le corresponda determinada por la posición del punto (tabla 2).

**Tabla 2. Representación del punto en estudio y sus vecinos en la rugosidad.**

	(Z1-Z5)/1,414d	(Z2-Z5)/d	(Z1-Z5)/1,414d
Pendiente	(Z4-Z5)/d		(Z6-Z5)/d
	(Z7-Z5)/1,414d	(Z8-Z5)/d	(Z9-Z5)/1,414d
	315°	0°	45°
Orientación	270°		90°
	225°	180°	135°

Luego a partir de los vectores resultantes, definidos por sus valores, se calculan las coordenadas rectangulares del vector unitario normal a cada uno de ellos. Las expresiones son:  $x_i = \text{sen } \gamma_i \cdot \text{cos } \phi_i$   $z_i = \text{cos } \gamma_i$ . Posteriormente se calcula el módulo del vector suma de los vectores unitarios,  $R$ :

$$R = \sqrt{(\sum x_i)^2 + (\sum y_i)^2 + (\sum z_i)^2}$$

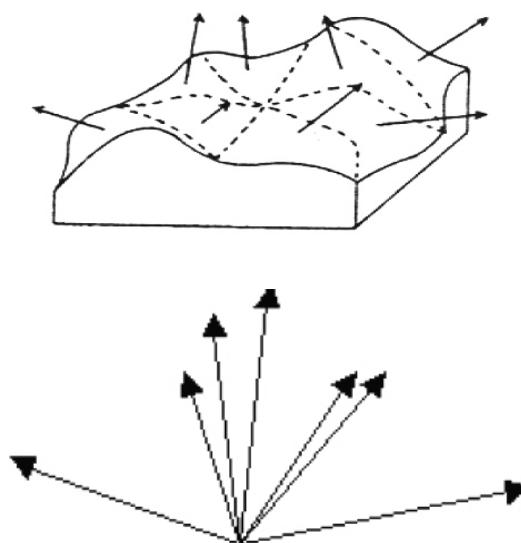
Por último se calcula la varianza esférica,  $\vartheta$ , como el complementario del módulo medio  $\bar{R}$ , que es el módulo del vector suma

normalizado al dividirlo por el número de vectores unitarios (Band, 1989: 286):

$$\vartheta = 1 - \bar{R} = 1 - \frac{R}{n}$$

La varianza esférica tendrá el valor cero para una rugosidad nula (alineamiento completo de los vectores unitarios) y tenderá a la unidad según se incrementa la rugosidad y, consecuentemente, la dispersión de los vectores unitarios.

**Figura 5. Esquema de la rugosidad en un punto.**



## 4. LOS HUMEDALES

**Figura 6. Panorámica del sector central del humedal de la Florida.**



Un ecosistema llega a ser un humedal cuando la inundación por agua produce suelos dominados por procesos anaeróbicos y obliga a la biota, particularmente a las plantas de raíces, a realizar adaptaciones para tolerar el flujo (Cowardin et ál., 1979). La amplitud de esta definición incluye desde el bosque de pantanos tropicales hasta las tierras de turba subárticas, tiene una estructura compleja, una causa: la inundación por agua; un efecto aproximado: la reducción de los niveles de oxígeno en el suelo, y un efecto secundario: la biota debe tolerar tanto los efectos directos del flujo como los efectos secundarios de las condiciones anaeróbicas.

El Comité de Caracterización de Humedales de los Estados Unidos, en 1998, desarrolló, para establecer fuera de cualquier agencia individual de legislación o regulación, una definición de los humedales: "Un humedal es un ecosistema que depende de la inundación constante o recurrente, superficial (poco profunda) o saturada de la superficie del sustrato. Las características mínimas esenciales de un humedal son la inundación recurrente o sostenida o la saturación en o próxima a la superficie, y la presencia de rasgos físicos, químicos y biológicos, reflejo de la inundación o la saturación sostenida o recurrente. Los rasgos de diagnóstico comunes de los humedales son los suelos hídricos y la vegetación hidrofítica. Estos rasgos deberán estar presentes excepto donde los factores físico-químicos, bióticos o antropogénicos han sido removidos, o impiden su desarrollo".

#### 4.1 Geomorfología

Se refiere tanto a las unidades de paisaje como al relieve de estas, juega un papel principal en la hidrología y la ecología del humedal dentro de una región climática particular. Abarca la forma, el tamaño y la localización de los humedales en el paisaje. La morfología de cuencas o humedales individuales influye la profundidad de flujo, así como también el hidropérido, el cual se refiere a la frecuencia y duración

del flujo. La geomorfología del paisaje circundante ejerce una fuerte influencia sobre las conexiones del agua superficial y subsuperficial entre el humedal y los ecosistemas acuáticos y terrestres adyacentes.

La influencia geomorfológica sobre el funcionamiento del humedal se manifiesta en la localización de este en el paisaje. La posición de un humedal en el paisaje puede tener un efecto significativo sobre la calidad regional del agua, mediante la extensión y el control del tipo de interacción con la superficie y los flujos del agua del suelo con el agua represada. En general, los humedales se pueden agrupar, de acuerdo con su posición en el paisaje, como humedales de depresión, reparadores y marginales (De Busk, 1999).

### 5. MARCO METODOLÓGICO

El estudio se realizó en la zona centro del humedal de la Florida ubicado en la localidad de Engativá; geográficamente el humedal se localiza a 4°44'0" de latitud Norte y 74°08'43" de longitud Oeste y con una altitud de 2.546 m sobre el nivel medio del mar. El lugar presenta una precipitación promedio anual de 840 mm, temperatura media de 14°C, la humedad relativa promedio es de 79,8%, la evaporación es de 1.069 mm promedio anual, la evapotranspiración potencial es de 802 mm y la velocidad del viento de 2,2 m/s (Gómez y Cajiao, 1995). El trabajo se dividió en tres fases: topografía, batimetría, muestreo de suelos.

#### 5.1 Topografía

El levantamiento en forma de grilla se debe a la naturaleza y fin del trabajo; de esta manera, eventualmente, permitirá en estudios futuros determinar las líneas de flujo del agua subterránea. La nomenclatura usada en la grilla o cuadrícula tiene como fin identificar cada una de las intersecciones, para lo cual las líneas orientadas al Norte se nombraron con la letra N y se numeraron de 30 a 62, y las líneas

orientadas al Este se denominaron con la letra E y se enumeraron de 4 a 14, considerando un espaciamiento de 40 m entre líneas; con la letra "a" se denominaron las distancias intermedias de 20 m, de manera que la identificación de los puntos de intersección toma la forma N31-E4; N31a-E4; N35-E4, en el sentido sur-norte, indicando que se mantiene constante la posición respecto al Este. En el sentido este-oeste, la nomenclatura toma la forma N31-E4; N31-E4a; N31-E5; indicando que se mantiene constante la posición respecto al Norte. Esta designación de los puntos de intersección fue previa al levantamiento topográfico. La zona centro del humedal comprende las líneas N30 hasta N62 y desde la E4 hasta la E10, en la orilla este. Y para la oeste, se desarrollan las líneas N30 hasta N55a y desde E10 hasta E14a, respectivamente.

Para la materialización de la grilla (20m \* 20m) se trasladaron coordenadas desde los vértices NPCD419A y CD420A, hasta la zona central del humedal de la Florida por medio de una poligonal cerrada con el método de ceros atrás.

Posteriormente, por el método de radiación y teniendo calculados los ángulos y distancias, desde los deltas de la poligonal se localizaron y materializaron los puntos de intersección de la grilla cada 20 metros, teniendo en cuenta que la ronda legal del humedal son 30 metros (decreto ley 2811 de 1974) desde el cuerpo de agua.

## 5.2 Suelos

Los sondeos se realizaron con un barreno manual de una pulgada de diámetro. La determinación del espesor de cada uno de los estratos se realizó por medio de la diferenciación de colores (cartas de Munsell), puesto que su cambio determina condiciones de estratificación. Una vez identificado el estrato, se describen los redoximorfismos, como masas de hierro (IM), masas de manganeso (MN) y oxidación de raíces (IP). La determinación de suelos hídricos se realizó por estrato, por medio de la aplicación

del reactivo alfaalfadipiridyl, consignando tanto la reacción como el nivel de intensidad de esta que permitirá realizar la clasificación taxonómica del suelo. Una vez clasificado y descrito el perfil, se empacan aproximadamente 2 kg de muestra para la determinación de las propiedades físicas de cada uno de los estratos.

### 5.2.1. Propiedades evaluadas para los suelos del humedal de la Florida.

Variable	Método
Color	Tabla de Munsell
Textura	Bouyoucos
Densidad aparente	Terrón con parafina
Densidad real	Picnómetros
Presencia radical y profundidad efectiva	Medidas de campo
Infiltración	Cilindros
Nivel freático	Pozos de observación
Clasificación taxonómica	USDA
Alfaalfadipiridyl	Reducción férrica

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, comprenden la determinación de la planimetría, altimetría, la parametrización de las variables topográficas, la caracterización y georreferenciación de las propiedades físicas de los suelos, su clasificación taxonómica y el análisis de la interacción entre dichos parámetros y propiedades.

### 6.1 Planimetría y altimetría

La descripción planimétrica de la zona central del humedal de la Florida incluye la determinación de las diferentes áreas: legal, morfológica (cuenca) y de influencia. La descripción altimétrica permite el análisis de



las cotas, orillas de lago y cuenca generada por el cuerpo de agua. Lo anterior permite el análisis de la orientación geográfica de la zona central y su influencia en el estado actual de este ecosistema anfibio.

La zona central del humedal de la Florida se encuentra comprendida entre las coordenadas (origen Bogotá) N 114953,79; E 91907,039 y N 116524,52; E 92043,25; las alturas varían entre 2.542,26 y 2.547,59 en la porción terrestre. En el cuerpo de agua se encuentran profundidades de 3,5 m hasta 4,0 m.

Con base en los diferentes datos obtenidos se definieron las siguientes áreas: área según cuenca = 438, ha; área según los límites actuales con los vecinos 285,6, ha; área del espejo = 248,9 ha; área de la porción terrestre = 43,9 ha; área según la ronda legal = 292,9 ha.

El reconocimiento del área de estudio permitió establecer la presencia de cultivos comerciales, explotaciones ganaderas y construcciones que limitan la ronda a 10 m, cuando legalmente esta debe ser de 30 m según el decreto ley 2811 de 1974 (tabla 3).

**Tabla 3.** Distribución porcentual de la invasión de la ronda en las orillas izquierda y derecha.

Ocupación	Orilla derecha (E) (%)	Ronda (m)	Orilla derecha (E) (%)	Ronda (m)
Cultivos	48	0 - 4	75	0 - 10
Construcciones	38	0 - 4	6	0 - 3
Ganadería	13	0 - 2	17	0 - 2
Reforestación	1	0 - 2	2	0

Los sectores norte y centro del humedal se encuentran separados artificialmente por un carretable que se convierte en una presa, la cual impide la comunicación natural de aquellos.

El borde del cuerpo de agua de la zona central tiene como cota máxima 2.547,59 m y como cota mínima 2.542,45 m para una diferencia de niveles de 5,24 m en una longitud de 769 m en el sentido norte-sur para una pendiente del 0,68%. El azimut verdadero comprendido por la ubicación de los puntos de cota máxima y mínima es de 5° 40". Dicha orientación indica una altura superior en la orilla este, sector donde se encuentran concentradas varias explotaciones de flores. La na-

tural susceptibilidad de dicho sector a las inundaciones explica la construcción de un jarillón que tiene 4 m de altura y 600 m de longitud.

En la orilla este, desde el nivel del agua hasta la parte superior de la cuenca originada por el humedal, la cota máxima es 2.547,05 m y la mínima 2.543,92 m en una longitud de 154 m, generando un gradiente topográfico del 2%, que para el flujo de la escorrentía es un valor grande, el cual al combinarse con los suelos permanentemente desnudos y bajo frecuente laboreo agrícola, explica la erosión presentada en este sector (figura 7) y la correspondiente acumulación de sedimentos que se presenta en los cambios de dirección y la presa originada por el carretable.

**Figura 7.** Erosión en surcos, típica de la orilla este.



## 6.2. Aspectos geomorfométricos

La descripción geomorfométrica del relieve de la zona central del humedal de la Florida incluye la parametrización de las variables topográficas: a) gradiente de la pendiente, b) pendiente, c) orientación, d) curvatura y e) rugosidad, en las líneas que conforman la grilla construida en el sector central.

Para el análisis geomorfométrico, en la zona central del humedal de la Florida se construyó una cuadrícula de 20 m x 20 m, perpendicular al eje de flujo del río Bogotá, de acuerdo con las normas para la construcción de redes de flujo en cuencas cerradas, citadas por Richardson (2001).

### 6.2.1 Gradiente de la pendiente

Los valores correspondientes al gradiente de la pendiente, según las líneas analizadas de la

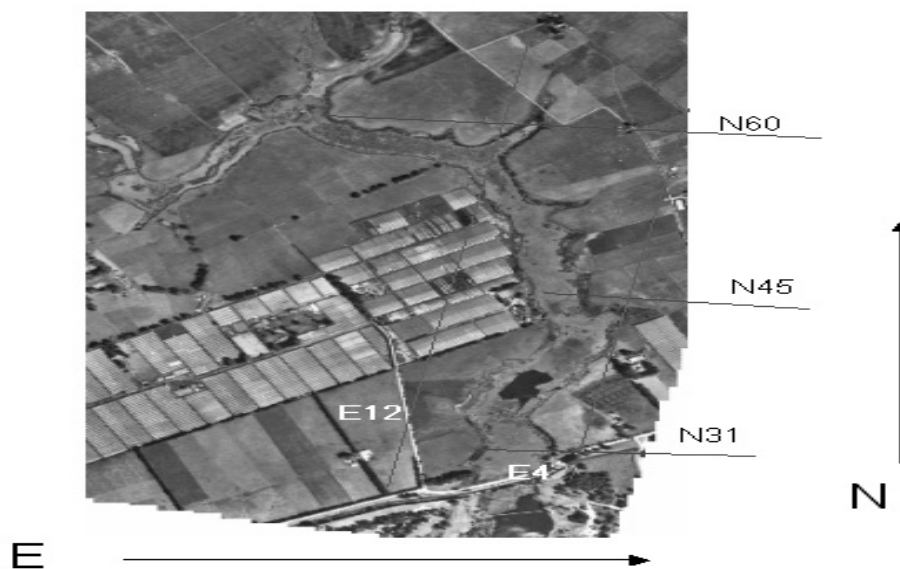
cuadrícula, comprenden la tasa de cambio de la altitud con respecto al eje X (a) y la tasa de cambio con respecto al eje Y (b).

Para analizar el comportamiento del gradiente de la pendiente, la zona centro del humedal de la Florida se dividió en tres sectores (norte, centro y sur) en las orillas este y oeste. El estudio se realizó longitudinalmente, sobre las líneas de la grilla, así:

**Tabla 4.** Distribución y número de líneas utilizadas en el análisis geomorfométrico.

Orilla	Sector	No. líneas
Este	Norte	10
	Centro	9
	Sur	15
Oeste	Norte	15
	Centro	9
	Sur	10

**Figura 8.** Ortofoto con la descripción de la nomenclatura de la grilla del humedal.



Los valores correspondientes al gradiente de la pendiente se obtuvieron a partir de las funciones generadas por los componentes X, Y y Z (coordenadas y cota), de los pun-

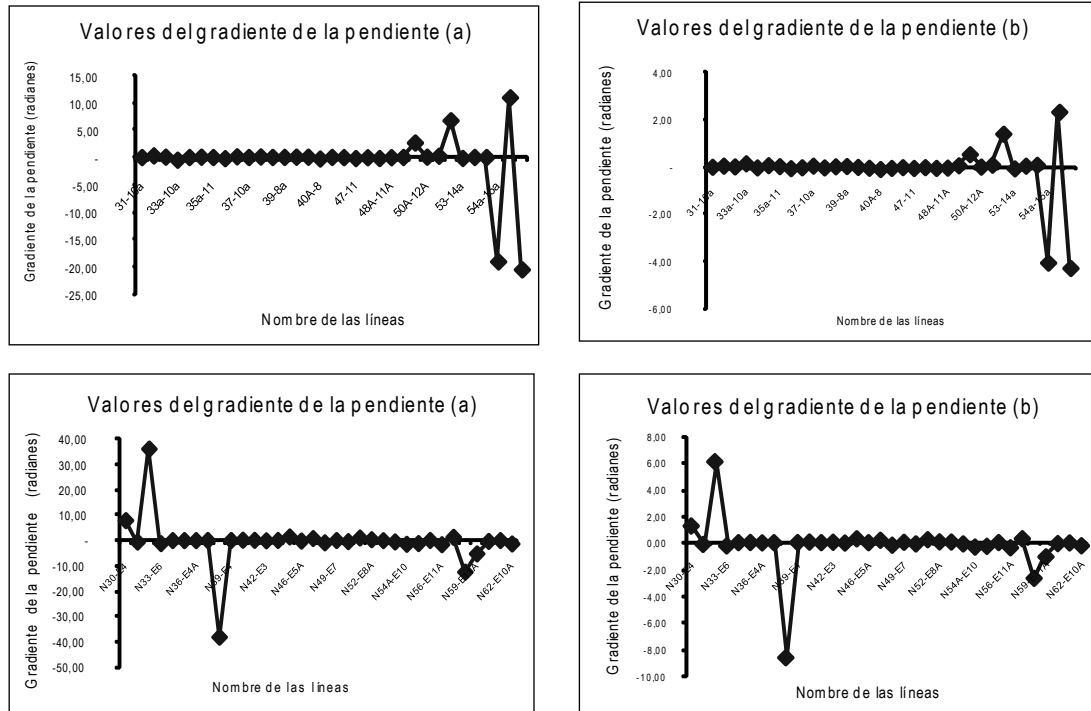
tos que conforman las líneas de la grilla, y las ecuaciones  $z = ax + by + c$  con los valores de a, b y c. Al analizar el comportamiento de los valores del gradiente de la pendiente, tanto

en sus componentes a como b para las orillas oeste y este, se tiene que los dos componentes presentan una tendencia similar.

La tendencia general, desarrollada por el gradiente de la pendiente en el sentido X (a)

y Y (b), es idéntica para las respectivas orillas. A pesar de la amplitud en la diferencia de los valores de cada componente, el patrón de comportamiento es el mismo independientemente de la escala de la gráfica.

**Gráfica 1. Gradiente de la pendiente en las orillas oeste y este.**

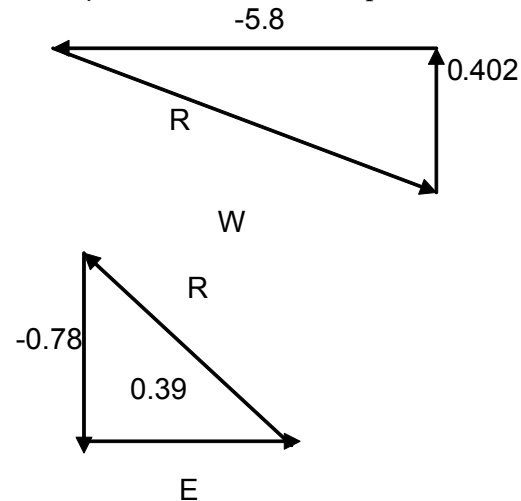


Los valores calculados para el gradiente de la pendiente componente a en la orilla oeste (w) presentan como valor máximo 10,8, como valor menor -20,4, con un valor promedio de -5,8. El componente b de la orilla oeste (w) presenta como mayor valor 2,3 y menor -4,3, con un valor promedio de 4,02.

La orilla tiene como mayor valor 36,15 y como menor valor -38,22, con un valor promedio de 0,39 para toda la orilla.

La suma vectorial de los componentes a y b del gradiente de la pendiente muestra que la resultante tiene la dirección de la orilla correspondiente, y es mayor en la orilla oeste a causa de la gran pendiente del jarillón.

**Gráfica 2. Resultante de la suma vectorial de a y b en las orillas correspondientes.**

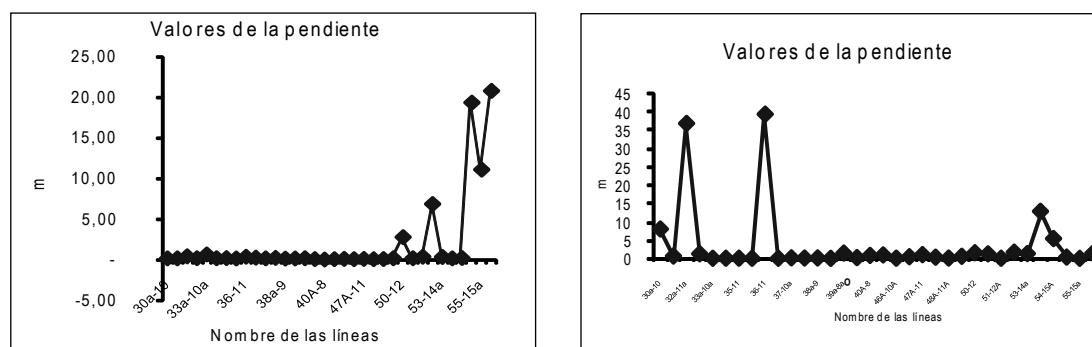


### 6.2.2 Pendiente

La pendiente está definida como el ángulo comprendido entre el vector normal a la su-

perficie en ese punto y la vertical, y se calculó a partir de la ecuación  $\gamma = \text{tg}^{-1} (a_2 + b_2)^{1/2}$ .

**Gráfica 3. Valores de la pendiente por orilla y por líneas.**



En la gráfica 3 se presentan los resultados correspondientes al valor de la pendiente en cada línea y en cada orilla este – oeste. Los valores de pendiente obtenidos están entre 40 y 0 grados para la orilla este, con un valor promedio de 11,33, y entre 20 y -0,12 para la orilla oeste, con un valor promedio de 3,5. El valor más bajo de la pendiente presentado por la orilla oeste es causado por la presencia del jarillón artificial, que interrumpe el flujo natural del terreno hacia el espejo de agua.

En términos generales, la tendencia de la pendiente de las líneas que conforman la grilla de estudio es la misma, como se puede apreciar en la gráfica 3; si bien con valores distintos, la forma de las curvas es similar si se aprecian en valor absoluto. Es de anotar que las dos orillas son simétricas, pero la presencia del jarillón altera dicha característica y presenta valores mucho más bajos ocasionados por su talud.

La orilla este tiene un valor promedio más alto que la oeste, lo cual explica la ocurrencia del fenómeno de erosión en la orilla este.

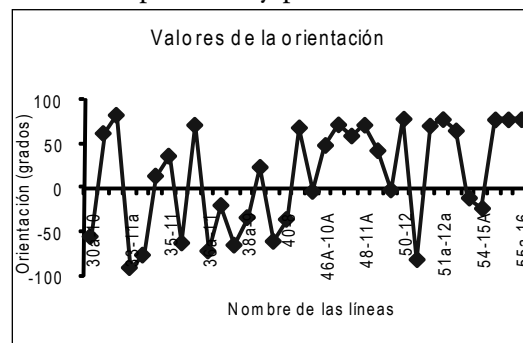
### 6.2.3 Orientación

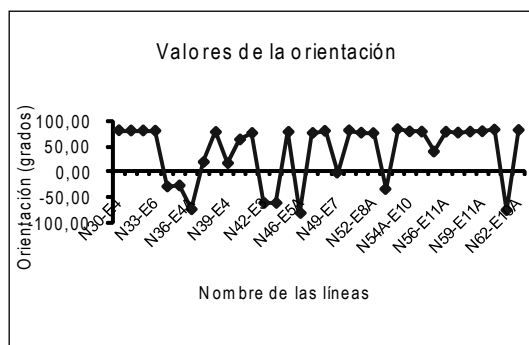
La orientación se calculó para cada punto con el ángulo comprendido entre la orilla norte y

la proyección del vector normal al punto sobre la horizontal con la siguiente expresión  $\varphi = \text{tg}^{-1}(a/b)^{1/2}$ .

Los valores obtenidos para la orilla oeste fluctuaron entre 89 y -80 grados; para la orilla este el valor predominante fue de 80 grados. La orientación de los puntos muestra las irregularidades microtopográficas presentadas por el terreno, originadas por las diferentes orientaciones que presenta cada punto, como en el caso de la orilla oeste donde la alternancia de valores positivos y negativos en la zona sur del sector central, como puede apreciarse en la siguiente gráfica.

**Gráfica 4. Valores de la orientación por orilla y por líneas.**





### 6.2.4 Curvatura

La curvatura se define como la tasa de variación de la pendiente de un punto con respecto a sus vecinos.

El valor promedio de la curvatura para la zona central es de  $-3,98$ , que de acuerdo con la convención para curvatura corresponde a una concavidad.

Es de anotar que en razón a la extensión del área de estudio y a que esta corresponde a la parte baja de la cuenca generada por el humedal, el valor promedio de la curvatura calculada es representativo de dicha área.

### 6.2.5 Rugosidad

Para el cálculo de la rugosidad se determinaron los vectores unitarios normales a la superficie en cada uno de los ocho vecinos del punto considerado. La cantidad de dispersión de dichos vectores, designada como varianza esférica, mide la variabilidad de la superficie de manera que si el valor tiende a cero la rugosidad se considerará nula, y tenderá a uno a medida que se incrementa la rugosidad.

Los valores de rugosidad obtenidos para la zona de estudio variaron entre  $0,03744514$  y  $0,64326585$ , corresponden a una varianza esférica de  $0,99531936$  y  $0,91924574$  respectivamente. Por lo anterior, el parámetro rugosidad corresponde a una clasificación cualitativa de terreno rugoso.

Se debe tener en cuenta que los valores obtenidos están afectados por la activi-

dad agrícola desarrollada en el área de ronda, más aun cuando se trata del cultivo de papa que se caracteriza por los altos surcos necesarios para su cosecha; por esta razón los valores obtenidos no corresponden a la dinámica de este ecosistema.

## 6.3 Identificación y clasificación de suelos

La identificación y clasificación de suelos de la zona central del humedal de la Florida comprende sondeos en algunos puntos de la grilla localizados sobre líneas seleccionadas en la parte norte, centro y sur de la zona de estudio, con el fin de determinar si estos corresponden a la homogeneidad de las variables topográficas; determinación y cuantificación de las propiedades físicas, color, profundidad, textura, densidad aparente, densidad real, humedad y propiedades derivadas, por estratos de cada punto; y la clasificación taxonómica de los suelos con base en los resultados obtenidos.

### 6.3.1 Color

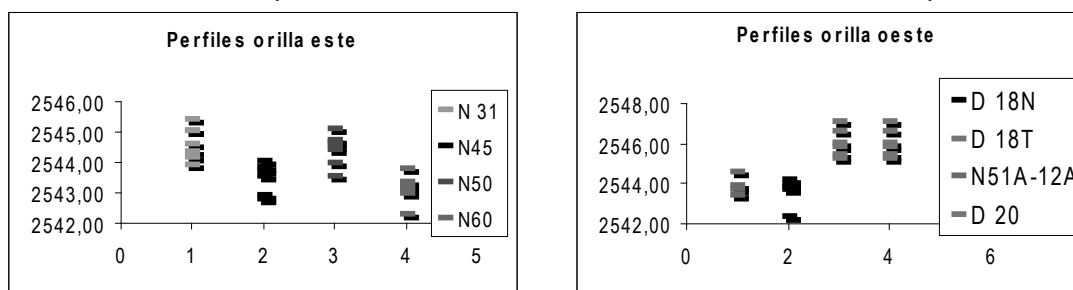
La realización de los sondeos a lo largo de las líneas de estudio permitió identificar que los suelos del humedal presentan colores que van desde negro ( $2,5$  y  $2,5/0$ ) hasta blanco ( $8n$ ), pasando por la gama de colores pardos, amarillos y grises de distintas tonalidades. Los colores amarillos y moteados (negros, rojos y amarillos) son indicadores de gran actividad de oxidorreducción propia de la condición anaeróbica existente durante algunas épocas de inundación. La determinación de algunos colores oscuros no es exacta, debido a la particularidad de dichos colores los cuales solo se han desarrollado en los suelos de los humedales bogotanos y por lo tanto no aparecen en las referencias de tipo general como lo es la carta Munsell.

### 6.3.2. Estratificación

El apoyo de la diferenciación del color permite determinar el límite de los diferentes estratos encontrados en cada sondeo; este es un indicador directo del cambio de condiciones y por lo tanto de propiedades.

El número de estratos encontrado a lo largo de los sondeos varió entre 10 y 2; 6 y 7 fueron los más frecuentes, situación característica de las zonas este y oeste, como se aprecia en la gráfica 5.

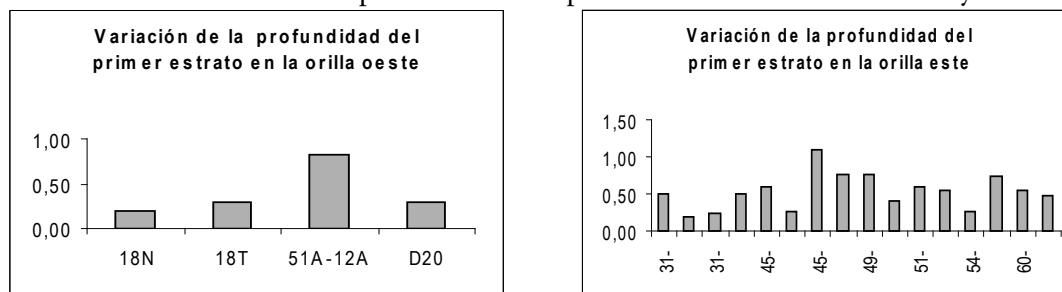
**Gráfica 5.** Cota y número de estratos en los sondeos de las zonas este y oeste.



La variación que presenta la profundidad del primer estrato se muestra en la gráfica 6, y va desde 0,26 hasta 1,10 m localizados en distancias no mayores de 10 m del cuerpo de agua; estos espesores se explican por su origen juvenil y por las condiciones de erosión

y mal drenaje características del sector; el rasgo más notable de este estrato es la ausencia de macro y micro fauna, posiblemente debida al uso frecuente de agroquímicos en los cultivos vecinos que llegan con la erosión y la escorrentía.

**Gráfica 6.** Variación de la profundidad del primer estrato en las orillas este y oeste.



### 6.3.3. Textura

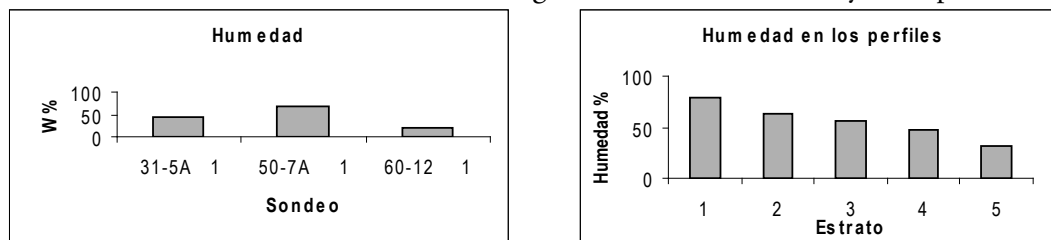
La textura se determinó por el método de Bouyoucos para cada uno de los 106 estratos, y se caracterizó por medio del triángulo del USDA. La textura predominante en cada estrato y su correspondiente porcentaje es arcilla muy fina, presente en 32 y 30%, franco gruesa con 29 y 27%, arcillosa fina con 25 y 24%, franco fina en 13 y 14%, arenosa 3 y 3%, limo grueso con 2 y 2% y limo fino 1 y 1%; esta caracterización muestra el origen sedi-

mentario de todos los suelos encontrados en el humedal. En el primer estrato predomina la textura franco gruesa y a los 2 m de profundidad la textura arcillosa.

### 6.3.4. Humedad

La humedad de campo se determinó gravimétricamente en todos los estratos; presentó variaciones desde el 96,93% hasta el 16%, encontrando los valores más altos en los primeros estratos (gráfica 7).

**Gráfica 7. Variación de la humedad gravimétrica en las líneas y en el perfil.**

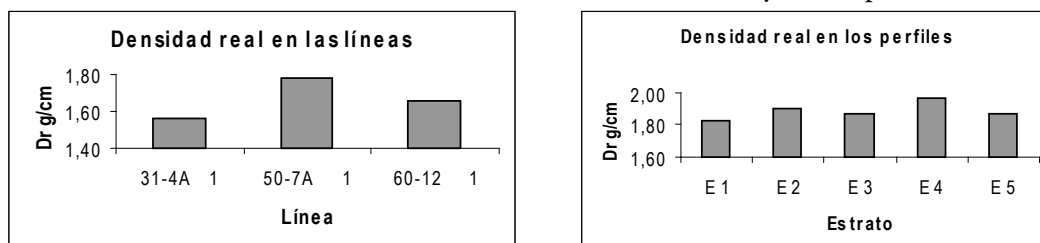


### 6.3.5 Densidad real

La determinación de la densidad real en laboratorio se realizó por el método del picnómetro; se obtuvieron valores entre 2,6 y 1,45, como se aprecia en la gráfica 8, ninguno de

los valores obtenidos se aproxima al promedio de los suelos de origen mineral, y en su totalidad son valores sensiblemente menores; en general se aprecia que los valores aumentan con la profundidad.

**Gráfica 8. Variación de la densidad real en las líneas y en los perfiles.**

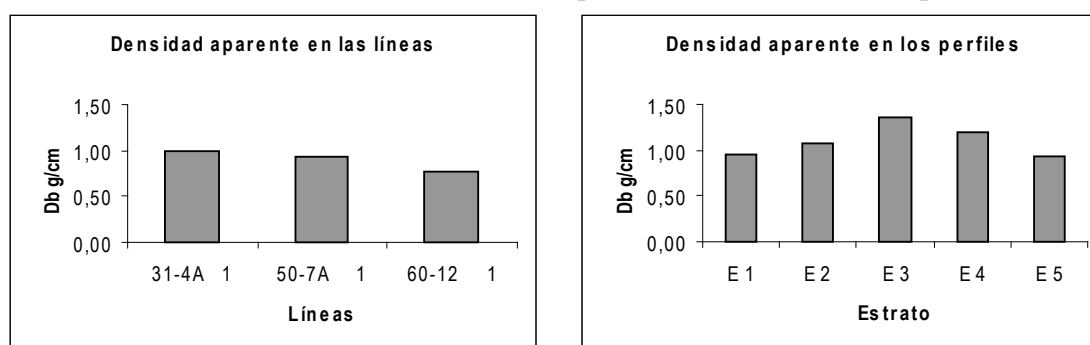


### 6.3.6. Densidad aparente

Los valores de la densidad aparente se determinaron en laboratorio con el método del terrón con parafina, oscilaron entre 0,77 y 1,7

como se aprecia en la gráfica 9, y se explican por las texturas finas halladas en todos los estratos, que coinciden con las encontradas en los suelos de otros humedales de la sabana.

**Gráfica 9. Variación de la densidad aparente en las líneas y en el perfil.**

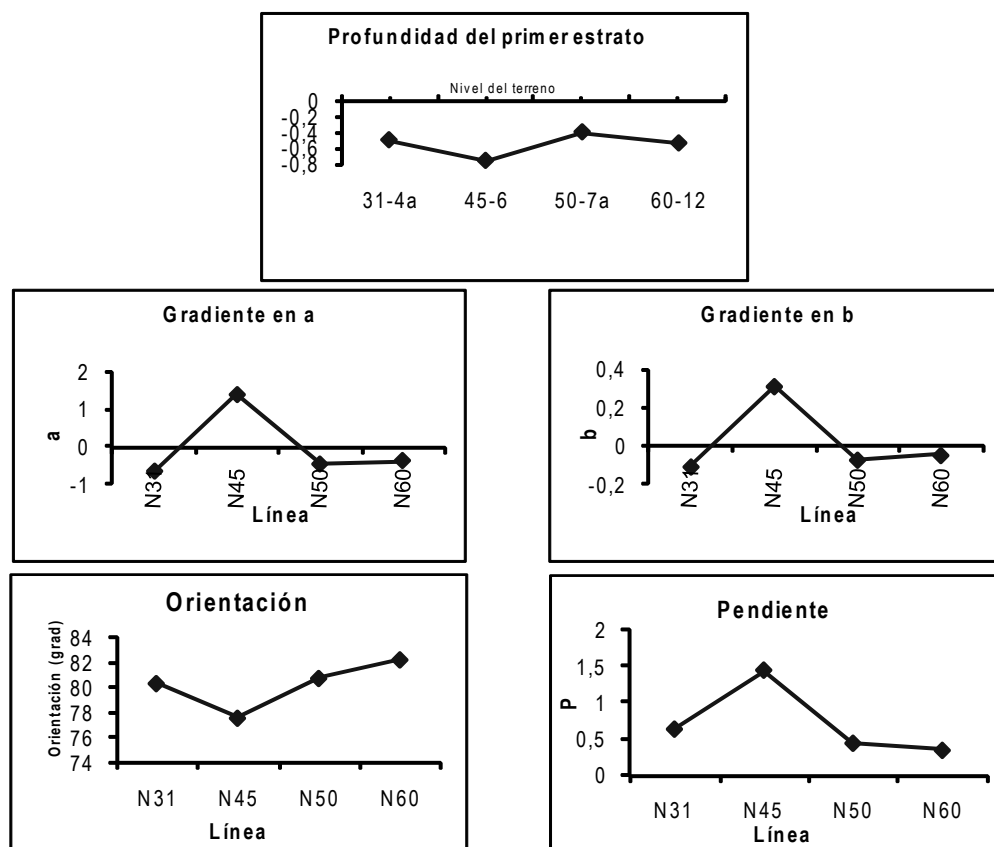


### 6.4 La geomorfometría y las propiedades físicas de los suelos en el sector central del humedal de la Florida

Para el análisis de las relaciones entre los parámetros topográficos (gradiente de la pendiente (a y b), pendiente, orientación) y las propiedades físicas de los suelos (profundidad del primer estrato, humedad, densidad aparente, densidad real y textura), se realizaron comparaciones cualitativas de los com-

portamientos de dichas variables y propiedades en las líneas seleccionadas para practicar los sondeos, las cuales se distribuyeron en la zona sur, centro y norte del área de estudio. Los contrastes permitieron identificar tendencias en los comportamientos de los parámetros topográficos y las propiedades físicas, de manera general. El estudio de las relaciones entre los parámetros topográficos y las propiedades físicas permitió establecer las tendencias generales desarrolladas entre los parámetros y las variables.

**Gráfica 10.** Variación de la profundidad del primer estrato respecto a los parámetros topográficos gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación.



#### 6.4.1. Relaciones, profundidad del primer estrato y los parámetros topográficos

En la gráfica 10 se presentan las variaciones de la profundidad del primer estrato con el

gradiente de la pendiente (a y b), la pendiente y la orientación, donde se puede observar que, para las líneas de los diferentes sectores de la zona, la influencia de los parámetros topográficos tiene la misma tendencia. El comportamiento de los componentes a y b del



gradiente de la pendiente se presenta de manera inversa sobre la profundidad del estrato. De la misma manera el comportamiento de la profundidad describe una relación inversa con respecto al de la pendiente (variable parametrizada). En la comparación de la profundidad y la orientación se nota un comportamiento contrario al descrito por las variables anteriores, lo cual indica un ajuste directo en la interrelación profundidad/orientación.

#### 6.4.2. Relaciones, humedad y parámetros topográficos

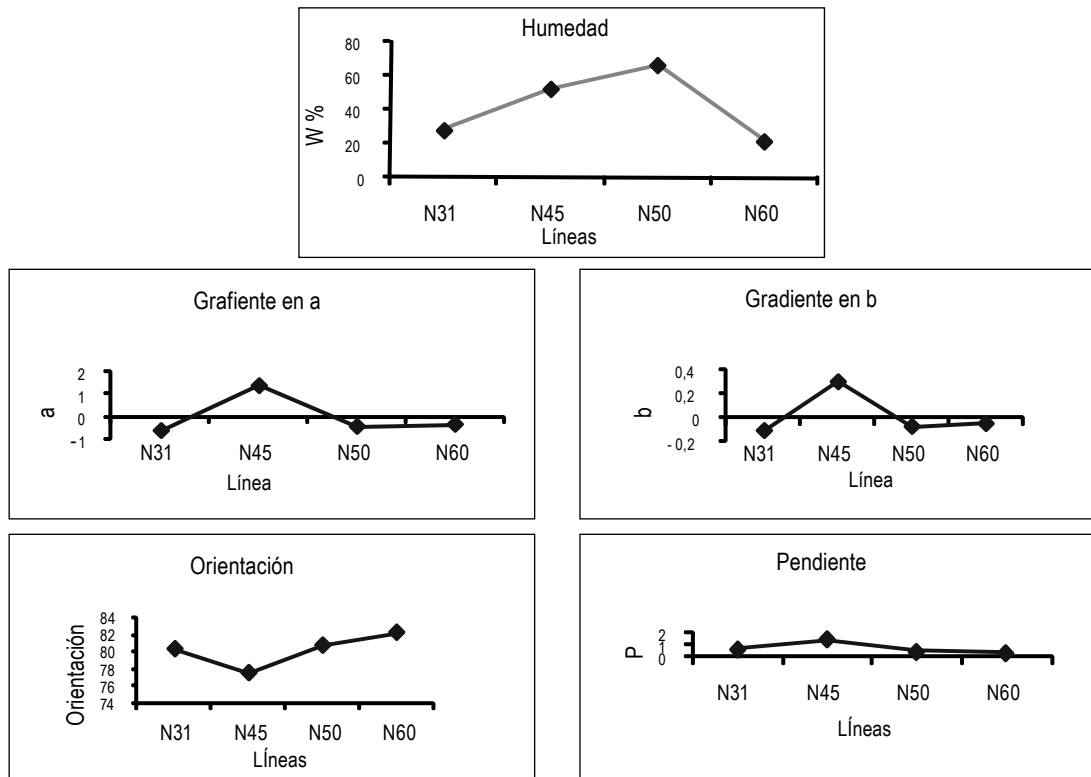
Las relaciones: humedad, gradiente topográfico a y b, pendiente y orientación se presentan en la gráfica 11. El análisis de esta interrelación permite observar tendencias particulares para las zonas sur, centro y norte de esta. En las líneas N31 a N45, correspondientes a la zona sur, la relación de la hume-

dad con los parámetros topográficos (gradiente de la pendiente a y b, y pendiente) se efectúa de manera directa e inversa con la orientación.

#### 6.4.3. Relaciones, densidad aparente y parámetros topográficos

La gráfica 12 muestra el desarrollo de los comportamientos de la densidad aparente con respecto a los parámetros topográficos (gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación); se pueden observar las tendencias que desarrolla esta variable en torno a los parámetros, definiendo que tiende a tener un comportamiento inversamente proporcional respecto al gradiente de la pendiente, tanto en su componente a como en el b. Respecto a la pendiente y la orientación se encontró igualmente una tendencia a relacionarse de forma inversa.

**Gráfica 11.** Variación de la humedad respecto a los parámetros topográficos gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación.



### 6.4.4. Relaciones, densidad real y parámetros topográficos

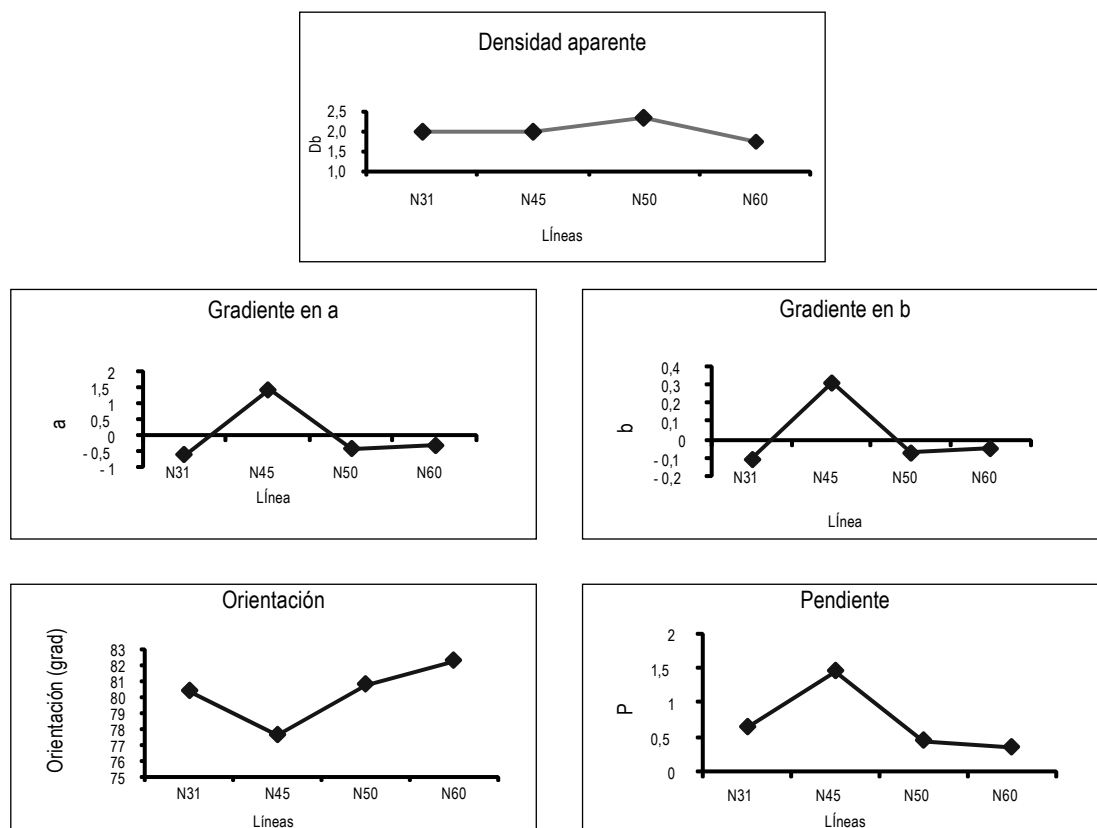
La variación de la densidad real y los parámetros topográficos se muestra en la gráfica 13, la cual representa los valores obtenidos para la variable y los parámetros en las líneas de estudio, con lo que permite establecer relaciones de corresponsabilidad inversas entre la densidad y el gradiente de la pendiente en sus componentes a y b, al igual que con la pendiente. En el caso de la relación entre la densidad real y la orientación los trazados descritos por cada una de estas presentan una correspondencia directa, lo cual permite establecer que al desarrollarse un aumento en la orientación se tendrá un comporta-

miento del mismo tipo en los valores de la densidad real.

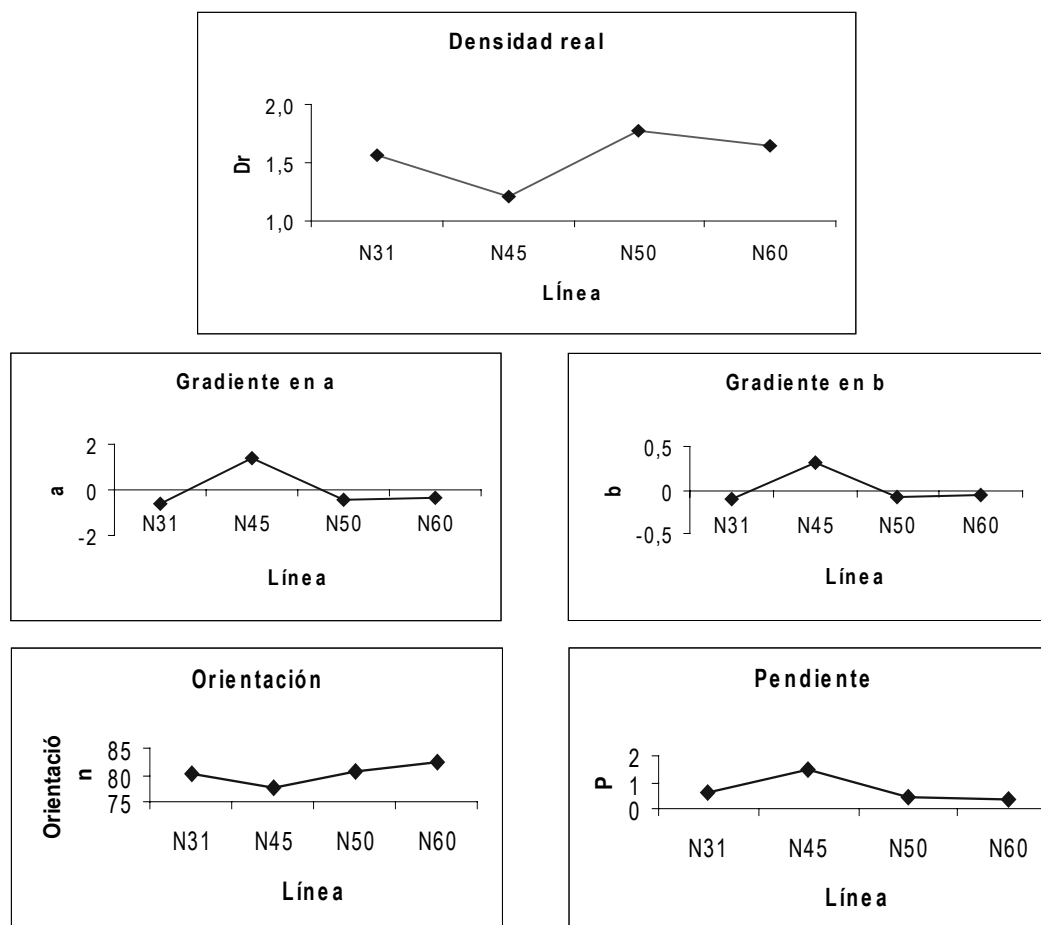
### 6.4.5. Relaciones, textura y parámetros topográficos

La gráfica 14 ilustra la variación del contenido de arenas, arcillas y limos, con respecto a los parámetros topográficos orientación y pendiente; se observa que la tendencia de la orientación con respecto al contenido de arenas es directa y con el contenido de limos y arcillas es inversamente proporcional. La pendiente desarrolla un comportamiento directo con el contenido de arcillas y limos e inverso con el contenido de arenas.

**Gráfica 12.** Variación de la densidad aparente respecto a los parámetros topográficos gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación.



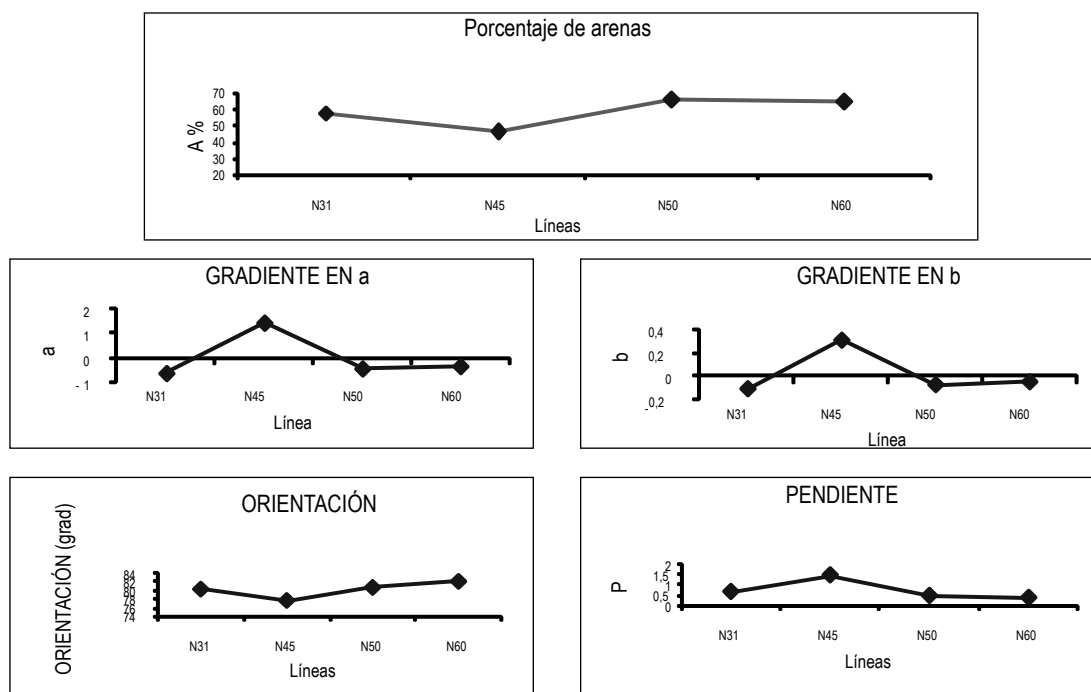
**Gráfica 13.** Variación de la densidad real respecto a los parámetros topográficos gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación.



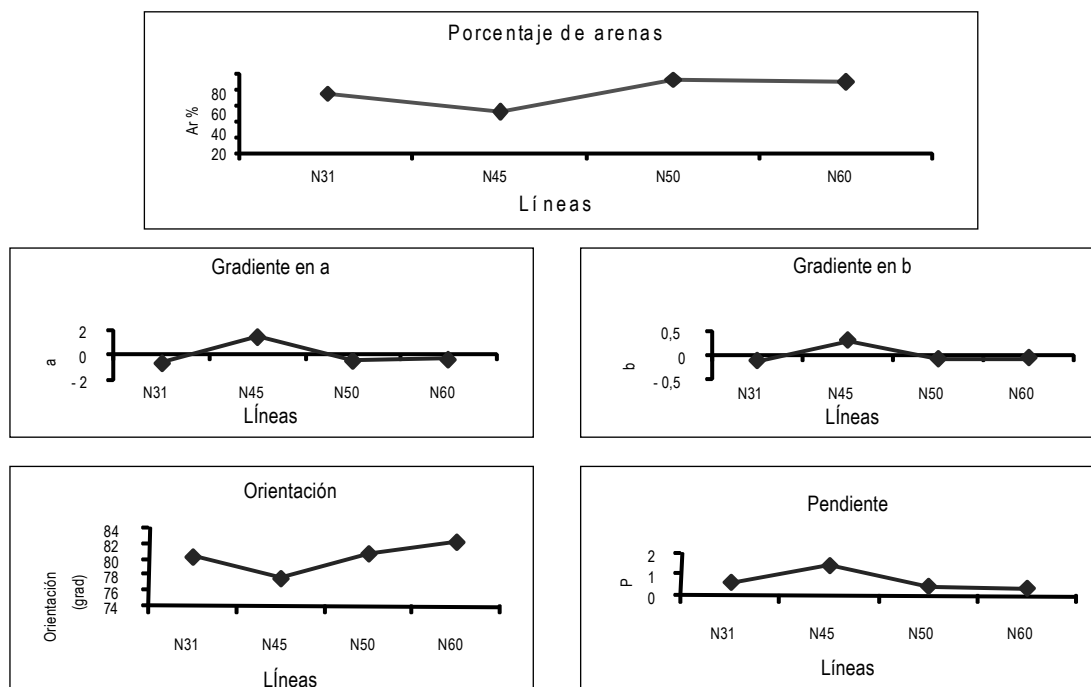
La gráfica 15 presenta los valores obtenidos para la textura y el gradiente de la pendiente en sus componentes a y b de las líneas de estudio; con base en esto se puede determinar que las relaciones encontradas entre el contenido de arenas y el gradiente de la pen-

diente son de tipo inverso, al igual que con el contenido de limos. Por otro lado, se puede determinar que si el gradiente de la pendiente presenta un comportamiento de tipo positivo, el contenido de arcillas tenderá de igual manera a mostrar un aumento en sus valores

**Gráfica 14.** Variación del porcentaje de arenas respecto a los parámetros topográficos gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación.



**Gráfica 15.** Variación del porcentaje de arcillas respecto a los parámetros topográficos gradiente de la pendiente a y b, pendiente y orientación.



## 7. CONCLUSIONES

El estudio desarrollado permite describir la forma en que los parámetros topográficos afectan las propiedades físicas de los suelos:

El comportamiento del gradiente de la pendiente y la pendiente desarrollan el mismo tipo de relación con las propiedades físicas.

La relación de tipo inverso entre la pendiente y el gradiente de la pendiente en  $a$  y  $b$  con la densidad aparente, se puede explicar ya que a mayor variación, mayor velocidad del agua, la cual arrastra partículas finas que inciden directamente en el valor de la densidad aparente, haciéndola disminuir en la parte inferior e incrementándola en la parte "alta" del punto.

Las relaciones encontradas muestran la implicación que tiene la topografía de los ecosistemas sobre los procesos que ocurren en el medio ambiente.

La determinación de algunos estratos hídricos (confirmados por el alfaalfadipiridyl) encontrados a profundidades no menores de 0,80 m dentro de los sondeos, define la tendencia de los suelos del humedal a perder sus características anaeróbicas, y por consiguiente la pérdida de la flora y fauna asociadas a este tipo de condiciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- BAND, L. E. A terrain based watershed information system. *Hydrological Processes* 3, 1989, pp. 151-162.
- BIRKERLAND, Peter W. *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press. Nueva York, Oxford, 1984.
- CHORLEY, Richard J. *Spatial analysis in Geomorphology*. British geomorphological research group. New York. EE. UU., 1969.
- COWARDIN, Lewis M. *Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States*. U.S. Fish and Wildlife Service, U.S. Dept. of Interior, Washington, D. C., 1979.
- DOORNKAM, J. C. and KING, A. M. *Numerical Analysis in Geomorphology, an Introduction*. E A Publishers Ltd, London, UK, 1971.
- ESTUDIOS Y ASESORÍAS. Estudio para el Plan de Manejo Ambiental del Humedal de Juan Amarillo. DAMA, Bogotá, Colombia, 1995.
- EVANS, I. S. "General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics". In Chorley, R. J. ed. *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen, London, 1972, pp. 17-90.
- FLORINSKY, Igor V. "Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models, research article of the newspaper *Geographical Information Service*", Rusia, 1998.
- FELICÍSIMO, Ángel Manuel. Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales. Tesis doctoral. Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), Universidad de Oviedo, España, 1992.
- FRANKLIN, A., PALMER, B. and ROBINSON, V. Formal methods of the accurate definition of some fundamental terms in physical geography, Proceedings, Second International Symposium on Spatial Data Handling, Seattle, 1987, pp. 583-599.
- GÓMEZ CAJIAO Y ASOCIADOS. Plan de Manejo Ambiental y Control de la Contaminación en el Humedal de Jaboque. DAMA, Bogotá, 1995.
- HOBSON, M. E. "What cell size does the computed slope / aspect angle represent?". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(5), 1972, pp. 513-517.
- HOBSON, R. D. *Surface roughness in topography: quantitative approach*. Department of Geology, Emory University, Atlanta, 1972.
- MARK, D. M. "Relations between field-surveyed channel networks and map-based geomorphometric measures, Inez, Ken-

- tucky". *Annals of the Association of American Geographers*, 73, 1983, pp. 358 - 372.
- MARSCH, L. W. "Catch: A Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models". *Computers and Geosciences*, 1978.
- MUÑOZ, C. J. *Modelos digitales de elevación*. Universidad del Valle. Cali, 1999.
- OSORIO OLARTE, Jacqueline. *Cerros, humedales y áreas rurales*. DAMA, Bogotá, 1997.
- PAPO-VÉLEZ, O. L. and CUEVAS-RENAUD, B. "Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data". *Journal of Hydrology*, 1984.
- PIKE, R. J. *Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis*. Geological survey. Menlo Park, California, EE. UU., 2000.
- RICHARDSON, J. L. *Wetland Soils*. Lewis Publishers, Nueva York, 2001.
- TRICART, J. *La epidermis de la Tierra*. Editorial Labor, Barcelona, España, 1969.
- WEIBEL, R. and HELLER, M. A framework for digital terrain modeling. 4<sup>th</sup>. International Symposium on Spatial Data Handling, Zurich, 1990.
- WOOD, J. D. *Scale-based characterization of Digital Elevation Models, Proceedings*. 3<sup>rd</sup>. National Conference on GIS Research UK GISRUUK 95, Newcastle, 1996.