

Mapa de zonificación de amenazas por inundación del casco urbano del municipio de Quibdó (Chocó). Estudio basado en la interpretación de imágenes de radar, de satélite y fotografías aéreas

Flood-threat zoning map of the urban area of Chocó (Quibdó). A study based on interpreting radar, satellite and aerial photograph images

Zamir Maturana Córdoba¹

RESUMEN

Se elaboró del casco urbano del municipio de Quibdó (Chocó) un mapa de zonificación de áreas inundables causadas por las crecientes del río Atrato y sus afluentes (Cabí, caño El Caraño y Quebrada La Yesca), con el objetivo de que sea utilizado por las autoridades de socorro y del municipio de Quibdó como un instrumento de planeación y control. En esta investigación se contó con el apoyo y asesoría del Centro Interamericano de Fotointerpretación, CIAF, adscrito al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, quien proporcionó sus instalaciones y el material geográfico empleado. Inicialmente el trabajo se basó en la visualización de zonas inundables a través de interpretación de imágenes de radar (Intera), de satélite (Landsat) y fotografías aéreas, todo esto apoyado por la comprobación en terreno de los datos interpretados. Como información adicional necesaria para el planteamiento de conclusiones en un trabajo como este, se requirió estudiar otras variables como fueron las condiciones climáticas, geológicas, de temperatura, topográficas, series y ocurrencias históricas hidrológicas e hidrográficas en la región. Las imágenes que brindaron mayor confianza por muchas razones, entre las que sobresalieron las escalas, la cantidad y calidad de las mismas y la fecha de toma, fueron las fotografías aéreas. Las de radar (Intera) por ser producidas por un sensor activo de rango de las microondas por su esencia de eliminación completa de obstáculos climáticos, fueron también importantes a la hora de analizar visualmente la topografía del sector. Al contrario, las imágenes del satélite (Landsat) tuvieron un papel secundario producto del gran porcentaje de nubes que dificultaban cualquier tipo de análisis. Como complemento a los resultados obtenidos, se elaboró con datos multianuales de series históricas de caudales y niveles máximos del río Atrato registrados en la estación hidrográfica Quibdó y con el área de la sección transversal de su cauce en el sitio de ubicación de la estación, una curva de calibración para analizar los valores de caudales máximos que dicha sección del río puede transportar, y dependiendo de esto se estimaron estadísticamente las implicaciones que tendría, o que ha tenido el rebase de sus agua, delimitando así (apoyado con la cartografía y considerando las áreas aledañas a la corriente) las respectivas zonas inundables. Finalmente, se diseñó el mapa que señala las zonas inundables del municipio de Quibdó y se elaboró un documento en el que se concluye que los barrios que tienen zonas con alturas entre los 25 y 27 m.s.n.m. o inferiores y que se encuentran a orillas del río Atrato y de sus afluentes constituyen zonas de amenaza alta y media, con periodos de retorno de 5 a 20 y de 50 a 100 años respectivamente.

Palabras clave: zonificación de amenaza por inundación, imágenes de radar, imágenes de satélite, fotografías aéreas, mapa topográfico, curva de calibración, corriente, río Atrato.

ABSTRACT

A zoning map of areas which flood due to the Atrato River and its tributaries (the Cabí, Caraño and Yesca) overflowing in the urban area of Chocó (Quibdó) was drawn up to be used by aid authorities and Quibdó city as a planning and control tool. This research relied on CIAF (Centro Interamericano de Fotointerpretación) support and assessment. This entity is a subsidiary institution of the Instituto Geográfico Agustín Codazzi which provided their installations and the required geographical material. This research was initially based on interpreting radar (INTERA), satellite (LANDSAT) and aerial photographic images; this was verified by field verification of the interpreted data. Other variables such as climatic, geological, temperature, topographic conditions, historic and hydrological series and facts regarding the region were studied as additional information required for drawing

¹ Ingeniero Topográfico y Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. C. M. Sc., Ingeniería de Transportes, Universidad Nacional de Colombia. Profesor catedrático, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. zaturana@yahoo.es, zaturana@unal.edu.co

conclusions. Aerial photographs provided the most reliable images due to their scales, quantity and quality and the date of when they were taken. Radar images (INTERA) were also important when visually analysing a sector's topography as they were produced by an active microwave sensor (totally eliminating climatic obstacles). On the contrary, satellite images did not have great relevance due to the amount of clouds hampering any kind of analysis. Complementing these results, a calibration curve for analysing this section's maximum flow values was based on historical series data regarding the Atrato River's flows and maximum levels recorded at the Quibdó hydrographical station and the river-bed's cross-section. Implications that the river would overflow or has overflowed were statistically estimated on these results, thereby setting the limits (supported by cartographic data) for the corresponding areas at risk of flooding. A map marking areas at risk of flooding in the urban zone of Quibdó was then designed and a document prepared concluding that neighbourhoods on land lying at 25-27 metres above sea-level (or less) and located near the banks of the Atrato river and its tributaries are considered as being mid- high-flood threat areas, having 5-20 and 50-100 year return periods, respectively.

Keywords: flood-threat zoning, radar image, satellite image, aerial photograph, topographic map, calibration curve, stream, Atrato river.

Recibido: mayo 22 de 2007

Aceptado: octubre 16 de 2007

Introducción

Se conoce como creciente, torrente o avenida de una corriente de agua, al rápido aumento del caudal que pasa por un sitio determinado y que puede llegar a causar inundaciones, cuando el nivel de las aguas rebasa el cauce natural.

Dependiendo de la magnitud de la inundación, se presentan mayores o menores perjuicios, que van desde las pérdidas de vidas humanas, cosechas y ganado, hasta la destrucción de carreteras, puentes, estructuras, construcciones y degradación del medio ambiente.

Creciente no es sinónimo de inundación, aunque estas pueden presentarse sin aquellas; para que haya inundación es necesario que exista una *planicie aluvial* que ha sido formada por el mismo curso de agua, por deposición de sus propios aluviones, a causa de obstáculos geológico, bajas pendientes o configuraciones tectónicas incompatibles con el paso de los sedimentos provenientes de las altas cuencas. El cálculo de una creciente implica el del máximo caudal o pico y la posible hidrógrafa, es decir, la variación del caudal en función del tiempo durante su ocurrencia

Una zona o planicie de inundación es un área seca adyacente a ríos, corrientes, lagos, bahías u océanos, la cual se inunda durante eventos de creciente (Ven Te Chow D., 1998).

La amenaza se define como el peligro latente que presenta la posible ocurrencia de un evento catastrófico de origen natural o tecnológico, en un período de tiempo y en un área determinada. En todos los casos en que se evidencia la presencia de una amenaza se considera la localización específica, al igual que su frecuencia, su intensidad y sus áreas de influencia o posible cobertura (POT Quibdó., 2000).

Quibdó, al igual que la mayoría de los municipios del departamento del Chocó, se ubica en las llanuras de inundación de los ríos en sitios donde varias quebradas y ríos emergen de las cordilleras (ríos Atrato, Cabí, Tanandó, Tutunendó, Samu-

rindó, Ichó, Pandó, cano Caraño, Quebradas La Yesca, La Cascorva, etc.). Dada la alta pluviosidad que presenta la zona y los impactos generados por las explotaciones mineras y madereras sobre la regularidad de los caudales, el municipio presenta alto riesgo por inundación. La población más pobre en este municipio es la que sufre las mayores consecuencias como resultado de las subidas y crecientes repentinas del río Atrato, ya que sus viviendas se encuentran apostadas al lado y lado de su cauce, debido a que este gran porcentaje de la población se dedica a la pesca y la minería.

No son muchos los estudios que sobre el tema de inundaciones, y más concretamente, sobre el río Atrato, se tengan en el país. Para la realización de este trabajo se partió de una propuesta, presentada a varias entidades nacionales, como fueron: la Corporación Autónoma para el Desarrollo del Chocó, Codechocó, el Centro Interamericano de Fotointerpretación – CIAF, entidad que hace parte del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, apelando a la información y la experiencia que sobre este tema poseen dichas instituciones. De estas se interesaron por proyecto: la Universidad Distrital y el CIAF-IGAC, en el que esta última entidad aportó los equipos de análisis y la mayor parte de la información de consulta, apoyándose en un convenio de colaboración académica mutua que tienen dichas instituciones.

El trabajo que hoy se presenta centró su estudio en la recopilación y el análisis de diferentes fuentes de información, para producir una información confiable que le sirva de ayuda a los diferentes organismos de atención de emergencias y de planeación municipal en la prevención y control de inundaciones que puedan llegar a ocurrir en el casco urbano del municipio de Quibdó.

El objetivo principal del proyecto fue el de producir un mapa de zonificación de amenazas por inundaciones del municipio de Quibdó, mediante la interpretación de imágenes

de satélite, de radar y fotografías aéreas, apoyado en datos geológicos, de suelo, hidrográficos del sector, etc.

Tabla 1. Información general empleada

Materiales y métodos

Equipo utilizado

1. *Procesamiento de datos:* el análisis de información en imágenes Landsat e Intera se realizó con una estación Sylicom Grafic en las instalaciones del Centro Interamericano de Fotointerpretación (CIAF). Programa de interpretación Erdas (Versión 8.3)
2. *Equipo complementario:* computador, estereoscopio de espejos, mesa digitalizadora
3. *Información empleada:* el primer paso en cualquier análisis de zonificación de amenazas por inundación es recolectar información (Tabla 1). El proyecto basó su análisis en el uso de fotografías aéreas, imágenes de radar (Intera), imágenes del satélite (Landsat), información cartográfica; el estudio de condiciones climáticas, geológicas, de temperatura; la ubicación de estaciones de aforo, series y ocurrencias históricas hidrológicas e hidrográficas de la región; la sección transversal del río Atrato y su estudio batimétrico, etc. Todo esto apoyado con visitas de campo a la zona de estudio.

Para la selección de las imágenes de satélite y fotografías aéreas se tuvieron en cuenta: la cobertura de nubes presentes (por la alta pluviosidad característica de esta región del Pacífico colombiano) y la fecha de las tomas, buscando contar con imágenes que correspondieran a épocas de invierno y verano y en diferentes periodos de tiempo. Esto con el fin de realizar un estudio multitemporal.

Análisis de fotografías aéreas:

la primera fase del proyecto comprendió la interpretación de fotografías aéreas. Estas se consideraron de vital importancia debido, entre otros, a las bondades de sus escalas y a la posibilidad de hacer estereoscopía, lo que permitió un análisis más detallado, en comparación con las imágenes Landsat e Intera, que manejan escalas mucho más pequeñas.

El proceso de fotointerpretación comprendió la identificación de cursos de agua, zonas inundables, usos del suelo, análisis de cobertura vegetal, asentamientos humanos, estimación de alturas apoyados en la cartografía de la zona (cotas de los niveles de los ríos, cotas de las viviendas), etc. Con los resultados de esta fotointerpretación se fue conformando el plano preliminar de zonificación de áreas inundables, a través de su localización en la cartografía disponible. Estos datos fueron verificados posteriormente en el terreno.

Información empleada	
Imágenes de radar (Intera)	
Fecha:	Junio - Julio de 1992
Escala:	1:50000
Referencia:	Imagen 164 - CIAF - IGAC
Formato:	Fotográfico y archivo digital
Imágenes de satélite (LANDSAT)	
Fecha:	12 de febrero de 1995
Escala:	1:50000
Referencias:	956 / 1056 - CIAF - IGAC / PROSIS Ltda.
Formato:	Archivo digital
Fotografías aéreas	
Fecha:	26-04-77, 08-07-81, 21- 02-58
Escala:	1:19400, 1:18000, 1:9300, 1:5000, 1:5500
Referencias:	Vuelos N°: C-1446, C-2024, C-835 CIAF - IGAC
Formato:	Papel fotográfico
Cartografía base	
Fecha:	Año 1981
Escala:	1:5000
Referencias:	164 - IV - D - 3 - c CIAF - IGAC PERI. URBANO, ZONIF. Y USOS DEL SUELO
Formato:	Papel
Fecha:	Año 1997
Escala:	1:5000
Fuente:	DANE
Referencias:	27001000 PERÍM. URBANO
Formato:	Papel
Observación:	Base cartog. IGAC 1981 Actualiz. DANE 1997
Fecha:	Año 1997
Escala:	1:5000
Fuente:	PLANEACIÓN MUNICIPAL DE QUIBDÓ
Referencias:	27001000 PERÍM. URBANO
Formato:	Papel
Observación:	Base cartográfica IGAC 1981 Actualización del municipio para la ampliación de la vía a Pandó - Base Levantamiento topográfico 1997
Fecha:	Año 1998
Escala:	1:5000
Fuente:	DEFENSA CIVIL SECCIONAL CHOCÓ
Referencias:	MAPA DE RIESGOS DEL CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE QUIBDÓ
Formato:	Papel
Observación:	Base cartog. IGAC 1981 Actualiz. DANE 1997
Hidrología e hidrografía	
Fecha:	Año 2000
Fuente:	IDEAM
Referencias:	VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE CAUDALES (EST. QUIBDÓ, BELÉN, TAGACHÍ) VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (EST. CARAÑO, TAGACHÍ TUTUNENDÓ)
Formato:	SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RÍO ATRATO (EST. QUIBDÓ) Papel
Geología	
Fecha:	Año 1998
Escala:	1:5000
Fuente:	INGEOMINAS
Referencias:	ZONIFICACIÓN PRELIMINAR DE AMENAZAS GEOLÓGICAS EN LA CABECERA MUNICIPAL DE QUIBDÓ - CHOCÓ (ESTUDIO Y MAPA)
Formato:	Papel

Fuente. Elaboración propia.

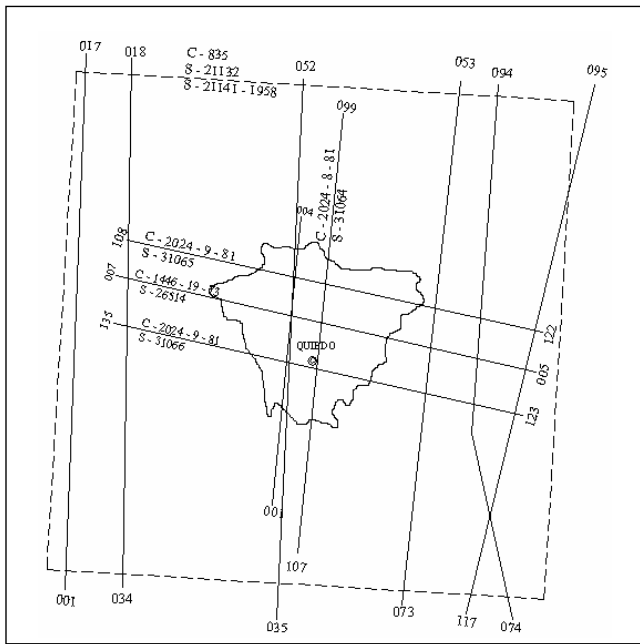


Figura 1. Esquema de líneas de vuelo
Fuente. Elaboración propia.

En las fotografías se pudo analizar con detalle el comportamiento que tienen las aguas de los ríos en diferentes épocas, así como los barrios afectados por sus eventuales avenidas o crecientes. En las imágenes 1 y 2 (de invierno) se señalan varios barrios amenazados por las inundaciones, según su topografía, los relatos de los habitantes y su comparación con imágenes de otros periodos (verano, invierno - verano).

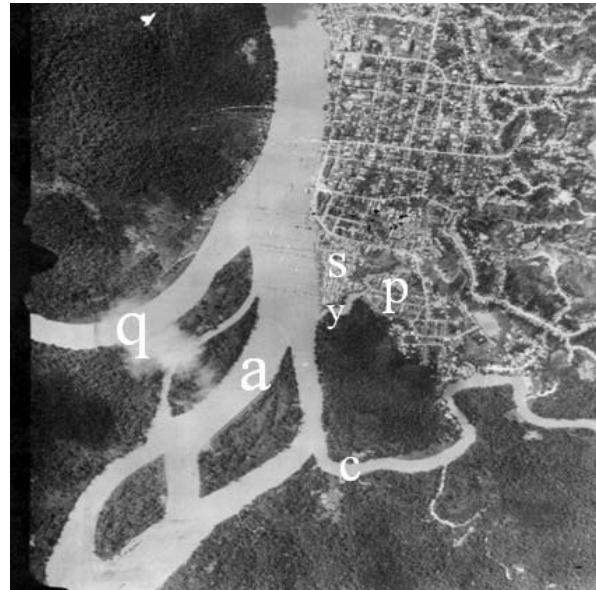
Imagen 1. Fotografía aérea vuelo C-2024- IGAC. Fecha: 08-07-81. Cabecera municipal de Quibdó - Sector norte. Escala aprox.: 1:9300. Corresponde a un periodo de alta pluviosidad. En esta se observa el cauce del caño El Caraño (ñ) que desemboca al río Atrato. Se referencian entre otros, los barrios Kennedy (k) y La Bombita (b), afectados por las inundaciones en diferentes épocas del año.



Fuente. Elaboración propia, tomando como base fotos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.

En las dos imágenes se puede apreciar el predominio de zonas planas, la cobertura vegetal de bosque natural, las áreas pobladas y su localización con respecto a los cauces de las corrientes estudiadas.

Imagen 2. Fotografía aérea vuelo C-2024- IGAC. Fecha: 08-07-81. Cabecera municipal de Quibdó - Sector sur. Escala aprox.: 1:9300. Se observa el comportamiento del río Atrato (a), en el sector conocido como La Y, nombrado así por la apariencia que tiene al recibir las aguas de los ríos Quito (q) y Cabí (c), unos de sus principales afluentes. Por esta razón se bautizó a una quebrada como la "Yesca", por llevar sus aguas al río Atrato en este punto. También se pueden ubicar entre otros, a los barrios San Vicente (s) y San Pablo (p), afectados por las inundaciones.



Fuente. Elaboración propia tomando como base fotos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC.

Análisis de imágenes de satélite

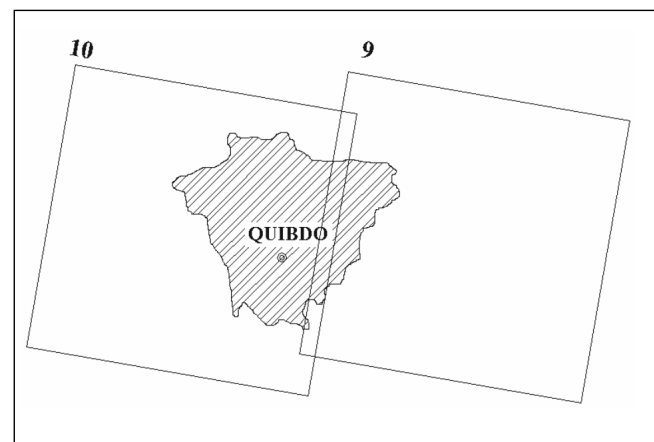
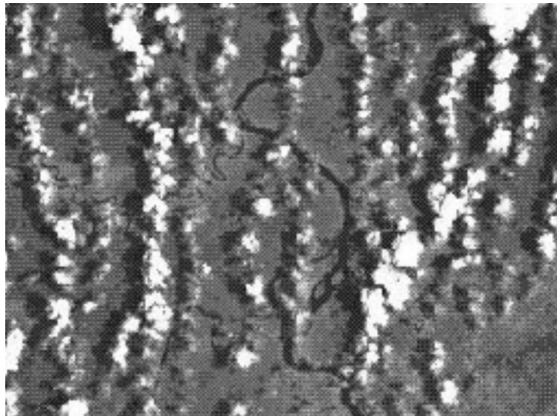


Figura 2. Esquema de imágenes Landsat TM
Fuente. Elaboración propia.

Siguiendo el principio de hacer un estudio multitemporal, se continuó con el análisis de imágenes de satélite. Con estas se presentaron muchas dificultades debido, primero a la poca información que sobre la zona existe en el país, y segundo, a las condiciones climáticas de la región, evidenciadas por la

gran cantidad de nubes presentes en ellas (Imagen 3), por lo que en las mismas sólo se pudo realizar de manera general y en cuanto fue posible una interpretación visual de zonas inundables, sedimentación de ríos, análisis de cobertura vegetal, análisis de suelos (contenido de humedad) y análisis geológico de la zona.

Imagen 3. Imagen Landsat 1056. Cabecera Municipal de Quibdó. En ella se observa gran cantidad de nubes, características de esta zona del país.



Fuente. Elaboración propia tomando como base imágenes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Se trabajó el preproceso de imágenes, que son todas las acciones o tareas auxiliares que se efectúan sobre las mismas para mejorar su visualización, como son: el empleo de filtros o mejoramiento espacial, el realce de contrastes, los mejoramientos radiométricos y espectrales, así como la clasificación (supervisada y no supervisada). Esta operación no varió sustancialmente las condiciones desfavorables de las imágenes.

Imagen 4. Análisis de índices de vegetación. Imagen Landsat 1056 - Da una idea de cómo está de enferma o sana la vegetación, o si existe o no. Las nubes dificultaron el análisis.



Fuente. Elaboración propia tomando como base fotos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

También se trabajó en las diferentes combinaciones en falso color para observar cuál destacaba los elementos a interpretar. Los filtros empleados fueron el de Paso Alto,

que enfatiza las zonas de cambios bruscos, y los de Medio y de Paso Bajo, que permite homogeneizar una imagen (clasificación temática).

Análisis de imágenes de radar:

una ventaja que poseen las imágenes de radar al ser producidas por un sensor activo de rango de las microondas, es que las aleja de toda presencia de nubes, pero presenta inconvenientes a la hora de analizar la cobertura vegetal, los usos del suelo, y al hacer composiciones a color, debido a que consta de una sola banda espectral.

Con las imágenes Intera (Figura 3), debido a su contraste de colores grises y negro se pueden hacer más fácilmente interpretaciones visuales de acumulaciones de agua, ya que este elemento en las imágenes aparece completamente oscuro, en contraste con los colores más claros de la vegetación.

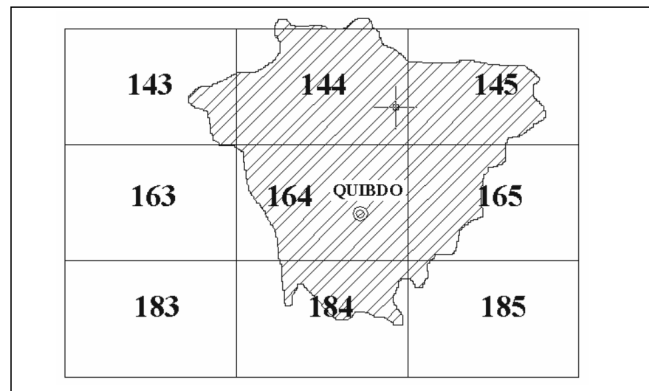


Figura 3. Esquema de imágenes Intera Fuente. Elaboración propia.

El procedimiento de interpretación visual en formatos análogo y digital consistió en la identificación de centros poblados, acumulaciones de agua y relieve del terreno.

Para la interpretación de imágenes Landsat e Intera se siguieron las especificaciones de la Tabla 2.

Tabla 2. Mecanismo de interpretación visual de imágenes Landsat e Intera

Base para interpretación de imágenes	
Cobertura	Rasgos
1. Bosques	Tono gris oscuro, textura gruesa. Forma, área, copa
a. Forma	Bosque plantado
- Regular	Bosque natural
- Irregular	
b. Tamaño	Bosque natural
- Diverso	Bosque plantado
- Homogéneo	
2. Cultivos	Patrones, tamaño de las parcelas, textura, forma, altura, pendientes.

Fuente. Elaboración propia.

Georreferenciación de imágenes:

se contó con imágenes Landsat e Intera georreferenciadas previamente.

Manejo de información cartográfica:

se tomaron como base para analizar, comparar, trasladar y comprobar, la información obtenida del proyecto, planchas del IGAC a escalas 1:2000 (8 planchas) y 1: 5000 (2 planchas).

Se utilizó la escala 1:2000 con el objetivo de manejar mayores rangos de precisión, en lo que al análisis de detalles, pendientes y niveles se refiere. Para la presentación final de los resultados del proyecto se empleó la cartografía digital del área urbana del municipio de Quibdó a escala 1:5000, elaborada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

Refuerzo de la información

Comprendió la comprobación directa en terreno de la información analizada previamente en las imágenes y que fue trasladada a la cartografía de la zona.

En esta parte del proyecto se recorrieron los sitios referenciados como zonas inundables, se entrevistó también a los habitantes del lugar, preguntándoles sobre antecedentes históricos de inundaciones, periodos intensos y bajos de lluvias, niveles más altos de las aguas durante las crecientes, etc.

Los resultados se aprecian en las fotografías 1 y 2.

Fotografía 1. Sector Kennedy. Comportamiento de las aguas del río El Caraño



Fotografía 2. Sector García Gómez. Comportamiento de las aguas de la quebrada La Yesca

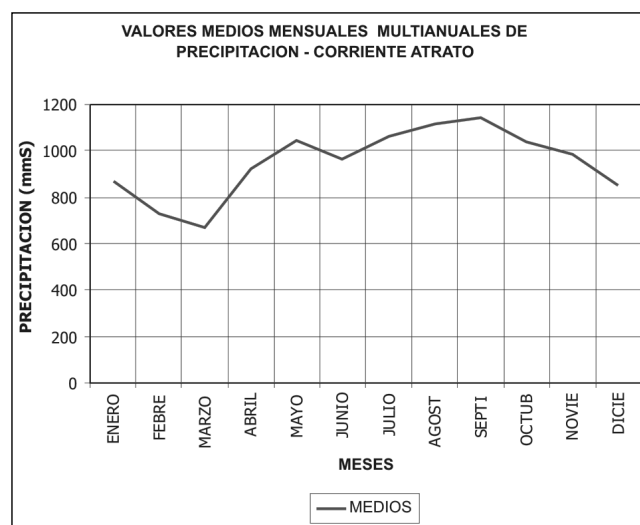


Fuente. Elaboración propia.

Estudio hidrológico e hidrográfico del municipio de Quibdó

El comportamiento de la precipitación durante el año en esta zona corresponde a una distribución de tipo monomodal. La precipitación media anual está distribuida en todos los meses del año, con un mínimo durante los meses de marzo, abril y mayo, y con máximos durante los meses de junio, julio y agosto. Esta precipitación casi permanente a través del año determina que prácticamente no existan en el área periodos secos (Eslava, J., 1994).

En el municipio de Quibdó existen tres estaciones hidrométricas sobre la corriente del río Atrato: Quibdó, Belén y Tagachí, y sobre los afluentes están las estaciones de Neguá y San Isidro. De estas solo una, la estación Quibdó, se encuentra localizada en la cabecera municipal. Las dos restantes están ubicadas en zonas rurales.



Figuras 4. Valores medios mensuales de precipitación. Estación Tutunendó. Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del Instituto de Estudios Ambientales IDEAM.

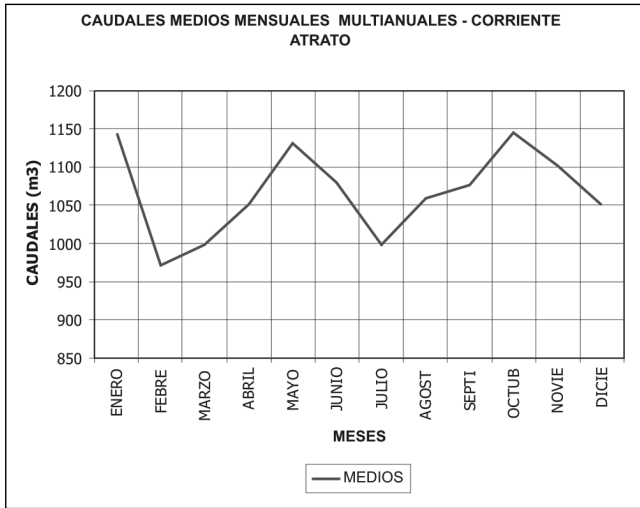
Estudiando los registros de dichas estaciones se observa que el comportamiento de la distribución del caudal medio mensual medido en cada una de ellas es similar al de la precipitación, es decir de abril a diciembre es el periodo húmedo, de enero a marzo es el periodo seco, siendo el mes de marzo el mes mas seco.

Análisis de inundación

1. Determinación de caudales máximos:

Teniendo en cuenta el número de estaciones hidrométricas tan limitadas, y el contar con una batimetría no muy detallada del área del río, se planteó para la estimación de caudales máximos una relación entre los datos de caudales, niveles máximos registrados en la estación hidrográfica Quibdó y el área de la sección transversal del cauce del río en el sitio de ubicación de dicha estación, con el objetivo de analizar los valores de caudales máximos que dicha sección del río puede transportar. Seguidamente, con los resultados obtenidos

se procedió a estimar estadísticamente las implicaciones que tendría o que ha tenido el rebase de las aguas o *crecientes*, para de esta manera y considerando las áreas aledañas a la corriente, representadas en la cartografía, determinar las respectivas zonas inundables.



Figuras 5. Valores medios mensuales de caudales. Estación Quibdo. Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del Instituto de Estudios Ambientales, IDEAM.

Para el análisis planteado se adquirió en el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM) el perfil de la sección transversal del río Atrato (Figura 6), y mediante la relación de su área, nivel de la sección, pendiente longitudinal del cauce y perímetro mojado, se calcularon los valores de caudales y velocidades, aplicando la fórmula de Manning (Tabla 3).

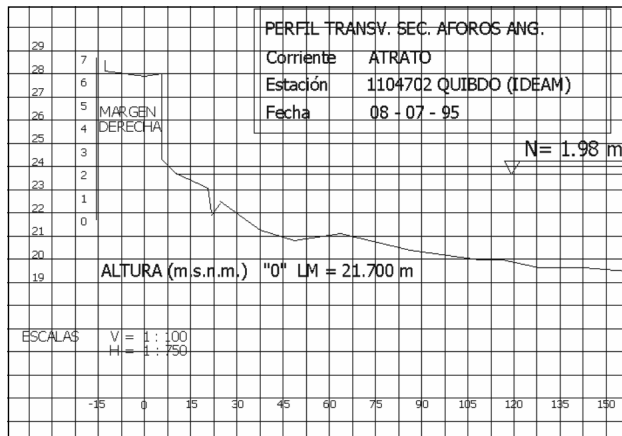


Figura 6. Sección transversal del cauce del río Atrato en el sector de ubicación de la estación hidrométrica Quibdo. Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del Instituto de Estudios Ambientales, IDEAM.

Con los resultados obtenidos se diseñó la curva de calibración de caudales de la sección (Figura 7), la cual fue transitada a lo largo del tramo de río considerado, ya que ante la falta de una batimetría detallada este proceso arroja una información aceptable de cómo es el comportamiento del río en el trayecto considerado.

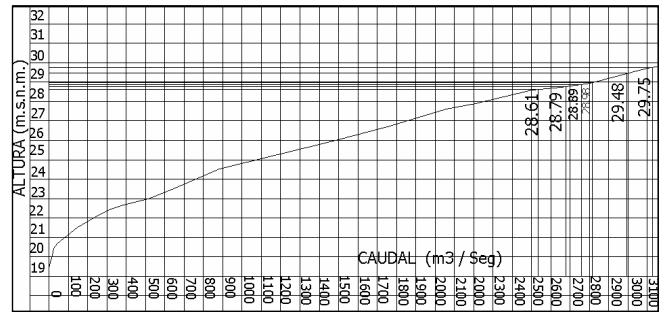


Figura 7. Curva de calibración de caudales Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del Instituto de Estudios Ambientales, IDEAM.

Tabla 3. Cálculo de caudales para el diseño de la curva de calibración. Estación Quibdo. Río Atrato.

Cálculo de caudales para el diseño de la curva de calibración de caudales estación Quibdo - Corriente del Atrato					
h (m.s.n.m.)	Área (m²)	PM (m)	RH (m)	V (m/seg)	Q (m³/seg)
19,41	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19,91	22,490	57,206	0,393	0,540	12,145
20,41	67,003	103,716	0,646	0,540	36,182
20,91	132,816	132,234	1,004	0,600	79,690
21,41	229,379	215,659	1,064	0,600	137,627
21,91	341,692	227,761	1,500	0,700	239,184
22,41	458,642	238,005	1,927	0,700	321,049
22,91	577,892	241,167	2,396	0,890	514,324
23,41	724,930	253,436	2,860	0,890	645,188
23,91	850,743	257,749	3,301	0,900	765,669
24,41	978,299	260,933	3,749	0,900	880,469
24,91	1106,174	262,334	4,217	1,000	1106,174
25,41	1234,330	263,735	4,680	1,000	1234,330
25,91	1362,674	265,136	5,140	1,100	1498,941
26,41	1491,112	266,136	5,603	1,100	1640,223
26,91	1619,550	267,136	6,063	1,150	1862,483
27,41	1749,113	271,919	6,432	1,150	2011,480
27,91	1879,426	275,702	6,817	1,200	2255,311
28,41	2020,989	299,485	6,748	1,200	2425,187
28,91	2166,489	309,289	7,005	1,300	2816,436
29,41	2314,614	319,093	7,254	1,300	3008,998
29,91	2465,989	328,897	7,498	1,320	3255,105

Fuente. Elaboración propia. Los datos de velocidad y pendiente de la tabla fueron tomados de los resultados de aforos en el río Atrato, realizados por la Universidad del Valle, que se encuentran consignados en el documento titulado "Estudios de navegabilidad del río Atrato", 1988.

Estimación de crecientes por método estadístico

Consiste esencialmente en determinar el caudal máximo que se espera se presente en una cuenca para un determinado periodo de retorno.

Tabla 4. Valores máximos anuales de caudales

Municipio		Quibdo
Corriente		Atrato
Caudales máximos anuales		
Estación	1104702 Quibdó	
Elevación 0027 m.s.n.m		
Nº	Año	VR anual (m³/seg)
1	1984	2897
2	1985	2767
3	1986	2320
4	1988	2345
5	1989	2320
6	1990	2140
7	1991	2300
8	1992	2200
9	1993	2300
10	1994	2505
11	1995	2200
12	1996	2505
13	1997	1956
14	1998	2300
Media		2361,071
Desv/esta		243,862
Covarianza		0,103284476

Con base en los datos multianuales de la estación hidrométrica Quibdó, se realizó el cálculo del caudal máximo esperado para el cauce del río Atrato, considerando diferentes periodos de retornos y utilizando el método de Gumbel o máxima ley de distribución de valor extremo (Tabla 5)

Tabla 5. Estimación estadística de crecientes.

Estimación caudal máximo Gumbel		
Periodo de retorno		Máximo a estimar
AÑOS	K	Q (m³/seg)
5	0,980624058	2600,208
10	1,723989428	2781,487
15	2,143389888	2883,763
20	2,437043337	2955,374
50	3,360018482	3180,452
100	4,051658471	3349,117
Probabilidad de valor extremo tipo I (EVI)		
XT	YT	Variables (ejemplo)
Q (m³/seg)		Periodo de retorno (5 años)
2536,520	1,499939987	α 190,1384402
2679,205	2,250367327	U 2251,323521
2759,707	2,673752092	YT 1,499939987
2816,072	2,970195249	XT 2536,51977
2993,232	3,901938658	
3125,989	4,600149227	

Fuente: elaboración propia.

2.1 Fórmulas utilizadas para el cálculo.

Estimación de eventos extremos por Gumbel:

$$Q \text{ máx.} = Q (1 + KCv) \tag{1}$$

Siendo:

Q máx.: Caudal máximo a estimar en m³/seg. Q: Valor promedio de los caudales de la serie en m³/seg.

K: Coeficiente de frecuencia, que se halla de:

$$K = - \frac{1}{\alpha n} \ln [- \ln (\frac{Tr-1}{Tr})] - \frac{Yn}{\alpha n} \tag{2}$$

De donde:

αn, Yn: Son parámetros estadísticos que dependen de la serie y se determinan en función de la longitud de la serie. Para 14 valores de registros:

$$\alpha n = 1.0095$$

$$Yn = 0.5100$$

ln: Representa el logaritmo natural

Cv: Es el coeficiente de variación. Se halla de la siguiente manera:

$$Cv = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\frac{Qi}{Q} - 1)^2}{n-1} \right]^{1/2} \tag{3}$$

De donde:

Qi : Representa el valor del caudal para el año i -ésimo

Q : El valor medio de la serie de caudales

n : Número de elementos de la serie.

Distribuciones de valores extremos tipo I (EVI)

$$\alpha = \left(\frac{\sqrt{6}s}{\pi} \right) \tag{4}$$

(s = desviación estándar)

$$U = \bar{x} - 0.5772\alpha \tag{5}$$

(\bar{x} = media aritmética)

$$YT = - \ln [\ln (\frac{T}{T-1})] \tag{6}$$

$$XT = U + \alpha YT \tag{7}$$

U = punto de máxima densidad de probabilidad.

T = periodo de retorno.

YT = variable reducida en un periodo de tiempo. XT = valor de caudal esperado

Con los cálculos de caudales máximos esperado para el río Atrato se ingresó a la curva de calibración de caudales y se determinaron los niveles de crecientes estimados.

Los resultados del cruce de la información de valores extremos y de la curva de calibración de caudales se relacionan en la Tabla 6.

Tabla 6. Niveles de la sección del río para un determinado caudal estadístico

Periodo de retorno (años)	Caudal m ³ /seg	Nivel de la sección (m.s.n.m.)
5	2536,52	28,61
10	2679,205	28,79
15	2759,707	28,89
20	2816,072	28,98
50	2993,232	29,48
100	3125,989	29,75

Fuente. Elaboración propia.

Resultados y discusión

Con la ayuda de la curva de calibración, la estimación de eventos extremos utilizados para el cálculo de crecientes, la cartografía de la zona, los resultados obtenidos de la interpretación de imágenes, y los datos recolectados en terreno, se pudo hacer una predicción o estimación de áreas de futura inundación, según diferentes periodos de recurrencia o retorno.

Se tomó también para el perfeccionamiento final del plano, información consultada en los mapas de riesgos del casco urbano del municipio de Quibdó (elaborado por la Defensa Civil), en el de zonificación preliminar de amenazas geológicas de la cabecera municipal de Quibdó – Chocó (elaborado por Ingeominas), y el mapa de suelos del municipio de Quibdó.

Se procedió entonces a delimitar en la cartografía las zonas amenazadas por inundación, para las cuales, y ante la cercanía de las estimaciones de niveles arrojados por la curva de calibración, se pensó finalmente en dos formas de clasificación, así:

AMENAZA ALTA Correspondientes a los periodos de retorno de 5 a 20 años.

AMENAZA MEDIA Correspondiente a los periodos de retorno de 50 a 100 años.

Lo anterior considerando que la diferencia entre los datos no fue tan significativa como para plantear otra clasificación.

Zonas altamente amenazadas por las inundaciones en la cabecera municipal de Quibdó

Se concluyó que los barrios que tienen zonas con alturas entre los 25 y 27 m.s.n.m. o inferiores y que se encuentran cercanos a los cauces de los ríos Atrato, Cabí, quebrada La Yesca y caño El Caraño, presentan alta amenaza de sufrir



Figura 9. Mapa de zonificación de amenazas por inundación. Cabecera municipal de Quibdó Sector sur. Desembocadura de la quebrada La Yesca al río Atrato, sitio denominado La Y

Fuente. Elaboración propia tomando como bases cartográficas la información consultada en los mapas de riesgos del casco urbano del municipio de Quibdó (elaborado por la Defensa Civil), en el de zonificación preliminar de amenazas geológicas de la cabecera municipal de Quibdó – Chocó (elaborado por Ingeominas), y el mapa de suelos del municipio de Quibdó.

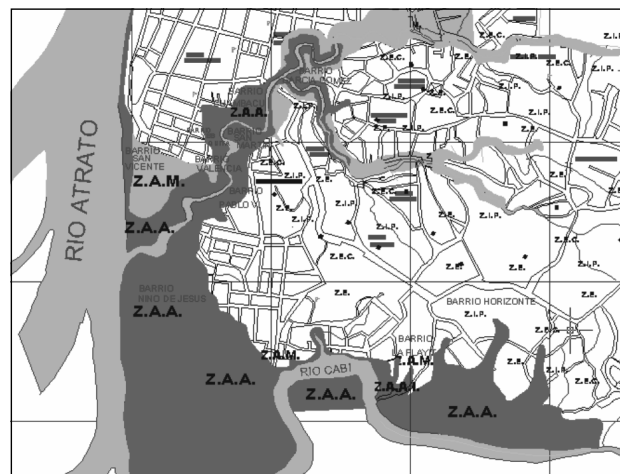


Figura 8. Mapa de zonificación de amenazas por inundación. Cabecera municipal de Quibdó, en donde se pueden observar en color rojo las zonas con amenaza alta y con amarillo las de amenaza media.

Fuente. Elaboración propia tomando como bases cartográficas la información consultada en los mapas de riesgos del casco urbano del municipio de Quibdó (elaborado por la Defensa Civil), en el de zonificación preliminar de amenazas geológicas de la cabecera municipal de Quibdó – Chocó (elaborado por Ingeominas), y el mapa de suelos del municipio de Quibdó.

inundaciones. Estos barrios con mayor posibilidad de sufrir inundaciones con períodos de recurrencia entre 5, 10, 15 y 20 años, son: San Vicente, entre el río Atrato y la quebrada La Yesca, parte de los barrios Valencia, La Yesquita, Chambacú, San Martín, Pan de Yuca, Pablo VI, García Gómez, zonas de Niño Jesús y Palenque afectados por la quebrada La Yesca, parte de La Playita, Horizonte y Alfonso López en la ronda del río Cabí (Figura 9).

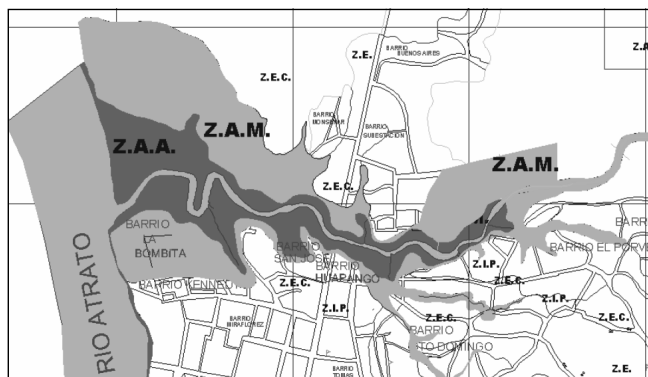


Figura 10. Mapa de zonificación de amenazas por inundación. Cabecera municipal de Quibdó Sector norte, desembocadura del caño El Caraño al río Atrato.

Fuente. Elaboración propia tomando como bases cartográficas la información consultada en los mapas de riesgos del casco urbano del municipio de Quibdó (elaborado por la Defensa Civil), en el de zonificación preliminar de amenazas geológicas de la cabecera municipal de Quibdó – Chocó (elaborado por Ingeominas), y el mapa de suelos del municipio de Quibdó.

Hacia el norte, amenazados por el río Atrato y El caño el Caraño, se encuentran parte de los barrios: Kennedy, La Bombita, Organización de Barrios Pobres del Chocó (OBA-PO), San José, parte baja de La Subestación, y Huapango.

Zonas medianamente amenazadas por las inundaciones en la cabecera municipal de Quibdó

Otros barrios o zonas con riesgos menores de sufrir inundaciones, son: El Paraíso y El Porvenir, parte de los barrios Kennedy, La Bombita, El Caraño, San José, Huapango, La Subestación, San Vicente, Valencia, Las Brisas, García Gómez, Pan de Yuca, La Aurora, Niño Jesús y La Playita.

Conclusiones

Al analizar los resultados obtenidos en el estudio, en el que se analizó y confrontó gran cantidad de información, todo esto apoyado de la visita a la respectiva zona de estudio, se llega a las siguientes conclusiones:

La causa más notoria de las inundaciones en Quibdó se debe a las crecientes del río Atrato, las cuales remansan la quebrada La Yesca, el caño El Caraño y el río Cabí, produciendo además el efecto de aguas reversibles, sin que necesariamente existan lluvias concentradas en los alrededores inmediatos a Quibdó.

También se presentan inundaciones en Quibdó cuando se cumplen dos condiciones simultáneas: un nivel alto del río Atrato y eventos de lluvias concentrados en sus alrededores, lo que produce un aumento sustancial en los cauces (Atrato y afluentes). En este sentido esto no es un fenómeno nuevo, pues los habitantes de Quibdó apostados a las orillas de los ríos construyen sus viviendas levantadas un poco del nivel normal del río. Lo preocupante para los habitantes de Quibdó es cuando los niveles de las aguas del río Atrato sobrepasen los 27 m.s.n.m.

Las inundaciones que han ocurrido en el casco urbano del municipio de Quibdó no son el producto de avenidas fuertes, repentinas y destructivas de las aguas del río Atrato, en el sentido de que estas no fluyen a velocidades altas, de tal manera que no provocan el derrumbamiento de las viviendas. Estas se han formado por el aumento paulatino del nivel de las aguas de los ríos y quebradas, claramente perceptibles por las personas que habitan estos sitios. Como consecuencia de lo anterior, las emergencias vividas por los habitantes de dichas áreas se han limitado a evacuar previamente sus hogares y a llevar consigo o guardar en lugares altos los objetos que se puedan deteriorar con el agua (muebles y enseres), mientras sus niveles vuelven a bajar.

Las inundaciones que se puedan presentar en el futuro en el casco urbano del municipio de Quibdó, como consecuencia del crecimiento de las aguas del río Atrato, se deberá a que se modifiquen drásticamente las condiciones naturales e históricas que hasta ahora se han presentado. Los eventos más significativos que pudieran modificar el crecimiento natural del río pueden ser: el depósito y acumulación exagerada de basuras en su cauce y unas condiciones prolongadas de fuertes lluvias, o la combinación de las dos.

La vulnerabilidad de las zonas delimitadas en los planos se hace mayor en la medida en que existe una alta población sobre estas áreas, lo que ocasiona que cada día las inundaciones pueden producir mayores efectos sobre los bienes e infraestructura de las poblaciones.

Dentro de las imágenes estudiadas, las fotografías aéreas fueron la fuente de análisis de mayor importancia, en comparación con las de radar y de satélite; esto debido entre otros, a la escala de trabajo y a la posibilidad de hacer estereoscopia, lo que permitió hacer un estudio más puntual, aspecto importante a la hora de estudiar la geomorfología de un lugar.

Una de las ventajas que tienen las imágenes de radar, entre otras, es que por ser producidas por un sensor activo del espectro de las microondas, garantizan en estas la no presencia de nubosidad.

Las imágenes Landsat son de gran utilidad para la interpretación de cobertura vegetal, usos del suelo, análisis de acumulación del agua y estudios de sedimentación de los ríos, siempre y cuando presenten un porcentaje muy pequeño de nubes (menor al 10 % del área de la imagen), o ninguno.

Recomendaciones y perspectivas

Las autoridades municipales pueden utilizar este tipo de información para impedir en estas zonas el crecimiento de la ciudad o simplemente la construcción descontrolada de viviendas en áreas de amenazas.

Para la realización de un proyecto como el presente se debe investigar primero el tipo y la calidad de la información existente, con el objetivo de determinar la conveniencia o no del mismo. Algo importante, además, es establecer el alcance que se le pueda dar al trabajo y los costos de su realización.

Es indispensable realizar una visita previa de reconocimiento a la zona de estudio con el objetivo de tomar los testimonios de sus habitantes, para así ir consolidando la información de antecedentes históricos del fenómeno estudiado.

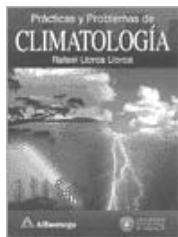
Agradecimientos

El autor agradece de manera especial a las siguientes personas que colaboraron sinceramente con sus conocimientos, o simplemente con su disposición personal, para la culminación exitosa del presente trabajo: Dr. Jaime Alberto Maya Guerrero, Director del Centro Interamericano de Fotointerpretación CIAF – IGAC. Dr. Ivan Lizarazu, Director del Proyecto. Profesor de Análisis e Interpretación de Imágenes, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital. Dr. Alberto Cristancho, Director Externo del Proyecto (CIAF). Dr. German Barreto, Coordinador Sección de Ingeniería de INGEOMINAS, Biólogo. Hayber Oduber Maturana Córdoba, Hermano. Licenciado. Agner Maturana Córdoba, Hermano. Microbiólogo. Lenis Maturana Córdoba, Hermano.

Bibliografía

- Alvares, V. J., Manual de ERDAS IMAGINE., Versión 8.3.1., Mayo, 2000.
- Chuvieco, EMILIO, Fundamentos de Teledetección Espacial, Ediciones RIALP, S.A., Madrid, 1996.
- Defensa Civil Seccional Chocó., Mapa de riesgos del casco urbano del municipio de Quibdo., Quibdó, 1998.
- Eslava Ramirez, J. A., Climatología del pacífico colombiano, Bogotá., 1994.
- EPA - Agencia De Protección Ambiental De EU., Environmental Protection Agency – <http://www.epa.gov/>, 2002.
- IDEAM., Estadísticas hidrológicas de Colombia., 1990.
- IGAC., Estudio general de suelos del municipio de Quibdo., Bogotá., 1977.
- Ingeominas., Análisis técnico del mapa zonificación preliminar de amenazas geológicas en la cabecera municipal de Quibdó – Chocó., Quibdó., 1998.
- Ministerio del Medio Ambiente de España., Guía para la elaboración de estudios del medio físico., Solana e hijos, Madrid, 1996, pp. 795.
- Ministerio de Transporte., Mapa Fluvial del río Atrato., 1994.
- Municipio de Quibdo., Informe Preliminar Plan de Ordenamiento Territorial., Quibdo., 1997.
- Murillo Forero, J. A., Ejercicios Prácticos de Fotogrametría Elemental., Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1987.
- Riaño Melo, O., Guía de usuarios de ILWIS., 1998.
- Sociedad Cartográfica de Colombia., Revista cartográfica. Bogotá, Febrero, 1998.
- Tubos Moore., Manual Hidráulico de alcantarillados y Normas de Diseño., Bogotá, 1987.
- Universidad del Valle., Estudio de navegabilidad del río Atrato., 1988.
- Ven Te Chow., Hidráulica de canales abiertos., Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 1994, pp. 667.
- Ven Te Chow., Maidment, D., Mays, L. W., Hidrológica aplicada., Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 1994, pp. 584.

novedades **Alfaomega Colombiana S.A.**



CLIMATOLOGÍA

Coedición: Alfaomega - Universidad Politécnica de Valencia

Dirigido a estudiantes y profesionales en las áreas de climatología y meteorología, y de áreas como ecología, recursos naturales y medio ambiente que encontrarán en este librouna serie de prácticas y problemas de climatología.

Resumen del contenido:

1. Toma y análisis de datos 2. Probabilidad de ocurrencia de un suceso metereológico 3. Humedad y temperatura 4. Viento 5. Radiación extraterrestre 6. Radiación neta y evatranspiración potencial de referencia 7. Balance de humedad en el suelo 8. Clasificación climática según unesco-fao 9. Problemas apéndices bibliografía

Adquiera nuestros textos en el punto de venta **Alfaomega Carrera 15 No 64a - 29** o en las principales librerías del país.

Afíliese a nuestro **CLUB DEL CONOCIMIENTO** a través de nuestra página web, y reciba descuentos en nuestro punto de venta, contenidos actualizados vía Internet, información de novedades, prioridad en productos promocionales y entregas a domicilio sin costo adicional.

Visite nuestra página Web:
www.alfaomega.com.co