

# ESTUDIOS PARA LA DELIMITACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES EN POBLACIONES URBANAS

Ingeniero

**Zamir Maturana Córdoba<sup>1</sup>**

zmaturana@gmail.com<sup>1</sup>

Recibido: 15 de Marzo 2012

Aprobado: 20 de Abril 2012

## Resumen

Para el estudio se analizan las condiciones pluviométricas propias de una zona del territorio colombiano. En un trabajo como este, inicialmente se hace la visualización de zonas inundables a través de interpretación de imágenes de radar, de satélite y fotografías aéreas, todo esto apoyado de la comprobación en terreno de los datos interpretados. Como información adicional necesaria para el planteamiento de conclusiones, se deben estudiar otras variables como las condiciones climáticas, geológicas, de temperatura, topográficas, series y ocurrencias históricas hidrológicas e hidrográficas en la región. Después del análisis de datos y cruce de información, las imágenes que brindan mayor confianza por muchas razones, entre las que se pueden destacar las escalas, la cantidad y calidad de las mismas, y la fecha de toma son las fotografías aéreas; las de radar, por ser producidas por un sensor activo de rango de las microondas, por su esencia de eliminación completa de obstáculos climáticos son también importantes a la hora de analizar visualmente la topografía del sector.

**Palabras Claves:** Amenaza por inundación, imágenes de radar, imágenes de satélite, fotografías aéreas, mapa topográfico, curva de calibración, corriente.

## Abstract

For the study analyzes the rainfall conditions typical of a Colombian territory. In a job like this, the display is initially floodplain through interpretation of radar images, satellite and aerial photographs, all supported field testing of the interpreted data. As additional information necessary for drawing conclusions, it should consider other variables such as weather, geology, temperature, topography, series and historical occurrences and hydrological in the region. After data analysis and cross-checking information, images that provide greater confidence for many reasons, among which stand out the scales, the quantity and quality of this, and the date of aerial photographs are taken, the radar, being produced by an active sensor microwave range, for its essence of complete elimination of weather barriers are also important when analyzing the topography of the area visually.

**Keywords:** flood hazard, radar images, satellite images, aerial photographs, topographic map, calibration curve, current.

<sup>1</sup>Ingeniero Topográfico, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". Docente, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". Magíster en Ingeniería de Transportes, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.

## 1. Introducción

Las imágenes de satélite en zonas con alta pluviosidad tienen un papel secundario producto del gran porcentaje de nubes que dificultaban cualquier tipo de análisis. Como complemento a los resultados parciales obtenidos, se estudia con datos multianuales de series históricas de caudales y niveles máximos de los ríos, registrados en una estación hidrográfica y con el área de las secciones transversales de sus cauces en el sitio de ubicación de las estaciones, unas curvas de calibración para analizar los valores de caudales máximos que dichas secciones de los ríos pueden transportar, y dependiendo de esto se estiman estadísticamente las implicaciones que tendría, o que ha tenido el rebase de sus aguas, delimitando así, las respectivas zonas inundables.

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 éstas 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 cálculo 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 crecientes<sup>2</sup>. 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 considerara la localización específica, al igual que la frecuencia, la intensidad y las áreas de influencia o posible cobertura.

En un trabajo como este, se parte de la recopilación y el análisis de diferentes fuentes de información para producir una información confiable, se analizan la interpretación de imágenes de satélite, de radar y fotografías aéreas, apoyado de datos geológicos, de suelo, hidrográficos del sector, entre otros factores.

## 2. Metodología

### Materiales y Métodos

#### 2.1. Equipo utilizado

**2.1.1. Procesamiento de Datos:** Para el análisis de información de imágenes se puede utilizar el programa de interpretación ERDAS.

**2.1.2. Equipo Complementario:** Computador, estereoscopio de espejos, estación digital.

**2.1.3. Información Empleada:** El primer paso en cualquier análisis como este es recolectar información. Se estudian fotografías aéreas, imágenes de radar, imágenes del satélite, 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 y su estudio batimétrico. Todo esto apoyado con visitas de campo a la zona de estudio.

<sup>2</sup>Ven Te Chow, Maidment, D., Mays, L. W., Hidrológica aplicada., Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 1998., 584 Págs.

Para la selección de las imágenes de satélite y fotografías aéreas, cuando se trate de zonas con alta pluviosidad, se debe tener en cuenta: la cobertura de nubes presentes 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.

## 2.2. Análisis de Fotografías Aéreas

La primera fase del proyecto comprenderá la interpretación de fotografías aéreas. Éstas se considerarán de vital importancia debido a las bondades de sus escalas y a la posibilidad de hacer estereoscopia, lo que permite un análisis más detallado, en comparación con las imágenes Landsat e In-tera que manejan escalas mucho más pequeñas.

El proceso de fotointerpretación comprenderá 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).

Con los resultados de esta fotointerpretación se puede ir conformando un plano preliminar de zonificación de áreas inundables, a través de su localización en la cartografía disponible. Estos datos deben ser verificados posteriormente en el terreno.

En las fotografías se puede ir analizando con detalle el comportamiento que tienen las aguas de los ríos en diferentes épocas, así como los barrios de las poblaciones afectadas por sus eventuales avenidas o crecientes.

Se observa 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.

## 2.3. Análisis de Imágenes de Satélite

Siguiendo el principio de hacer un estudio multitemporal, se continúa con el análisis de imágenes de satélite, con éstas se presentan muchas dificultades en zonas de alta pluviosidad, por lo que sólo se puede realizar de manera general y en cuanto



Figura 1. Fotografía aérea

Sea posible, es 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.

## 2.4. 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.



**Figura 2.** Análisis de índices de vegetación, Imagen de satélite

Con las imágenes de radar, debido al contraste de colores grises y negro, se puede 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. El procedimiento de interpretación visual en formatos análogo y digital, consiste en la identificación de centros poblados, acumulaciones de agua y relieve del terreno.

## 2.5. Georeferenciación de Imágenes

Se debe contar con imágenes georeferenciadas previamente.

## 2.6. Manejo de Información Cartográfica

Se pueden tomar como base para analizar, comparar, trasladar y comprobar la información obtenida del proyecto, planchas del IGAC a escalas grandes (1:2000 y 1: 5000). La bondad de escalas grandes como 1:2000, es que permite manejar mayores rangos de precisión, en lo que respecta al análisis de detalles, pendientes y niveles.

## 2.7. Refuerzo de la información:

Comprende 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 recorren los sitios referenciados en las imágenes como zonas inundables, se entrevista 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, entre otras preguntas.

## 2.8 Estudio hidrológico e hidrográfico

Se debe analizar el comportamiento de la precipitación durante el año en la zona de estudio, la presencia de estaciones hidrométricas sobre las corrientes de los ríos.



**Fotografía 1.** Comportamiento de las aguas de un río.

Estudiando los registros de dichas estaciones se analiza el comportamiento de la distribución del caudal medio mensual, medido en cada una de ellas y comparándolos con la precipitación.



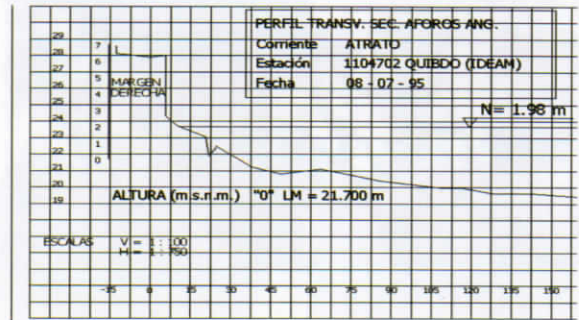
**Figura 1.** Valores medios mensuales de precipitación.

## 2.9. Análisis de inundación

### 2.9.1. Determinación de Caudales Máximos:

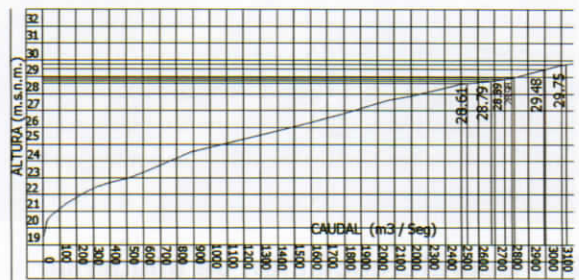
Teniendo en cuenta el número de estaciones hidrométricas y las batimetrías de los ríos, se plantea para la estimación de caudales máximos, una relación entre los datos de caudales, niveles máximos registrados en las estaciones hidrográficas y el área de las secciones transversales de los cauces de los ríos en el sitio de ubicación de dichas estaciones, con el objetivo de analizar los valores de caudales máximos que dichas secciones de los ríos pueden transportar. }

Posteriormente, con los resultados obtenidos se procede 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 las corrientes representadas en la cartografía, determinar las respectivas zonas inundables.



**Figura 2.** Sección transversal del cauce de un río

Con los resultados obtenidos se diseña una curva de calibración de caudales de la sección (figura 3).



**Figura 3.** Curva de calibración de caudales.

### 2.9.2. 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.

Con base en los datos multianuales de una esta-

CÁLCULO DE CAUDALES PARA EL DISEÑO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN DE CAUDALES					
h (m.s.n.m.)	Área (m <sup>2</sup> )	PM (m)	RH (m)	V (m/seg)	Q (m <sup>3</sup> /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

**Tabla 1.** Valores máximos anuales de caudales

CAUDALES MÁXIMOS ANUALES		
ELEVACIÓN 0027 m.s.n.m		
Nº	AÑO	VR ANUAL (m <sup>3</sup> /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

**Tabla 2.** Estimación estadística de crecientes

ción hidrométrica, se realizó el cálculo del caudal máximo esperado para el cauce del río, considerando diferentes periodos de retornos y utilizando el método de Gumbel o máxima ley de distribución de valor extremo (tabla 3).

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	$\alpha$	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		

**Tabla 3.** Estimación estadística de crecientes

### 2.9.3. Fórmulas utilizadas para el cálculo.

Estimación de eventos extremos por Gumbel:

$$Q \text{ máx.} = Q (1 + KCv) (1)$$

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:

$$K = -\frac{1}{\alpha n} \ln \left[ -\ln \left( \frac{T_r - 1}{T_r} \right) \right] - \frac{Y_n}{\alpha n} \quad (2)$$

De donde:

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

$$= 1.0095$$

$$Y_n = 0.5100$$

$\ln$ : Representa el logaritmo natural

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

$$C_v = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i}{Q} - 1 \right)^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad (3)$$

De donde:

$Q_i$ : 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)**

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

( $s$  = desviación estándar)

$$U = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad (5)$$

( $\bar{x}$  = media aritmética)

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

$$XT = U + \alpha YT \quad (7)$$

$U$  = punto de máxima densidad de probabilidad.  
 $T$  = periodo de retorno.

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

Finalmente, con los cálculos de caudales máximos esperado, se ingresó a la curva de calibración de caudales y se determinó los niveles de crecientes estimados.

### 3. Fundamentación Teórica

**Población:** es un grupo de personas que viven en un área o espacio geográfico. Para la demografía, centrada en el estudio estadístico de las poblaciones humanas, la población es un conjunto renovado en el que entran nuevos individuos (por nacimiento o inmigración) y salen otros (por muerte o emigración).

**Creciente:** No es sinónimo de inundación, aunque éstas 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.

**Inundaciones:** Para que haya inundación se requiere que exista una planicie aluvial; es decir, que el curso del agua transporte materiales sólidos, y que haya aumentos de caudal; más aún, las inundaciones son el proceso físico natural que continúa formando las planicies aluviales; no son

en forma alguna, una anomalía de la naturaleza.

**Amenazas:** 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 considerará la localización específica, al igual que su frecuencia, su intensidad y sus áreas de influencia o posible cobertura.

**Vulnerabilidad:** Se define como “la condición en que se encuentran las personas y los bienes expuestos a una amenaza, los cuales, por su grado de información y capacitación, o por su cantidad, ubicación, conformación material, disponibilidad, entre otros, tienen un determinado grado de capacidad o habilidad para afrontar o soportar la acción del evento posible”.

**Riesgo:** Es el resultado de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. Esta relación indica la probable pérdida de bienes y personas en caso de presentarse un evento determinado. Dependiendo de la forma, intensidad y cobertura de las pérdidas probables, el riesgo puede ser calificado como alto, medio o bajo.

#### 4. 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 puede hacer una predicción o estimación de áreas de futura inundación, según diferentes periodos de recurrencia o retorno.

Se debe tomar también para el perfeccionamiento final del plano, información consultada en mapas de riesgos, en estudios preliminares de amenazas geológicas y en el mapa de suelos.

Se procede finalmente a delimitar en la cartografía, las zonas amenazas por inundación, las cuales se pueden clasificar 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.

#### 5. Conclusiones

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

Una de las causas de las inundaciones en poblaciones urbanas, se debe a las crecientes de los ríos, las cuales remansan las aguas, produciendo el efecto de aguas reversibles, sin que necesariamente existan lluvias concentradas en los alrededores de los municipios.

También se pueden presentar inundaciones cuando se cumplen dos condiciones simultáneas: un nivel alto del río y eventos de lluvias concentrados en sus alrededores, lo que produce un aumento sustancial en los cauces.

Las inundaciones como se cree en ocasiones, no siempre son el producto de avenidas fuertes, repentinas y destructivas de las aguas de los ríos, en el sentido de que éstas no fluyen a velocidades altas, de tal manera que no provocan el derrumbamiento de las viviendas. Éstas se pueden formar también por el aumento paulatino del nivel de las aguas de los ríos y quebradas, claramente perceptibles por las personas que habitan estos sitios.

Dentro de las imágenes estudiadas, las fotografías aéreas son 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 permite 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 éstas la no presencia de nubosidad.

## Bibliografía

ALVARES, Víctor Julio. Manual de ERDAS IMAGINE, Versión 8.3.1. Mayo de 2000.

CHUVIECO EMILIO, Fundamentos de Teledetección Espacial, Ediciones RIALP, S.A. Madrid 1996.

EPA (2002) ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – <http://www.epa.gov/>  
AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE EU

Eslava Ramirez, J. A., Climatología del pacifico colombiano, Bogotá., 1994.

IDEAM., Estadísticas hidrológicas de Colombia., 1990.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, MURILLO FORERO JULIO ALBERTO. Ejercicios Prácticos de Fotogrametría Elemental. 1987.

Ministerio del Medio Ambiente de España., Guía para la elaboración de estudios del medio físico, Solana e hijos, Madrid, 795 Pág., 1996.

RIAÑO MELO, Orlando. Guía de Usuarios de ILWIS. 1998.

SOCIEDAD CARTOGRÁFICA DE COLOMBIA. REVISTA CARTOGRÁFICA. Bogotá, Febrero de 1998.

TUBOS MOORE. Manual Hidráulico de alcantarillados y Normas de Diseño. Bogotá. D.E. 1987.

Ven Te Chow., Hidráulica de canales abiertos., Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 1994., 667 págs.

Ven Te Chow., Maidment, D., Mays, L. W., Hidrológica aplicada., Mc Graw-Hill Interamericana S.A., 1994., 584 Págs.

Web site EPA. [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

TUBOS MOORE. Manual Hidráulico de alcantarillados y Normas de Diseño. Bogotá. D.E. 1987.

