

VULNERABILIDAD Y USO DE LA PLANICIE DE INUNDACIÓN

Ana Cecilia Arbeláez A.¹, Lilian Posada G.² y María Victoria Vélez O.³

*Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*

RESUMEN

Para definir los retiros mínimos a los cauces naturales, además del criterio geomorfológico, se requiere un análisis de vulnerabilidad y riesgo que permita determinar técnicamente la extensión y el mejor uso de la planicie inundable. En este trabajo se presentan los lineamientos necesarios para determinar la vulnerabilidad hidrogeomorfológica de las zonas de inundación considerando diferentes niveles de riesgo hidrológico y los parámetros geomorfológicos más determinantes en la delimitación de la extensión ocupable de la planicie de inundación.

ABSTRACT

Besides de geomorphic approach, vulnerability and risk analysis are required to technically define the extension and proper occupation of the floodplain. This paper presents the necessary criteria to determine the hydrogeomorphologic vulnerability of the floodplain under several risk levels, in order to recommend its most appropriate use.

¹ Profesora Universidad del Cauca, acarbela@ucauca.edu.co

² Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia, lposada@perseus.unalmed.edu.co

³ Profesora Asociada Universidad Nacional de Colombia, mvvelez@perseus.unalmed.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con un régimen hidrológico muy variable que presenta alternativamente sequías e inundaciones extremas. Cuando se trata de determinar la aptitud ambiental de posibles zonas de expansión urbana o la localización de nueva infraestructura, se debe determinar la vulnerabilidad de la zona a las inundaciones.

La presión por el uso del suelo, la carencia de normas que reglamenten una utilización adecuada de las zonas de inundación en Colombia o la deficiencia de las normas existentes hacen que frecuentemente se presenten invasiones a las zonas ribereñas o inclusive al cauce mismo. Las riberas de algunos ríos colombianos se han visto inundadas con mucha frecuencia, ocasionando pérdidas en todos los renglones de la economía: agrario, ganadero, ecológico, institucional y pérdidas de vidas humanas y de infraestructura; por esto se requiere una reglamentación técnicamente fundamentada para delimitar las zonas de retiro a los cauces naturales y planificar el uso de la planicie de inundación. Cuando se trata de determinar la aptitud ambiental de posibles zonas de expansión urbana o la localización de nueva infraestructura, se debe determinar la vulnerabilidad de la zona a las inundaciones. La metodología de análisis que se presenta en este trabajo considera los criterios de vulnerabilidad y riesgo hidrológico para diferentes niveles de creciente.

2. METODOLOGÍA PROPUESTA

Se consideran los aspectos geomorfológicos más relevantes para definir las características de la planicie de inundación; se analiza la hidrología de la cuenca para obtener la magnitud y la frecuencia asociada a diferentes eventos de inundación; se realiza un análisis hidráulico de cada una de las crecientes para registrar los niveles y velocidades de flujo sobre la planicie y estimar la vulnerabilidad y el riesgo asociados en cada caso. La metodología propuesta se aplicó exitosamente al río San Carlos, en la zona Andina Colombiana.

Para el análisis morfométrico basta utilizar cartografía a escala 1:25000, a partir de la cual se pueden cuantificar los parámetros geomorfológicos más importantes en la respuesta hidrológica de la cuenca, tales como área de drenaje, pendiente de la cuenca, longitud principal del cauce, perfil altitudinal del cauce, etc. La zona específica de estudio - alrededores de la corriente - debe tener un mayor detalle en la cartografía (preferiblemente a escala 1:2000), la cual se debe complementar con levantamientos topográficos en las secciones identificadas como posibles controles al flujo.

2.1. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

El estudio de las formas del paisaje del sistema fluvial permite identificar los controles físicos naturales que ofrece la cuenca al paso de una creciente. Para el estudio geomorfológico se requiere el análisis de fotointerpretación asistido con trabajo de campo. La litología (tipo de formación rocosa, textura, grado de meteorización, actividad tectónica, etc.) y las estructuras de falla presentes en la cuenca determinan el tipo de cauce (aluvial o controlado por roca) y de valle, al igual que la calidad de los materiales que caracterizan los procesos de erosión, transporte y depositación.

La severidad de una creciente está íntimamente ligada con las características geométricas del canal principal; por ejemplo, un canal incisado podrá contener crecientes menos frecuentes que un canal donde el proceso dominante sea la depositación (cauces de planicie). Un cauce de montaña tiene características hidráulicas muy diferentes a uno de planicie; el gradiente del cauce está relacionado con el tamaño de los materiales, los cuales a su vez inciden en la rugosidad del canal y en la velocidad de propagación de la onda de creciente.

Con base en los parámetros antes descritos, en la forma de los valles y el patrón de alineamiento de la corriente (clasificado en función de la sinuosidad⁴, S), se identifica el Tipo de Corriente (TC) para el cual se ha asignado una determinada vulnerabilidad, según se indica en la Tabla 1 [2]

2.2. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La hidrología permite estimar los niveles de inundación para diferentes frecuencias, con base en la información histórica de caudales disponible para la cuenca o utilizando metodologías regionales, cuando no se tiene información adecuada.

Inicialmente se considera la calidad de la información hidrológica disponible analizando aspectos tales como longitud de registros, localización de las estaciones, datos faltantes y homogeneidad de los registros. El siguiente paso es aplicar las distintas metodologías para la estimación de eventos extremos según la calidad de la información hidrológica y el tamaño de cuenca tal como se recomienda a continuación:

- **Análisis de frecuencia.** Esta metodología se debe utilizar en aquellas cuencas en las que se dispone de, al menos, 25 años de registros de caudales máximos. Se adopta una distribución de probabilidad para estimar caudales (o niveles) para distintas frecuencias
- **Modelos lluvia-escorrentía.** Para analizar la respuesta hidrológica de la cuenca, se requiere la disponibilidad de registros de precipitaciones máximas para diferentes duraciones de lluvia, además de los usos actuales del suelo. El modelo lluvia-escorrentía más utilizado es el de la Hidrógrafa Unitaria. Esta metodología debe aplicarse a cuencas con áreas menores a 150 km², en las que se disponga de registros simultáneos de precipitación y caudal que permitan la calibración del modelo; en caso contrario, se pueden utilizar hidrógrafas unitarias sintéticas tales como la de Snyder, Williams y Hann, SCS, etc.
- **Método Racional.** A pesar de ser una metodología muy simple, el método Racional ofrece resultados adecuados para cuencas con áreas menores de 50 km², en climas tropicales.
- **Métodos de regionalización.** Se aplican cuando se tienen cuencas hidrológicamente similares con suficiente información hidrométrica que permitan hallar parámetros regionales tales como la media de los caudales máximos anuales y su desviación estándar.

⁴ La sinuosidad, S, se define como la relación entre la longitud del canal y la longitud del valle

Cuencas con áreas mayores a 1000 km² se deben subdividir en cuencas menores donde se pueda aplicar cualquiera de las metodologías anteriormente citadas. Los modelos lluvia-escorrentía consideran una relación lineal entre el estímulo (lluvia) y la respuesta (caudal) pero, dado que el fenómeno físico no es lineal, los resultados presentan una incertidumbre alta, por lo que han sido bastante cuestionados; sin embargo, son de amplia utilización en ingeniería. Los métodos de regionalización se aplican en cuencas con información escasa, pero las estimaciones se deben comparar con otras metodologías. Cuando se dispone de información adecuada, tanto en calidad como en la longitud de la serie de registros, el análisis de frecuencia es la metodología más recomendable.

2.3. ANÁLISIS HIDRÁULICO

El objetivo es estimar las velocidades y profundidades de flujo tanto en la planicie inundable como en el canal principal. La selección del modelo hidráulico a aplicar depende fundamentalmente de la información batimétrica y los recursos computacionales disponibles.

Existen en la literatura diversos modelos hidráulicos que se distinguen por el conjunto de ecuaciones que los gobiernan y por las simplificaciones asumidas. Pueden considerar flujo permanente o flujo transitorio (no permanente); pueden permitir la modelación de flujo rápidamente variado, pueden además ser modelos unidireccionales o considerar dos y tres dimensiones. En su mayoría, son modelos numéricos para los que se requiere discretizar el dominio de cálculo y utilizar técnicas de aproximación para encontrar la convergencia de la solución; por lo tanto, los resultados estarán afectados por el tipo de discretización espacial y por la técnica de aproximación utilizada. La escogencia del tipo de modelo depende de los objetivos del estudio, de la zona donde se va a aplicar y de la información disponible. Es importante considerar cuanta precisión se gana realmente al incrementar la complejidad del modelo utilizado, cuando se aplica a condiciones de campo donde no se tiene la información con el nivel de detalle requerido.

Para la evaluación hidráulica se debe caracterizar el tramo de interés con suficientes secciones transversales, según sean las restricciones del modelo a utilizar. Las secciones deben estar espaciadas de tal forma que representen adecuadamente las condiciones reales del terreno: donde se presenten cambios en la geometría (ampliaciones y reducciones bruscas), en la pendiente longitudinal, en los materiales del cauce y zonas aledañas (para determinar la rugosidad en cada sección). Con la información topográfica, de rugosidades y caudales de inundación se procede a realizar la evaluación hidráulica unidimensional y en régimen permanente. Se deben determinar la profundidad y velocidad que alcanza el flujo no solo dentro del canal sino también en las zonas inundables aledañas al cauce para determinar el grado de vulnerabilidad ante una creciente determinada según sea el desplazamiento - rápido o lento - de la onda de creciente (ver Tabla 1),

2.4. ANÁLISIS DE RIESGO Y VULNERABILIDAD HIDROGEOMORFOLÓGICA

Este enfoque pretende evaluar el riesgo al que está expuesta una comunidad ya establecida sobre la planicie inundable, ante la ocurrencia de un fenómeno natural. El riesgo es el producto de la amenaza y la vulnerabilidad. La amenaza es la probabilidad que se presente un evento natural, potencialmente desastroso; la vulnerabilidad es el

grado de pérdida de un elemento como consecuencia de un evento natural [6], por lo que esta última puede ser controlada.

Haciendo uso de una metodología análoga a la propuesta en el modelo DRASTIC empleada en hidrogeología para determinar la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación [1], se determinaron los principales criterios que determinan la vulnerabilidad de una zona a inundaciones, para identificar los usos posibles del suelo. Los principales parámetros que afectan la vulnerabilidad son:

2.4.1. Tipo de Corriente

La respuesta hidráulica de las corrientes será diferente según sea el valle, el patrón de alineamiento, pendiente y la relación de encajonamiento del canal, además de los materiales que conforman el cauce.

La relación de encajonamiento es un parámetro indicador del comportamiento del canal a largo plazo, que describe la relación del río con su valle y el grado de incisión del canal. Se propone utilizar una relación de encajonamiento (r.e.) obtenida como el cociente entre el ancho inundado para un período de retorno de 100 años y el ancho del canal para la creciente media multianual ($Tr = 2.33$ años). Entre más encajonado sea el canal (relación de encajonamiento cercana a la unidad) menor será la vulnerabilidad de la planicie a las inundaciones. Las crecientes son lentas en valles amplios o rápidas en valles encañonados y abanicos aluviales. Para estos últimos, las restricciones en el uso del suelo deben ser mayores.

La Tabla 1 presenta una clasificación de la vulnerabilidad hidrogeomorfológica de la planicie ante una inundación, la cual se obtiene con base en el tipo de valle, patrón de alineamiento del canal, sinuosidad (S), pendiente del lecho (P), relación de encajonamiento (r.e.) y propagación de la creciente. La vulnerabilidad a inundaciones en corrientes que se encuentran altamente encajonadas es baja ($TC = 0,1,2$); las restricciones de usos del suelo en los alrededores de éstas estarán condicionadas por la estabilidad de los taludes.

Tabla 1. Vulnerabilidad a las inundaciones según el tipo de corriente.

| TC | Patrón de Alineamiento | Forma del Valle | S | Gradiente P | r.e. | Propagación creciente | Vulnerabilidad |
|----|------------------------|----------------------|------|-------------|---------|-----------------------|----------------|
| 0 | Recto | Encañonado | <1.2 | 0.04 - 0.1 | <1.4 | rápida | baja |
| 1 | Recto | Amplio | >1.2 | <0.04 | <1.4 | lenta | baja |
| 2 | Sinuoso | Amplio | >1.4 | <0.02 | <1.4 | lenta | baja |
| 3 | Recto | Encañonado Amplio | >1.2 | 0.02-0.04 | 1.4-2.2 | rápida | media |
| 4 | Trenzado | Amplio | | | | lenta | alta |
| 5 | Sinuoso | Amplio | >1.5 | <0.02 | >2.2 | lenta | alta |
| 6 | Recto | Amplio | >1.2 | <0.02 | >2.2 | lenta | alta |
| 7 | Trenzado | Abanico aluvial | | | | rápida | alta |

2.4.2. Velocidad y Profundidad de flujo en la planicie de inundación

El poder erosivo del agua sobre las cimentaciones de una estructura ubicada sobre la llanura de inundación está asociado con la velocidad del flujo sobre la planicie; por tanto, se considera la velocidad como uno de los principales factores a tener en cuenta, puesto que incide en la magnitud de los daños. La velocidad del flujo en la zona más inmediata al cauce limita el uso del suelo a algunos sembrados (arroz) y a obras que se afecten muy poco por la presencia del flujo como parques, zonas deportivas, parqueaderos, etc.

La magnitud de la velocidad en la planicie se obtiene de la evaluación hidráulica; velocidades mayores de 1.5 m/s se consideran propias de crecientes extremas [5]. A mayores velocidades mayores deberán ser las restricciones de uso en las zonas ribereñas. Al igual que la velocidad, la profundidad que alcanza el flujo sobre la planicie restringe el uso del suelo a actividades que permitan cierta tolerancia a la inundación; por ejemplo, profundidades mayores de 1.5 m son indicativas de crecientes extremas [5].

Con el fin de determinar las primas que deben pagarse por daños ocasionados por inundaciones, la Administración de Seguros Federales de Estados Unidos (Federal Insurance Administration), fijó el porcentaje de daños causados a la infraestructura e inmuebles, para ciertos tipos de construcciones, de acuerdo con la profundidad de la inundación [4]. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos [3] propuso unas curvas de variación de los daños con respecto a la profundidad, para estructuras sin sótanos [7], las cuales se presentan en la Figura 1..

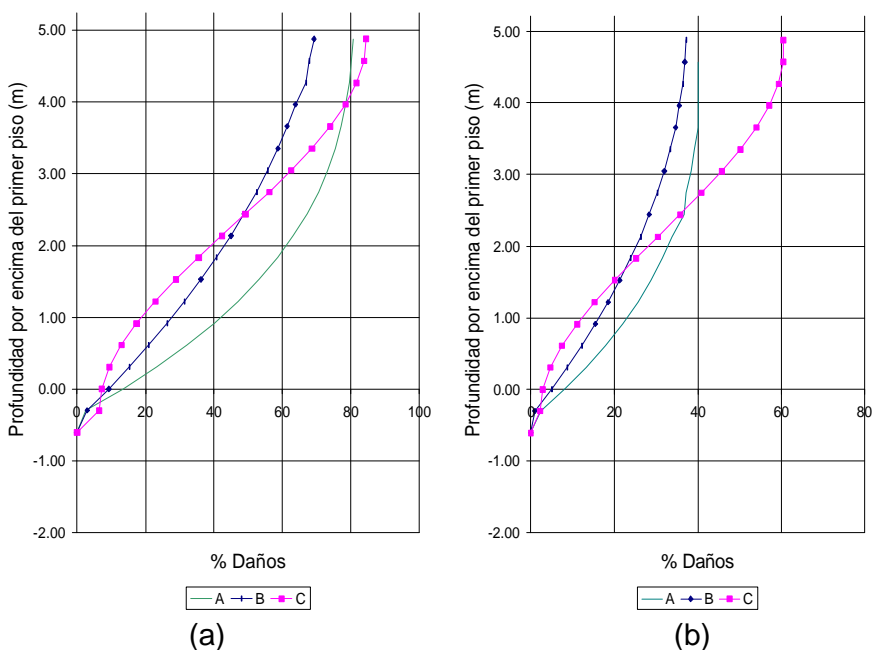


Figura 1. Variación de los daños según la profundidad de flujo, en estructuras sin sótanos; A: un piso; B: dos o más pisos; C: nivel entrepisos. (a) Estructuras residenciales y pequeños negocios, (b) Daño del amoblamiento como porcentaje del valor de la estructura [3].

2.5. PROPUESTA DE USOS DEL SUELO

Ante la presión por el uso del suelo, especialmente en áreas urbanas o densamente pobladas, y la carencia de normas para el uso del suelo en el país, las entidades encargadas del control y manejo de las zonas ribereñas deben definir un riesgo aceptable, fruto de un análisis económico en el que participen los interesados, asociándolo a la frecuencia que se requiera proteger. Por ejemplo, la frecuencia de inundación para áreas cultivadas debe ser mayor que la frecuencia para zonas de asentamientos humanos.

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos utiliza las crecientes con frecuencias de 10 y 100 años y la creciente estándar de diseño para determinar algunos usos probables y restricciones de la planicie de inundación [7], según el esquema mostrado en las Figuras 2 y 3.

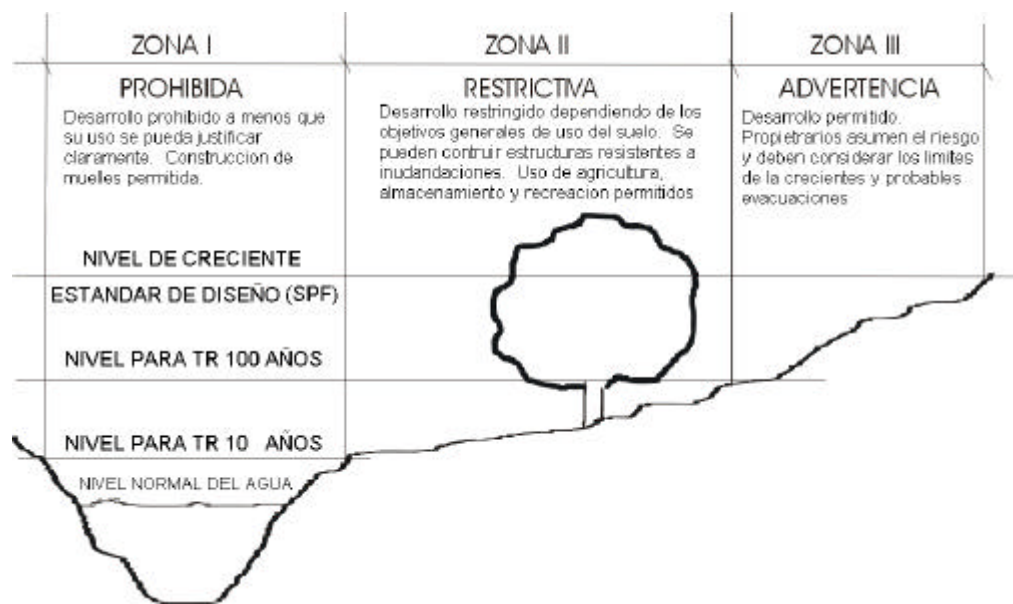
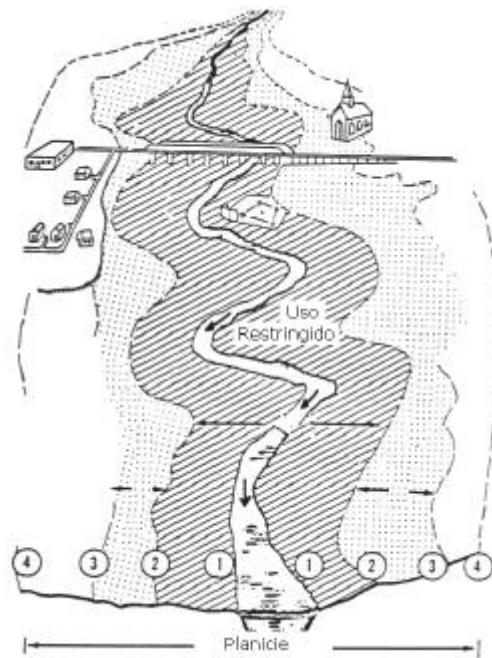


Figura 2. Restricciones en la planicie según la frecuencia de la inundación, vista transversal (Modificado de [7]).

La creciente estándar de diseño (SPF, Standard Project Flood) se define como el 40% de la creciente producida por la precipitación máxima probable, PMP.

Considerando como objetivo primordial la protección de vidas y bienes, se propone determinar los posibles usos y restricciones de las zonas aledañas a los cauces según sea la respuesta hidráulica a las crecientes (velocidades y profundidades en la planicie) y la vulnerabilidad asociada al tipo de corriente, TC. En la Tabla 2 se resume la propuesta de usos de las zonas ribereñas.



- 1- Límite del canal
- 2- Límite Zona I Prohibida
- 3- Límite Zona II Restrictiva
- 4- Límite Zona III Advertencia

Figura 3. Restricciones en la planicie según la frecuencia de la inundación, vista en planta. (Modificado de [7])

Tabla 2 Restricciones de uso a las zonas inundables.

| Usos | TC ^a | V _{max} ^c (m/s) | Y _{max} ^c (m) | Frecuencia de inundación ^d |
|--|-----------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Estructuras Portuarias | 0-1-2-3-5-6 | | | Tr < 10años |
| Parques lineales de recreación y ornamentación con sistemas de alarma | 0-1-2-3-4-5-6-7 | 0.76 ^b | 1.0 | Tr < 10 años |
| Cultivos y ganadería. | 0-1-2-3-4-5-6-7 | 0.76 ^b | 1.0 | Tr < 10 años |
| Galpones, establos, vías carreteables. | 0-1-2-3-4-5-6-7 | 0.76 ^b | 0.5 | Tr < 10 años |
| Parqueaderos pavimentados ⁵ | 0-1-2-3-4-5-6-7 | 2.0 | 0.5 | Tr < 10 años |
| Edificios (locales comerciales y habitación). Primer piso será utilizado para parqueaderos. | 0-1-2-3-4-5-6-7 | 0.76 ^b | x | 10<Tr<100 años ^e |
| Bodegas | 0-1-2-3-5-6 | 0.76 ^b | x | 10<Tr<100 años ^e |
| Grandes asentamientos, centros recreativos, complejos industriales, líneas vitales, hospitales, iglesias, entidades educativas (universidades, colegios, guarderías) | 0-1-2-3-5-6 | 0.0 | 0.0 | Tr > 100 años ^f |

⁵ Las restricciones serán tales que no ocasionen desplazamientos de los vehículos estacionados.

NOTAS TABLA 2

- a. Para las corrientes tipo TC = 0, 1, 2 no hay restricciones en la profundidad y velocidad para el uso puesto que no se presentan inundaciones. El retiro de la corriente estará condicionado por la estabilidad lateral de las bancas.
- b Velocidad máxima para prevenir la erosión del suelo (arenoso), de forma que esponga las cimentaciones. Posada, 1994
- c Restricciones que aplican a los tipo de corriente TC = 3, 4, 5, 6, 7
- d La frecuencia de inundación puede variar según sea el riesgo aceptable por la comunidad y debe estar acompañada de pólizas de seguros.
- e Si el límite de inundación para un período de retorno de 10 años, está entre el canal (corriente encajonada) o en una distancia menor de 15 m, ésta última deberá dejarse libre de edificaciones para conservar el entorno paisajístico.
- f Si el límite de inundación para un período de retorno de 100 años, está entre el canal (corriente encajonada) o en una distancia menor a 15 m y la estabilidad lateral de las bancas indica un retiro inferior a esta distancia, deberá dejarse un corredor de 15 m libre de edificaciones para conservar el entorno paisajístico.
- x Se seleccionará según el porcentaje de daño admisible

3. CONCLUSIONES

Es necesario fortalecer los mecanismos de reglamentación de las zonas ribereñas, fundamentados sobre criterios físicos geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, teniendo en cuenta una visión integral de la cuenca.

Ante la presión por el uso que sufren las zonas aledañas a los cauces se deben señalar cual es puede ser su vocación más adecuada dependiendo de la magnitud y frecuencia de la inundación, clasificación geomorfológica de la corriente y magnitud de la velocidad y profundidad.

Con el análisis geomorfológico se identifican los controles al flujo, procesos activos y pasivos en la cuenca y cauce; éste permite, además, identificar la respuesta hidráulica a cambios impuestos en las corrientes. Debe ser apoyado en información satelital, fotografías aéreas de diferentes épocas, cartografía regional y verificado en el campo.

El análisis tradicional de amenaza, vulnerabilidad y riesgo incluye los aspectos sociales de la comunidad afectada por los fenómenos naturales. Está enfocado principalmente a establecer el grado de exposición de una comunidad y la respuesta de ésta ante un fenómeno catastrófico. Situación contraria es cuando se pretende establecer la aptitud ambiental de ciertas regiones para la expansión urbana. En este caso se debe estimar con técnicas hidrológicas e hidráulicas los límites de inundación para cierta frecuencia e identificar los controles geomorfológicos, que permitan establecer el grado de estabilidad de la corriente y por ende intentar predecir la evolución de la misma.

Se consideró la creciente con una recurrencia de 100 años como límite inferior para permitir desarrollos urbanísticos. La utilización de las zonas inundadas con frecuencias menores debe estar acompañada de restricciones en la magnitud de la velocidad y profundidad, además de pólizas de seguros que cubran los daños esperados ante una eventual creciente

REFERENCIAS

1. Aller L., et al. 1987. "DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings". Prepared by the National Water Well Association for the US EPA Office of Research and Development, Ada, USA.
2. Arbeláez, Ana. 2001. "Delimitación y reglamentación de zonas inundables. Aplicación al Río San Carlos". Tesis de Magister, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
3. Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos. 2000. Memorando interno CECW-PG.
4. CSU. 1977. "Flood flows, stages and damages". Notas de clase del profesor Jose D. Salas. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
5. Jaeggi, M. and Zarn, B. 1990. "A new policy designing flood protection schemes as a consequence of the 1987 floods in the Swiss Alps". *En*: Proceedings of the International Conference on River Flood Hydraulics, Wallingford, Inglaterra.
6. UNDRO. 1979. "Natural disasters and vulnerability analysis", Report of Experts Group Meeting, Ginebra.
7. White, G. et al. 1964. "Changes in urban occupancy of floodplains in the United States". Department of Geography Research Paper No 57, The University of Chicago. Chicago, Illinois.