

duración y periodo de retorno, que se presentarán en el sitio de medición. Con esta información es posible, aceptando ciertas suposiciones, encontrar la precipitación que ocurre en una zona. Esta determinación puede realizarse utilizando los mapas de isoyetas (si se acepta que las precipitaciones de alta intensidad tienden a distribuirse en la misma forma en que lo hacen las lluvias promedio multianuales) o mediante el método de los triángulos de Thiessen que incluye la suposición de una variación lineal de las características de la lluvia entre las estaciones. En la ciudad de Medellín existen varias estaciones pluviográficas (pertenecientes a EE.PP.MM y el HIMAT) con un periodo de registro suficiente para obtener resultados de precipitación relativamente confiables.

Además de su variabilidad en el espacio, la precipitación se caracteriza por su alta variación en el tiempo. Para incluir esta condición en el análisis, se utilizan hietogramas de distribución determinados con base en mediciones. En nuestro medio ha sido usual el uso de los hietogramas propuestos por Huff, para zonas de régimen tropical (en especial el segundo cuartil de Huff).

Existen también, los hietogramas desarrollados con base en las mediciones de la estación Miguel de Aguinaga de las EE.PP.MM.

La definición del hidrograma de respuesta de la cuenca, puede hacerse de dos maneras:

#### - A. Mediciones directas del hidrograma de respuesta

Basado en mediciones limnimétricas realizadas simultáneamente con mediciones de lluvia en varios puntos de la cuenca. De esta forma, midiendo varios eventos, es posible definir de manera aproximada el

hidrograma de respuesta de la cuenca en ese punto.

Este tipo de mediciones no se han realizado en corrientes pequeñas de la ciudad, por lo cual es imposible utilizar una hidrógrafa definido con información proveniente de la región. Este es, sin embargo, el procedimiento más recomendable, ya que los métodos calibrados en otros sitios y para condiciones totalmente diferentes, pueden no ser una aproximación adecuada a las condiciones particulares de las cuencas de la ciudad.

#### - B. Hidrogramas unitarios sintéticos

La carencia de hidrogramas unitarios obtenidos mediante mediciones directas, ha inducido a que se trate de relacionar el hidrograma de respuesta con las características físicas de la cuenca. Se tienen, por ello, varios hidrogramas calibrados en diferentes partes del mundo (Snyder, Williams y Hann, etc.).

Al utilizar estos hidrogramas, se supone que son aplicables a la cuenca en estudio. Cabe anotar que esta puede ser una aproximación medianamente buena en cuencas de condiciones similares a las utilizadas para realizar la calibración; pero deben tomarse con sumo cuidado, si las características de la cuenca difieren apreciablemente de las cuencas de calibración.

Debido a que casi todos estos métodos se han desarrollado para condiciones diferentes a las que presentan las cuencas de la ciudad en aspectos como uso del suelo, pendientes, y régimen climático, se requiere una revisión de las diferentes alternativas para la elección de la que brinde los mejores resultados.

En el estudio hidrológico, realizado por los consultores del Proyecto Col 88/010 y

debido a que no existen mediciones en las cuencas pequeñas de la ciudad, se usaron diversos métodos sintéticos usualmente utilizados (Williams y Hann, Snyder, Geomorfoclimático, S.C.S., Racional, Nash, etc.), y se realizó un análisis comparativo, apoyado en mediciones simultáneas de lluvia y caudal, en dos cuencas pequeñas instrumentadas por las EPM, y ubicadas en cercanías de la ciudad (Chorrillos y Piedras Blancas). Sin embargo, debido a la escasa información, los resultados obtenidos no fueron suficientes para concluir acerca de la validez o no de estos métodos en nuestro medio.

Es difícil sustentar la bondad de los resultados de un método de cálculo con respecto a los otros si no se cuenta con mediciones que validen la afirmación. Lo que sí puede hacerse es rechazar algunos métodos de estimación, que debido a sus condiciones de desarrollo o aplicación, tendrán resultados, que indudablemente, no representan las condiciones locales. (un ejemplo de ello, de acuerdo con lo observado, es que los resultados que se obtienen con el método de Snyder con los parámetros calibrados para una cuenca, muy pocas veces pueden extrapolarse a otras cuencas aun de la misma zona).

En resumen, se debe proceder a realizar mediciones directas en las corrientes de interés. Si no se cuenta con esta información se deben realizar mediciones que validen, al menos aproximadamente, el uso de las metodologías desarrolladas en otras latitudes.

La validez de los resultados obtenidos por los diferentes métodos, se puede verificar, en forma aproximada, con los resultados del análisis hidráulico, y considerando el conocimiento histórico de los niveles alcanzados por el agua en las corrientes (teniendo en cuenta que pueden estar ocurriendo cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca).

En este sentido, puede ser importante, en canales naturales, considerar la capacidad de transporte de caudal a "banca llena" (se denomina banca a la zona que transporta normalmente el flujo, distinguible por su geometría). Condición que según varias investigaciones, corresponde, aproximadamente, al caudal con un periodo de retorno de dos años. De esta forma es posible, en cuencas en las que no han existido cambios acelerados en el uso del suelo, (si es así, se debe tener en cuenta este factor en el análisis) comparar los caudales con un periodo de retorno ( $T_r$ ) de 2.33 años, con el caudal que el canal puede transportar a "banca llena". Este análisis debe ser precedido por la observación de los procesos geomorfológicos que presenta la cuenca.

Lógicamente, este tipo de verificaciones pueden ser muy imprecisas, pero dan una idea acerca de la validez de los resultados cuando no existen otras alternativas de análisis.

Los cálculos hidrológicos en la ciudad, han mostrado que los métodos de Williams y Hann, el S.C.S. (Soil Conservation Service, Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos.) y el método geomorfoclimático permiten obtener resultados admisibles. Es necesario recalcar en la carencia de estudios que validen la aplicación de los métodos en la región.

#### 3.4.3.3 Caudales utilizados en el análisis.

La definición de los periodos de retorno, a los que están asociados los caudales, que deben calcularse para un estudio encaminado a definir la amenaza de inundación, debe ser una decisión basada en las necesidades y consideraciones propias de cada situación que se analice.

Para estudios tendientes a la determinación de zonas inundables, se consigue suficiente información, realizando el análisis hidráulico para los periodos de retorno de 2, 25 y 100 años.

Se considera que las estructuras hidráulicas del canal deben tener la capacidad de transportar, adecuadamente, la creciente con periodo de retorno ( $T_r$ ) de 25 años, por lo cual este análisis permite definir qué puntos del canal, presentan las condiciones más desfavorables.

El análisis para un caudal con un periodo de retorno de 100 años, permite definir una zona aledaña al cauce, que está expuesta a inundaciones con relativa frecuencia, y por lo tanto, las áreas en que no deberían existir asentamientos humanos o aquellas zonas en las que pueden asentarse con un nivel de exposición relativamente bajo.

La capacidad de transporte de caudal que debe tener el canal, dependerá del uso del suelo (actual o futuro), que se da a la zona que atraviesa y, por ende, de las pérdidas económicas y de vidas humanas que pueda ocasionar un eventual desbordamiento.

#### 3.4.3.4. *Consideraciones acerca de otros aspectos.*

La consecución de información útil, acerca de los niveles que alcanza el agua subterránea en una zona, además de presentar un alto nivel de incertidumbre debida a la variación espacio-temporal que presenta requiere una inversión alta.

Para el estudio de inundaciones, el principal efecto de las aguas subterráneas, es que pueden mantener saturado el suelo, y de esta forma, disminuir la tasa de infiltración. Así, en zonas que tienen un nivel freático alto, el tiempo de duración del

encharcamiento es mayor. En zonas de pendiente fuerte, durante una creciente la principal forma de drenaje es la escorrentía directa, por lo cual la presencia de aguas subterráneas puede no tener una incidencia importante.

Las aguas residuales vertidas en corrientes de poco caudal, pueden representar un cambio apreciable sobre los caudales medios y bajos, que se presentan en una corriente. Sin embargo, en las quebradas de Medellín, durante una creciente de cuenca pequeña, normalmente no representan más del 3% del agua total; por lo tanto, su incidencia es poco importante para efectos de estudios en inundaciones. Esta anotación es particularmente válida en cuencas pequeñas, donde los caudales máximos pueden ser hasta cien veces mayores que los caudales medios.

Durante una creciente ocurre el arrastre de una gran cantidad de sedimentos y basuras debido al incremento de la capacidad de transporte de la corriente.

Estos sedimentos hacen variar en forma importante las características del flujo: aumentan el volumen transportado, varían la viscosidad, disminuyen la energía etc.

Es extremadamente difícil incluir todos estos efectos en el análisis y en la actualidad no existen métodos adecuados para cuantificarlos.

Para sortear esta dificultad, en ocasiones se utiliza un factor que aumenta el caudal, para incluir, en forma aproximada el efecto del sedimento. Otro método usualmente utilizado en el diseño de las estructuras es el de dejar un borde libre.

La cantidad de sedimento transportado depende de las características físicas de la cuenca, sus procesos erosivos, urbanización, etc. Estas condiciones deben tenerse en cuenta al realizar el análisis

### 3.4.4. Estudio hidráulico

#### 3.4.4.1. Levantamiento topográfico

Para la adecuada evaluación de la capacidad hidráulica, y para la determinación de las áreas transportadoras de flujo se requiere un conocimiento topográfico del canal y de las zonas aledañas, acorde con la precisión que se desee dar al estudio.

Existen varios niveles de detalle en la realización de los trabajos topográficos; sin embargo, cualquier evaluación que pretenda determinar, aun en forma aproximada, las zonas susceptibles a inundarse, necesita el conocimiento exacto de las dimensiones de las estructuras (puentes y secciones de canalización), las dimensiones de las secciones típicas, y la pendiente del canal, para determinar, en forma relativamente adecuada, su capacidad hidráulica.

La forma más práctica para realizar el estudio, teniendo como objetivo la delimitación aproximada de las zonas inundables y buscando un cubrimiento amplio, es la siguiente:

- Determinar las dimensiones de las estructuras hidráulicas, ubicadas en la corriente (puentes, coberturas, transiciones, obstáculos al flujo, etc.).
- Establecer la geometría de las secciones transversales típicas del canal, por ejemplo, en los tramos artificiales, en los que la sección permanece relativamente constante.
- Establecer la geometría de la sección transversal del canal en los puntos que presenta las condiciones más desfavorables (como sección estrecha o pendiente baja).
- Determinar la geometría de las secciones transversales, en los puntos de im-

portancia según criterios como: zonas aledañas al cauce en las que existen viviendas; futuros planes urbanísticos; sitios donde la inundación pueda tener consecuencias especialmente serias etc.

- Definir las pendientes del canal: esto puede hacerse con base en los mapas topográficos existentes, o si se desea una mayor precisión, mediante levantamiento directo en el canal.

Con la información topográfica mencionada anteriormente, es posible realizar una evaluación hidráulica, lo suficientemente aproximada, que permita definir las zonas inundables.

Una segunda alternativa de análisis, que requiere mucho mayor esfuerzo y recursos superiores, es el levantamiento detallado de todas las secciones transversales y, adicionalmente, el levantamiento planimétrico de las zonas aledañas.

Este nivel de detalle en el levantamiento topográfico, permite realizar un análisis hidráulico más preciso (útil, además, para el diseño de obras), pero requiere tal cantidad de elaboración, tiempo y recursos, que puede no resultar práctico si lo que se desea es una zonificación con fines de planeación o delimitación de zonas de riesgo que deba tener un amplio cubrimiento.

En cualquier caso, se requiere el procesamiento de gran cantidad de información, labor que se facilita con el uso de programas de computador.

Los consultores del Proyecto COL 88/010, elaboraron los programas MENUPO y AUXTOPO, que permiten el manejo de la información topográfica, y su procesamiento, para ser utilizada en el estudio hidráulico.

#### 3.4.4.2. Evaluación hidráulica

La evaluación hidráulica requiere, además de la información hidrológica y topográfica, una revisión de las condiciones que presenta el canal, para, de esta forma, incluir los aspectos relevantes en el análisis.

La evaluación hidráulica consiste en determinar, al menos en forma aproximada, las principales variables que describen el comportamiento del flujo, variables cuyo conocimiento es necesario para la toma de medidas tendientes a mitigar la amenaza de inundación y la determinación de las zonas expuestas. Algunas de estas variables son: la velocidad del flujo, la profundidad, el ancho superior del flujo, etc.

En la actualidad, la realización de los cálculos hidráulicos se facilita por el uso de los computadores; específicamente, programas de computador como el HEC-2, permiten el manejo y análisis de gran cantidad de situaciones y la comparación de diversas alternativas. La utilización de estos modelos, requiere de la escogencia de distintos parámetros, cuya elección debe realizarse con base en la experiencia y tratando de incluir las características específicas del análisis.

Debe darse especial importancia a las limitaciones y suposiciones que tiene la aplicación de estos modelos, para evaluar la validez de los resultados. Por ejemplo, el programa HEC-2, no considera el transporte de sedimento, ni la sobre-elevación debida a curvas en el canal, factores ambos, que pueden tener una gran importancia.

El estudio hidráulico, permite determinar los puntos del canal que presentan las condiciones generadoras de mayor amenaza de inundación, debidas a insuficiencia de las secciones hidráulicas, con lo que se definen las prioridades de acción para la mitigación del efecto de la creciente.

#### 3.4.5. Delimitación de las zonas expuestas a inundaciones

La gran cantidad de limitaciones, tanto del análisis hidrológico como del análisis hidráulico, hacen que los resultados finales tengan asociado un cierto nivel de incertidumbre.

El resultado del estudio hidráulico permite definir, en forma aproximada, los puntos en los que se presentara el desbordamiento para los diferentes valores de caudal, y los niveles que alcanzará el flujo.

Con esta información, y basándose en planos topográficos, con una escala mínima de 1:2.000, es posible definir las zonas susceptibles a ser inundadas.

En la delimitación se requiere un adecuado análisis, acompañado de buen criterio, que permita demarcar, al menos aproximadamente, las áreas inundables, incluyendo además del efecto de la topografía el producido por las vías, edificaciones y otras barreras al flujo.

En ocasiones, es muy difícil delimitar las zonas inundables principalmente en zonas de baja pendiente y densamente urbanizadas, ya que la información topográfica no es suficiente para definir qué dirección seguirá el flujo.

Cabe enfatizar, en que esta delimitación de zonas debe estar apoyada en una revisión visual, y en la consideración, en lo posible, del comportamiento del flujo en desbordamientos acaecidos con anterioridad.

Se pueden definir los siguientes grados de amenaza para una zona, de acuerdo al caudal que puede afectarla:

- **amenaza muy alta:** zona alcanzada por un caudal con periodo de retorno de 2 años (esta zona coincide aproximadamente con el lecho de la corriente).

- **amenaza alta:** zona alcanzada por un caudal con periodo de retorno entre 2 y 25 años.
- **amenaza media:** zona alcanzada por un caudal con periodo de retorno entre 25 y 100 años.
- **amenaza baja:** zona alcanzada por un caudal con periodo de retorno mayor de 100 años.

Al llegar a este punto del estudio no deben olvidarse las suposiciones y aproximaciones de los métodos hidrológicos e hidráulicos utilizados, que evidentemente tienen incidencia sobre la validez de los resultados. Así, las zonas definidas, son una aproximación a las que pueden ser afectadas por el fenómeno real.

En la delimitación de las zonas, teniendo como base los estudios hidrológicos e hidráulicos y en especial los niveles del flujo, puede hacerse uso de sistemas de información geográfica (SIG), tales como el ILWIS para la delimitación de las zonas inundables.

### **3.4.6. Anotaciones acerca de los resultados**

Los resultados obtenidos mediante una metodología como la propuesta, permiten definir, de acuerdo con los criterios que se adopten, las zonas que pueden ocuparse, las zonas de retiro y los diferentes usos del suelo en las zonas aledañas al cauce. Además, es posible determinar los puntos que presentan condiciones críticas (capacidad hidráulica baja), y con base en esta información, programar la realización de obras que disminuyan la amenaza de inundación. Este es indudablemente, uno de los resultados más importantes de un estudio de este tipo.

Los caudales que se presentan en la cuenca, varían en el tiempo en forma acorde con las alteraciones en las condiciones físicas de ésta. Las variaciones en la canalización o en las estructuras de la quebrada, producen cambios en su comportamiento, que afectan los tramos ubicados aguas abajo.

Esta característica de variabilidad, obliga a que tenga que existir una continua revisión en la delimitación de las zonas inundables, ya que los cambios, principalmente debidos a obras civiles, pueden producir importantes variaciones en las zonas realmente inundables.

### **3.4.7. Comentarlos y recomendaciones**

- La metodología expuesta anteriormente permite definir en forma aproximada las zonas que pueden ser afectadas por crecientes de diferente intensidad. Se plantea una línea de trabajo que incluye los aspectos más relevantes en el análisis del fenómeno. En la descripción de la metodología se han resaltado los aspectos que presentan las mayores limitaciones.
- Lamentablemente, en muchos casos no se tiene la información (basada en datos de la región) suficiente para realizar estudios adecuados.

La utilización en nuestro medio, de metodologías desarrolladas en otras zonas con condiciones muy diferentes, debe ser realizada conociendo perfectamente las limitaciones e implicaciones de ello.

- El nivel de detalle que se debe tener al realizar el análisis, está subordinado al alcance que se quiere dar al trabajo. Con la metodología propuesta, es posi-

ble realizar tanto un análisis detallado, que permita la realización de obras de ingeniería, como un estudio en menor detalle pero que con un nivel de precisión aceptable posibilita estudiar las principales corrientes de una zona amplia, en un periodo de tiempo admisible.

- Las herramientas de análisis hidrológico, se han desarrollado, en general, para condiciones diferentes a las que se presentan en las cuencas de la ciudad. Por ello, se deben tratar de realizar estudios que permitan conocer las condiciones locales. En especial se requieren estudios acerca de la aplicabilidad de los métodos de estimación hidrológica.
- El efecto de los sedimentos en una creciente es de una gran importancia. En la actualidad no existe la posibilidad de estimar (en forma relativamente segura) la cantidad de sedimento transportado por el flujo durante una creciente (este es un fenómeno muy complicado en el que intervienen muchos factores

como la geología, la geomorfología, la pendiente, etc.). Sin embargo su efecto debe considerarse en cualquier tipo de obra que se realice. Secciones estrechas, conductos en el canal, pilas de apoyo, y otras estructuras propician la detención del sedimento generando el consecuente desbordamiento.

- La ocurrencia de inundaciones en un sitio, debe entenderse como una consecuencia de las condiciones tanto del punto de desbordamiento, como de la totalidad de la cuenca. Cualquier solución debe tratar de considerar estos dos aspectos.
- La generación de caudales en una cuenca, es un fenómeno muy complejo, incluye una gran cantidad de factores que hacen difícil su predicción. Existe en la actualidad una clara tendencia a simplificar demasiado los métodos de cálculo para obtener resultados sin mucho esfuerzo. Siguiendo esta línea de trabajo será imposible aproximarse al conocimiento del fenómeno físico.