

DISEÑO HIDROLÓGICO CON INFORMACIÓN ESCASA UN CASO DE ESTUDIO: RÍO SAN CARLOS

*Ana Cecilia Arbeláez A., María Victoria Vélez O. y Ricardo Smith Q.
Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos.
Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*

RESUMEN

Cuando se requiere estimar los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, necesarios para estudios de control de inundaciones, diseños de estructuras hidráulicas, etc., se pueden emplear varias metodologías siempre y cuando se disponga de registros hidrológicos de longitud suficiente. Sin embargo cuando existe escasez de información hidrológica se presenta el problema de como determinar los caudales con cierto nivel de confiabilidad.

En este trabajo se presentan los caudales máximos instantáneos asociados a ciertos períodos de retorno obtenidos por varias metodologías. Por las características de la información disponible (calidad y cantidad) para la realización del estudio se aplicaron algunas técnicas de información escasa. Las metodologías utilizadas fueron :

- Análisis de frecuencia.
- Modelos lluvia escorrentía, con la aplicación de:
 - * Hidrógrafas unitarias calibradas para la cuenca (Mínimos cuadrados, Nash, Zoch).
 - * Hidrógrafas unitarias sintéticas (Snyder, Soil Conservation Service y William y Hanns).
 - * Método racional.
- Metodologías con información escasa como Regionalización, el Grádex y el Índice de crecientes.

Se hace un análisis comparativo de los resultados obtenidos, se presentan conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

When it is required to define the maximum instantaneous discharges associated to different return periods several methodologies can be used according with the information availability. However when no hydrological information is available the problem is to define discharges with certain reliability level.

In this paper results obtained with several methodologies are presented. Some of the methodologies are techniques developed for the case of available no information. The methodologies used were: frequency analysis, unit hydrographs, synthetic unit hydrographs, the rational methods, regionalization of some statistical characteristics, the Gradex methodology, and the flood index methods. A comparative analysis of all these methodology is presented and also some conclusions and recommendation.

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de información es un problema típico de los estudios realizados en nuestro medio, en general no se tienen series de registros de lluvias o caudales con características adecuadas que permitan obtener estimativos de caudales asociados a ciertos períodos de retorno de buena confiabilidad.

En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos por diferentes metodologías hidrológicas, al igual que el procesamiento que se le dio a la información disponible en la cuenca del río San Carlos, la cual está localizada al oriente del departamento de Antioquia y la cabecera del municipio de San Carlos está ubicada a orillas del río.

En la década de los 80 se construyó el proyecto hidroeléctrico de San Carlos, aguas abajo del municipio. Debido al desarrollo de este proyecto, desde épocas anteriores se estaban implementando campañas para la recolección de información, motivo por el cual en la cuenca y sus cercanías se encuentran diferentes estaciones limnográficas y pluviográficas.

Al analizar en detalle, la cantidad y calidad de la información disponible en la región, se puede concluir que los análisis hidrológicos que se deban realizar, serán con metodologías de diseño hidrológico con información escasa.

2. METODOLOGÍAS UTILIZADAS

Se utilizaron algunas técnicas de uso frecuente en hidrología tal como el análisis de frecuencia de caudales máximos, las hidrógrafas unitarias sintéticas (Snyder, Soil Conservation Service y William y Hanns), regionalización y el método racional. Los fundamentos teóricos de estas metodologías están ampliamente expuestos en la literatura técnica (Bras, 1990; Chow, 1988; Franco y Pérez, 1995; Linsley y otros, 1986; Viessman, 1977; Remenieras, 1974; Cardona y Londoño, 1991).

Se utilizaron además otras metodologías no tan conocidas como el método de Grádex y el método de Índice de crecientes, cuyos fundamentos teóricos se encuentran descritos en la Cartilla Hidrológica del departamento de Antioquia elaborada por el Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos.

Aunque en nuestro medio no es común la utilización de la hidrógrafa propia de la cuenca por el grado de trabajo que implica su aplicación, en este estudio se realizó la calibración de la hidrógrafa propia a partir de registros históricos de lluvia y caudal de la zona. Esta calibración se realizó con los métodos de mínimos cuadrados, Nash y Zoch. Las bases teóricas de estos métodos se pueden consultar en Smith y Rendón, 1996 y en Smith y Velásquez, 1995.

ASPECTOS DETERMINANTES EN CADA METODOLOGÍA

Se presentan a continuación los aspectos más relevantes a considerar en la aplicación de cada metodología.

Hidrógrafas unitarias sintéticas

- Duración de la tormenta : incide directamente en la intensidad y por ende en la precipitación utilizada para la modelación. Se determina generalmente como un tiempo igual o mayor que el tiempo de concentración, ya que cuando la tormenta alcanza esta duración toda la cuenca está aportando al fenómeno de escorrentía. Las expresiones para el tiempo de concentración son diversas, y producen resultados muy diferentes que hacen que la determinación de este parámetro sea muy incierta.
- Precipitación efectiva: esta es la parte de la lluvia que se transforma en escorrentía directa. Para hallarla es frecuente la utilización del método de Soil Conservation Service. Sin embargo esta metodología fue calibrada para condiciones hidrológicas y

topográficas diferentes a las de un país tropical como Colombia.

- Distribución espacial de la lluvia : cuando existen varias estaciones de precipitación en la cuenca, la precipitación promedio sobre la cuenca generalmente se obtiene utilizando los polígonos de Thiessen o el método de las isoyetas. En este trabajo se utilizó el método de los polígonos de Thiessen.
- Distribución temporal de la lluvia: esta se determina habitualmente según las curvas de distribución temporal de HUFF, que fueron desarrolladas a partir de estudios de las lluvias en los Estados Unidos. En nuestro medio solamente existe un estudio similar realizado por las Empresas Públicas de Medellín para las lluvias del Valle de Aburrá. Para las estaciones cercanas a la cuenca de San Carlos se obtuvieron curvas de distribución de la lluvia en el tiempo, como se explicará más adelante.
- Curvas Intensidad Frecuencia Duración : para la obtención de estas curvas es necesario disponer de la serie de lluvias de la región, con una longitud de registros tal que permita realizarles un análisis de frecuencia confiable. A mayor número de tormentas seleccionadas en un año para ser utilizadas en el análisis, mayor es la confiabilidad de los resultados obtenidos, pero mucho mayor son las dificultades que se presentan en el procesamiento de la información.

Hidrógrafas unitarias calibradas

- Disponibilidad y buena calidad de registros simultáneos de lluvia y caudal que permitan calibrar la hidrógrafa unitaria propia de la cuenca.

Análisis de frecuencia

- Curvas de calibración de las estaciones de medición : la inadecuada manipulación para eventos máximos de los registros de nivel en las estaciones limnigráficas vician los valores obtenidos de caudal y por ende el resultado del análisis estadístico.
- Longitud de los registros : para el análisis de frecuencia es necesario una serie con registros largos, para mayor confiabilidad en los resultados.

Método racional

- Coeficiente de escorrentía C
- Duración de la lluvia : problema similar al expuesto en la metodología de las hidrógrafas unitarias sintéticas.

Regionalización

- Problemas de escala : puede arrojar resultados inciertos si la regionalización fue hecha a partir de cuencas con áreas muy diferentes al área de la cuenca de interés.

Índice de crecientes

- Para la aplicación de esta metodología debe conocerse la media de los caudales máximos instantáneos.

Grádex

- Registros de precipitación máximas anuales de 24 horas.
- Caudal pivote : es el caudal que utilizado conjuntamente con el Grádex permiten definir la distribución de caudales máximos.

3. INFORMACIÓN UTILIZADA

Para las diferentes metodologías antes enunciadas la información requerida consiste básicamente en:

- Información topográfica y descriptiva de la cuenca: permite obtener los parámetros morfométricos y a partir de éstos los tiempos de concentración.
- Registros pluviográficos y pluviométricos de la zona
- Información de caudales máximos instantáneos.

3.1 Información hidrológica

Se obtuvo y procesó información de las estaciones pluviográficas mostradas en la Tabla 1.

TABLA 1 Estaciones pluviográficas ubicadas cerca a la cuenca de estudio

Estación	Municipio	Años con registro
La Rápida	San Carlos	9
La Cascada	San Carlos	8
Los Medios	Granada	6
Porto Belo	San Carlos	8
San Carlos El Popo	San Carlos	29
Calderas	Granada	22
La Arenosa	San Carlos	13
Patio Bonito	San Carlos	13

Se dispuso de información continua de los pluviógrafos de las estaciones de Los Medios, Porto Belo y San Carlos El Popo. Esta información esta disponible en la mayoría de los casos para todo el período de registro desde la instalación del pluviógrafo.

Para las estaciones de La Rápida, La Cascada y Calderas se disponía de información digitalizada de las 3 tormentas más intensas de cada año desde su instalación. Se disponía además de fotocopias de las principales tormentas desde

1992 para la estación de San Carlos La Arenosa y desde 1993 para la estación de Patio Bonito.

Se utilizó información limnigráfica de la estación de Puente Arkansas ubicada en el río San Carlos, con una longitud de registros de 16 años.

3.2 Información topográfica y usos del suelo

Se utilizaron los planos topográficos del Agustín Codazzi, escalas 1:25000 para la obtención de los parámetros morfométricos.

Para conocer los usos del suelo y la geología de la zona, se utilizaron los Atlas Temáticos de la cuenca de San Carlos elaborados por EPAM Ltda. en 1984 para ISA.

4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa se revisó toda la información pluviográfica y limnigráfica de las estaciones existentes en el área de estudio. Estas estaciones son administradas en su mayoría por ISA-GEN y el IDEAM. En las estaciones pluviográficas en las que no se disponía de las curvas Intensidad - Frecuencia - Duración y de distribución temporal de la lluvias se obtuvieron dentro de este estudio.

Los modelos lluvia - escorrentía, sobre todo si se van a usar modelos de hidrógrafas unitarias sintéticas, requieren de la estimación de parámetros tales como área, pendiente, longitud del río principal, etc. Además también son necesarios para estimar un parámetro importante en el diseño de tormentas como es el tiempo de concentración. La Tabla 2 muestra los parámetros para la cuenca de San Carlos.

TABLA 2 Parámetros geomorfológicos de la cuenca de San Carlos.

	San Carlos
Area (Km ²)	134,3
Longitud del cauce (Km.)	27
Longitud al centro de gravedad de la cuenca (Km.)	14
Longitud de la cuenca (Km.)	16,50
Diferencia de cotas extremas en la cuenca (m)	1449,00
Pendiente del cauce (%)	3,14

4.1 Tiempos de concentración

Es el tiempo que tarda el flujo en viajar desde el punto más alejado de la cuenca, hasta la salida de la misma. Este tiempo depende de las características geomorfológicas de la cuenca. Para su determinación existen varias expresiones, entre ellas las propuestas por : Témez, William, Kirpich, Johnstone-Cross, C.C.P, Giandotti, S.C.S Ranser, Linsley, Snyder, Ventura Heras, Brausby-William presentadas en la Cartilla hidrológica del departamento de Antioquia, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos 1997.

Todas estas expresiones producen resultados muy diferentes, ya que fueron deducidas para cuencas con características muy específicas. Para tener una idea de la diferencia de resultados que producen las diversas expresiones, se presentan en la Tabla 3 los tiempos de concentración obtenidos para la cuenca del río San Carlos.

Al observar la Tabla 3 puede notarse que algunas ecuaciones (William, Linsley, Snyder y Brausby-William) presentan valores muy altos de los tiempos de concentración y que para las características que presenta la cuenca son físicamente poco probables. Descartando estos valores y promediando los valores restantes se obtiene un tiempo de concentración de 160 minutos (2,67 horas)

TABLA 3 Tiempos de Concentración [min.], según las diferentes expresiones para la cuenca de San Carlos.

	San Carlos
Témez	172,02
William	292,07
Kirpich	147,60
Johnstone-Cross	147,71
C.C.P	154,81
Giandotti	171,13
S.C.S Ranser	155,89
Linsley	283,67
Snyder	276,90
Ventura Heras	172,02
Brausby-William	344,01

4.2 Información pluviométrica

Para utilizar los modelos de la hidrógrafa unitaria es necesario conocer las curvas Intensidad - Frecuencia - Duración de la zona. En esta cuenca solo existían para la estación San Carlos-El Popo, por lo cual fue necesario construir las curvas para las estaciones restantes a partir de los registros pluviográficos. En la Tabla 1 se puede apreciar que la longitud de registros de algunas estaciones son muy cortos para realizar un análisis de frecuencia. Por lo cual los resultados obtenidos deben ser utilizados con cautela. El procedimiento para obtener estas curvas fue el siguiente:

- * De cada año se seleccionaron las tres tormentas más intensas.
- * Para cada una de estas tormentas se encontraron las intensidades para diferentes duraciones de la lluvia.

Para cada duración seleccionada se realizó el análisis de frecuencia ajustando las series de intensidades máximas anuales y de excedencias anuales, a diferentes distribuciones de probabilidad asociadas a eventos máximos tales como: Log Normal de dos parámetros (LNII) y Gumbel.

El cálculo de los parámetros de las distribuciones se realizó por los métodos de momentos y de máxima verosimilitud. Posteriormente, a las series anteriores, se les realizaron las pruebas de ajustes teóricas de Smirnov - Kolmogorov, Cramer Von Mises y la prueba gráfica.

Una vez seleccionada la distribución de probabilidad que presenta el mejor ajuste, se evalúa la intensidad asociada a diferentes periodos de retorno. A estos datos se le ajusta una ecuación característica de las curvas Intensidad - Frecuencia - Duración, que es de la forma:

$$i = \frac{K T_R^m}{(d + c)^n}$$

En donde i es la intensidad en mm/h, T_R es el período de retorno, d es la duración de la lluvia en minutos, K , m , n y c son parámetros.

Todo este procedimiento se hizo usando un programa, realizado por el Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, escrito en lenguaje IDL, el cual halló a partir de los registros pluviográficos de las tormentas seleccionadas las intensidades máximas para cada duración. Luego se enlazó este programa con el MPH (Modelamiento Probabilístico en Hidrología), también desarrollado por el Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, para realizar el análisis de frecuencia y finalmente el programa en IDL evalúa los parámetros K , m , n , c y realiza los gráficos de Intensidad - Frecuencia - Duración para cada estación. Los parámetros de las curvas para las diferentes estaciones se presentan en las Tablas 4a y 4b.

TABLA 4a Parámetro obtenidos por el método de intensidades máximas anuales.

Estación	K	m	n	c	r ²
La Rápida	381,88	0,115956	0,49868	0	0,993
La Cascada	583,67	0,145201	0,573248	6,1	0,987
Los Medios	352,34	0,0774824	0,476105	0	0,983
Porto Belo	242,51	0,142212	0,327188	0	0,964
San Carlos El Popo	219,15	0,163308	0,36978	0	0,990
Calderas	364,64	0,140985	0,508972	0	0,993

TABLA 4b Parámetro obtenidos por el método de excedencias máximas.

Estación	K	m	n	c	r ²
La Rápida	388,20	0,0803157	0,486419	0	0,991
La Cascada	562,87	0,0942346	0,540349	6,3	0,987
Los Medios	408,79	0,0495399	0,508416	0	0,999
Porto Belo	330,26	0,0891964	0,389678	0	0,982
San Carlos El Popo	284,21	0,0912121	0,405668	0	0,991
Calderas	432,98	0,0888157	0,535553	0,3	0,995

En las Tablas 4a y 4b se puede ver que con ambos métodos los coeficientes de correlación son altos y que los parámetros son similares por ambas metodologías.

Para los modelos de hidrógrafa unitaria es importante también determinar el comportamiento de la precipitación con relación al tiempo. En la literatura estas relaciones se conocen como las curvas de Huff. En la zona se obtuvieron curvas que pretenden reproducir para cada estación el comportamiento de las lluvias máximas respecto al tiempo.

El procedimiento para obtener dichas curvas es el siguiente: Para las tormentas más intensas de diferente duración, en las estaciones ubicadas en la zona de estudio, se obtuvo la distribución de la lluvia en el tiempo, pero tomando los ejes como porcentajes de precipitación y de tiempo respectivamente. Se seleccionaron porcentajes de precipitación al 10, 20, 30, ..., 90% del tiempo. A estos porcentajes se les ajustó una distribución empírica (Weibull) para así obtener el porcentaje de precipitación correspondientes a diferentes probabilidades de ocurrencia (10, 20, 30, ..., 90%). Para la modelación de la tormenta de diseño se utilizó la distribución correspondiente al 50% de probabilidad de ocurrencia.

En las Figuras 1 a 6 se presentan las curvas de distribución temporal de las estaciones analizadas

4.3 Información limnigráfica

Se tenían registros limnigráficos desde 1981 de la estación Puente Arkansas ubicada sobre el río San Carlos.

Para procesar las lecturas limnigráficas y obtener caudales es necesario utilizar la curva de calibración de la estación limnigráfica. Esta curva puede variar en el tiempo por cambios en la geomorfología de la sección de aforo, ya sea por procesos de agradación o degradación del cauce.

En la revisión de las curvas de calibración de la estación de Puente Arkansas utilizadas por ISAGEN se encontró que los puntos aforados, base de la construcción de dichas curvas, presentaban altas dispersiones para algunos intervalos de tiempo. Esto se explica por la ocurrencia de crecientes que alteran la forma de la sección o que arrasan con la estructura de medición. Se requiere entonces reubicar la estación de medición, cambiando de esta forma la curva de calibración.

En el caso de la estación Puente Arkansas se lograron distinguir 4 períodos con variación en la relación de caudales contra la altura de mira (Figura 7). Al revisar la historia de la estación se encontró que esto coincidía con cambios en la geomorfología de la sección causados por crecientes, como se anotó anteriormente.

Se optó por considerar el período de octubre del 90 a julio del 91 como faltante ya que no se pudo encontrar una tendencia definida, además la información para realizar el ajuste en ese período era poca. Se pueden entonces distinguir 3 tendencias de puntos claramente definidas, a cada una de las cuales es necesario realizarles un ajuste. Una formada por los aforos antes de septiembre de 1990 (avalancha de la Quebrada La Arenosa), otra por los aforos de 1992 a finales de 1993 y la tercera a partir de 1993.

Generalmente los aforos para definir las curvas de calibración se realizan en condiciones nor-

males, restringiendo su aplicación a eventos máximos. Estas curvas deben entonces ser extrapoladas para obtener caudales máximos, sin embargo, para esa extrapolación no hay información y se requiere utilizar métodos indirectos como el propuesto por Manning.

El método de extrapolación de Manning está basado en la siguiente expresión:

$$Q = \frac{R^{2/3} S^{1/2} A}{n}$$

en donde R es el radio hidráulico, S la pendiente de la línea de energía y A es el área transversal de la sección de aforo, Q es el caudal en la sección en m³/s y n es un coeficiente que considera la rugosidad en la sección. Esta metodología indica que para niveles altos de un río el término S^{0.5}/n de la ecuación de Manning (con S pendiente hidráulica y n coeficiente de rugosidad) se puede considerar constante. La gráfica de nivel vs S^{0.5}/n debe ser asintótica para una buena aplicabilidad del método. Con el valor de S^{0.5}/n, los niveles de interés y las características geométricas de la sección (área y radio hidráulico) se pueden encontrar los caudales para un nivel de mira cualquiera.

De esta forma se evaluaron los caudales para lecturas de mira hasta de 10 metros en Puente Arkansas.

4.3 Obtención de hidrogramas unitarios a partir de registros históricos

Para obtener el hidrograma de una cuenca a partir de registros históricos se deben analizar conjuntamente eventos de precipitación y esorrentía. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se seleccionaron las crecientes más grandes con sus respectivas fechas, cuyo contorno no presente picos intermedios antes del pico principal y luego descienda suavemente hasta alcanzar el flujo base. Además cada creciente debería tener su co-

respondiente registro pluviográfico. De 120 crecientes leídas inicialmente, debido a las restricciones de memoria de los programas para calibrar la hidrógrafa unitaria, se seleccionaron las diez más grandes para propósitos de estimación del hidrograma unitario de la cuenca.

Para la cuenca del río San Carlos se utilizaron los registros limnigráficos existentes de la estación Puente Arkansas y los registros pluviográficos existentes de la estación el Popo; además se utilizaron los registros pluviográficos de las estaciones de Patio Bonito y La Arenosa para los eventos posteriores a 1993, la precipitación promedio se obtuvo utilizando polígonos de Thiessen.

- La precipitación efectiva se obtiene restando la tasa de infiltración constante (Índice ϕ) de la precipitación total.
- El índice ϕ se obtuvo para cada tormenta a partir de los registros simultáneos de precipitación y escorrentía superficial directa, por medio de un método iterativo.
- Se determinan los hietogramas de cada tormenta, en intervalos de tiempo seleccionados a partir del tiempo de concentración.

Una vez seleccionados los limnigramas que tenían una tormenta asociada que pudieran utilizarse para la estimación del hidrograma unitario y empleando la curva de calibración de la estación limnigráfica de Puente Arkansas, se calcularon los hidrogramas para cada una de dichas crecientes.

Se separó el flujo base de los hidrogramas seleccionados y por medio del método del índice ϕ se procedió a obtener la precipitación efectiva. Con el hidrograma de escorrentía superficial directa y su correspondiente pluviograma efectivo se estimó la hidrógrafa unitaria, con el programa HUIGRAF elaborado por el Posgra-

do en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, empleando los métodos de Mínimos Cuadrados, Nash y Zoch (Smith y Rendón, 1996 y Smith y Velásquez, 1995).

5. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Con el análisis hidrológico se pretende determinar los caudales asociados a varios períodos de retorno para la cuenca. Para la determinación de estos valores se siguieron varias metodologías, y procedimientos resumidos a continuación.

Con las estaciones pluviográficas y limnigráficas escogidas, se calibró para cada cuenca una hidrógrafa unitaria usando los datos históricos de precipitación efectiva y escorrentía directa simultáneos. Se usaron también las hidrógrafas unitarias sintéticas de Snyder, SCS y William - Hanns. Además se usaron métodos de regionalización, donde los parámetros morfométricos se asocian a los principales estadísticos tales como media y desviación estándar para ajustar una distribución de probabilidades. Se usó igualmente el método Racional, el método de Grádex y el Índice de crecientes. Estas metodologías permitieron obtener los caudales asociados a varios períodos de retorno, concretamente 25, 50 y 100 años.

Tanto en el caso de las hidrógrafas unitarias propias de la cuenca, como en el de las sintéticas es necesario hallar la tormenta (precipitación efectiva) de diseño. Hallar esta tormenta supone encontrar su duración, la precipitación efectiva y la distribución de la lluvia en el tiempo.

5.1 Duración de la lluvia de diseño

La duración de la lluvia se hace generalmente igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que cuando la lluvia alcanza esta duración toda el área de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía. Para esta cuenca el tiempo de concentración resultó de 160 minutos (2.67 horas).

5.2 Precipitación total

La lámina total se obtiene como:

$$P = I * D$$

en donde P es la precipitación en mm, I es la intensidad de la lluvia para cierta recurrencia en mm/h y D es la duración de la lluvia, en horas.

La intensidad se tomó de las curvas Intensidad-Frecuencia - Duración cuyo proceso de obtención se explicó anteriormente. Se utilizaron las curvas obtenidas por el método de intensidades máximas anuales, ya que la lámina precipitada es mayor y de esta forma se obtienen valores de caudal un poco más conservadores.

En la Tabla 5 se presentan los valores de precipitación para la cuenca del río San Carlos en las diferentes estaciones, para los períodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

TABLA 5 Intensidad y precipitación total para diferentes periodos de retorno para la cuenca de San Carlos (máximas anuales)

Estación	Tr = 25 años		Tr = 50 años		Tr = 100 años	
	I(mm/h)	P (mm)	I(mm/h)	P (mm)	I(mm/h)	P (mm)
La Rápida	44,14	117,72	47,84	127,57	51,84	138,25
La Cascada	49,70	132,52	54,96	146,56	60,78	162,07
Los Medios	40,35	107,61	42,58	113,55	44,93	119,81
Porto Belo	72,84	194,24	80,39	214,36	88,71	236,57
San Carlos El Popo	56,76	151,35	63,56	169,49	71,17	189,80
Calderas	43,36	115,63	47,81	127,51	52,72	140,60

5.3 Precipitación efectiva

Para utilizar los hidrogramas unitarios se requiere de la precipitación efectiva que se obtiene descontando las pérdidas por infiltración, retención, evapotranspiración, etc., a la precipitación total.

Existen varios métodos para determinar la precipitación efectiva como el método del índice ϕ y el método del SCS. En el presente estudio se empleó el método del SCS.

En este método la capacidad de infiltración del suelo depende de varios factores entre otros de : uso del suelo, tratamiento superficial a que ha sido sometido el suelo, condición hidrológica del suelo (pobre, si los suelos están erosionados; buena, si los suelos están protegidos con cobertura vegetal), grupo hidrológico del suelo (A: muy permeable, B: permeable, C: impermeable D: muy impermeable) y la humedad antecedente relacionada con la cantidad de lluvia caída en la cuenca durante los 5 días precedentes.

En este método se tienen las siguientes expresiones :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

$$S = \left(\frac{100}{CN} - 10 \right)$$

$$I_a = 0.2 * S$$

en donde P_e es la precipitación efectiva, P es la precipitación total sobre la cuenca, I_a es la abstracción inicial del suelo y CN es el número de curva que depende de todos los factores enunciados anteriormente. Este último parámetro se obtiene de valores tabulados, según una clasificación realizada por el SCS a partir del estudio de varias cuencas en los Estados Unidos.

Como se disponía de la información de tipo de suelo y cobertura vegetal de la cuencas se intentó calcular el número de curva de varias formas, a saber :

- Utilizando las Tablas propuestas por el Soil Conservation Service, sin considerar ningún efecto por los tipos de pendientes.
- Utilizando las Tablas propuestas por el Soil Conservation Service, considerando la variación por efecto de las pendientes. Esto se hizo ponderando entre los valores extremos de número de curva para cada tipo de cobertura, de acuerdo al tipo de pen-

diente. La diferencia entre el valor obtenido por ambas metodologías no fue muy diferente.

- c) Calculando el valor de CN a partir de los registros conjuntos de precipitación y escurrimiento, y resolviendo para CN el sistema formado por las ecuaciones anteriores. Ya que se tenían varios registros de precipitación y de caudal se logró obtener un valor de CN para cada tormenta. En general se pudo observar que los valores no fueron muy diferentes y su variación se pudo explicar debido a las diferentes condiciones de humedad antecedentes al evento. Para efectos de comparación se presenta el promedio aritmético de los valores obtenidos por cada método. Se puede apreciar que existe consistencia entre los valores obtenidos por las tres metodologías en la Tabla 6.

TABLA 6 Números de Curva para la cuenca en estudio.

Método	Cuenca San Carlos (hasta embalse)
CN según a)	78,38
CN según b)	78,46
CN según c)	77,00
Promedio	77,95

El valor de CN que se utilizará será el promedio de los obtenidos con las metodologías expuesta anteriormente.

5.4 Distribución de la lluvia en el tiempo

Se realizó con las gráficas de distribución temporal de la lluvia, cuya obtención en este estudio para las estaciones estudiadas se explicó anteriormente. Para la simulación se utilizó la curva correspondiente a una probabilidad del 50%, promediada con polígonos de Thiessen utilizando para ello las distribuciones temporal de las estaciones con mayor influencia en el área de estudio.

6. RESULTADOS

6.1 Análisis de frecuencia de caudales máximos

Se realizó para la cuenca del río San Carlos, usando la estación Puente Arkansas con 16 años de registros. El número de registros no es suficiente para obtener unos resultados muy confiables, pero permite cuantificar el orden de magnitud de las crecientes para compararlo con los resultados obtenidos con las otras metodologías.

El análisis de frecuencia se hizo utilizando el programa MPH, desarrollado en el Posgrado de Recursos Hidráulicos, el cual permite ajustar diferentes distribuciones de frecuencias teóricas a los datos históricos: Gumbel, Log Normal de dos parámetros, Log Normal de tres parámetros, Log Pearson Tipo III, etc.

El programa halla los parámetros de estas distribuciones usando el método de momentos o el de máxima verosimilitud. También hace pruebas de bondad de ajuste como la Smirnov - Kolmogorov y la Chi Cuadrado para comprobar el ajuste de cada distribución teórica seleccionada. Los valores históricos de caudales máximos instantáneos utilizados para el análisis de frecuencia y los resultados para la estación de Puente Arkansas se muestran en las Tablas 7a y 7b.

TABLA 7a Caudales máximos instantáneos para la estación Puente Arkansas.

Estación Puente Arkansas río San Carlos.			
Año	Q [m³/s]	Año	Q [m³/s]
1981	222,8	1989	582,9
1982	426,6	1990	216,5
1983	321,0	1991	136,0
1984	406,8	1992	305,9
1985	333,1	1993	309,9
1986	244,3	1994	294,5
1987	291,2	1995	831,7
1988	486,3	1996	334,7

TABLA 7b Resultados del análisis de frecuencias para la estación Puente Arkansas.

Estación	Periodo de Retorno (años)	Distribución		
		Normal	Log Normal II	Gumbel
Puente Arkansas	25	650,31	690,74	699,28
	50	700,74	785,27	790,55
	100	746,08	881,27	881,15

6.2 Hidrógrafas unitarias calibradas y sintéticas

Una vez obtenidas la precipitación efectiva y el hidrograma unitario instantáneo, ya sea histórico calibrado o sintético, se procede a determinar el hidrograma de escorrentía. Para realizar dichos cálculos se utilizó el programa HEC-1 elaborado por el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos.

Para la cuenca de San Carlos en el caso del hidrograma unitario calibrado con mínimos cuadrados en forma matricial, se usó un hietograma de precipitación efectiva determinado usando solo la estación de San Carlos-El Popo y otro usando al mismo tiempo esa estación y las estaciones Patio Bonito y La Arenosa. En este último caso hay que determinar la precipitación media sobre la cuenca antes de determinar el hietograma de diseño lo que se hizo con polígonos de Thiessen.

Se tienen entonces dos aplicaciones del método de mínimos cuadrados en forma matricial (HMIN para el caso de hidrógrafa unitaria calibrada solamente con la estación San Carlos El Popo y HPMIN para el caso de la hidrógrafa unitaria calibrada además con las estaciones de Patio Bonito y La Arenosa). Los resultados de dichos modelos se muestran la Tabla 8.

TABLA 8 Resultados para la Cuenca de San Carlos, en m³/s.

	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
MÉTODO	Caudal Pico	Caudal Pico	Caudal Pico
SCS	1022,4	1186,9	1372,5
SNYDER	1130,9	1312,8	1523,1
W-H	1030,5	1195,4	1381,2
HZOCH	726,4	843,8	976,3
HMIN	682,3	793,7	919,6
HPMIN	780,4	905,6	1047,0

6.3 Método racional

Con este método puede hallarse el caudal con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3.6}$$

en donde Q es el caudal en m³/s, i es la intensidad de la lluvia en mm/h para un determinado período de retorno, A es el área de la cuenca en Km², C es un coeficiente que depende del uso del suelo, la pendiente, etc.

Este último parámetro puede entenderse como la relación entre la precipitación efectiva y la precipitación total. Para la cuenca de San Carlos se trató de hallar este parámetro a partir de datos simultáneos de precipitación en las estaciones de San Carlos-El Popo, La Rápida y Los Medios, y de caudal en la estación de Puente Arkansas. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

TABLA 9 Coeficientes de infiltración y caudales por el método racional para la cuenca de San Carlos.

Pe[mm]	Pt[mm]	C=Pe/Pt	Q [m ³ /s] T _r =25años	Q [m ³ /s] T _r =50años	Q [m ³ /s] T _r =100años
17,98	62,0	0,29	561,78	621,65	688,13
27,50	78,1	0,35	678,00	750,26	830,51
35,62	101,8	0,35	678,00	750,26	830,51
18,12	65,5	0,28	542,40	600,21	664,40
41,66	107,5	0,39	755,49	836,01	925,42
19,80	61,8	0,32	619,89	685,96	759,32

Se observa alguna dispersión en los resultados, que puede explicarse de acuerdo a las condiciones de humedad antecedentes al evento. Para efectos comparativos se utilizará el valor máximo registrado correspondiente a $C=0,39$.

6.4 Regionalización de caudales máximos

Esta metodología es usualmente empleada cuando no se dispone de información de caudales en el sitio de interés que permitan determinar los caudales máximos asociados a ciertos periodos de retorno. Consiste en obtener expresiones en función de los parámetros morfométricos para estimar la media y la desviación estándar de los caudales máximos. La metodología para la obtención de las relaciones entre estos estadísticos y los parámetros morfométricos esta descrita por Franco y Pérez, 1995.

Para el departamento de Antioquia se han elaborado diferentes estudios de regionalización de caudales máximos, que incluyen la región de interés. Para el presente estudio se utilizaron los resultados obtenidos por Franco y Pérez, 1995. Las expresiones recomendadas para la cuenca de Samaná Norte, que incluye la cuenca del río San Carlos, se presentan a continuación:

$$\sigma = 10^{2.393} S^{-0.68}$$

$$\mu = 10^{1.826} A^{0.316}$$

En donde S es la pendiente del cauce en porcentaje y A es el área de la cuenca en Km^2 , σ es la desviación estándar y μ es la media. La referencia anterior recomienda utilizar la distribución Log Normal II para la cuenca del Samaná Norte.

En la Tabla 10 se presentan los valores obtenidos con la metodología de regionalización en la cuenca del río San Carlos.

TABLA 10 Caudales obtenidos por regionalización para la cuenca en estudio.

Q [m^3/s]	Cuenca de San Carlos
$T_r=25$ años	494,5
$T_r=50$ años	514,3
$T_r=100$ años	536,3

6.5 Índice de crecientes

Recientemente (1997) el posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos realizó un estudio en todo el departamento de Antioquia y calcularon los índices de crecientes para diferentes regiones del departamento. La expresión para la zona de San Carlos según la referencia 5 es :

$$\frac{Q}{Q_{2.33}} = 0,4966 * e^{(1,2574F_x(X))}, \quad r^2=0,9102$$

$$\frac{Q}{A} = 0.4917 * e^{(2.2731F_x(X))}, \quad r^2=0,9755$$

en donde :

- Q: caudal asociado a cierto periodo de retorno, en m^3/s .
- $Q_{2.33}$: caudal asociado para un periodo de retorno de 2.33 años, en m^3/s .
- A : área de la cuenca, en Km^2 .

El caudal correspondiente a un periodo de retorno de 2.33 años es $352.32 \text{ m}^3/\text{s}$ valor obtenido con análisis de frecuencia utilizando la distribución Gumbel y empleando los registros disponibles en la estación Puente Arkansas. En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos por el método de índice de crecientes.

TABLA 11 Resultados según el método del índice de crecientes

T_R en años	$F_X[X]$	Q con índice de crecientes según el $Q_{2,33}$
10	0,9	553,30
25	0,96	596,66
50	0,98	611,86
100	0,99	619,60

6.6 Grádex

Para este trabajo se utilizaron los resultados obtenidos previamente en la Cartilla hidrológica del departamento de Antioquia realizado por el Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, 1997. Para la estación de San Carlos - El Popo se encontró un Grádex de precipitación de 13,03 mm y al transformarlo en Grádex de caudal queda en 162,03 m³/s.

Para la utilización del caudal pivote correspondiente a un periodo de retorno de 10 años se tienen diferentes opciones, ya sea el resultado obtenido por análisis de frecuencia de la serie histórica, la media de los registros disponibles (cuando son tan pocos que no se puede realizar análisis de frecuencia), la utilización del método de índice de crecientes o de la regionalización.

En el presente estudio se utilizó el valor obtenido con el análisis de frecuencia según la distribución Gumbel y el valor obtenido con el método del índice de crecientes, para un periodo de retorno de 10 años. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

TABLA 12 Resultados por el método de Grádex, en m³/s.

T_R en años	Q_{10} índice crecientes, $Q_{2,33}$	Q_{10} Gumbel
25	701,77	724,70
50	814,08	837,01
100	926,39	949,33

7. SELECCIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO

Se discute ahora la selección del caudal de diseño para la cuenca del río San Carlos hasta 1 Km aguas abajo de la estación Puente Arkansas.

TABLA 13 Resultados obtenidos para la cuenca del río San Carlos, en m³/s.

MÉTODO	$T_R=25$ años Caudal Pico	$T_R=50$ años Caudal Pico	$T_R=100$ años Caudal Pico
SCS	1022,4	1186,9	1372,5
SNYDER	1130,9	1312,8	1523,1
W-H	1030,5	1195,4	1381,2
HZOCH	726,4	843,8	976,3
HMIN	682,3	793,7	919,6
HPMIN	780,4	905,6	1047,0
Racional	755,5	836,0	925,4
Regionalización	494,5	514,3	536,3
Distribución Log Normal	690,7	785,3	881,3
Distribución Gumbell	699,3	790,5	881,1
Índice de crecientes, $Q_{2,33}$	596,7	611,9	619,6
Grádex Q_{10} con índice crecientes según $Q_{2,33}$	701,8	814,1	926,4
Grádex Q_{10} Gumbel	724,7	837,0	949,3
promedio	745,69	844,52	949,74

Los resultados obtenidos por las diferentes metodologías y para los diferentes periodos de retorno se presentan en la Tabla 13. De acuerdo con estos resultados se pueden hacer las siguientes anotaciones:

- Los mayores valores del caudal pico se obtienen con los hidrogramas unitarios sintéticos de Snyder, William - Hanns y SCS. Estos métodos producen resultados comparables, obteniéndose los mayores valores con el hidrograma unitario de Snyder.
- Los métodos del hidrograma unitario de Zoch, de Mínimos Cuadrados en forma matricial, el método Racional y el método de Grádex en sus dos aplicaciones (utilizando como caudal pivote el valor

obtenido por análisis de frecuencia con la distribución Gumbel y el valor obtenido por el índice de crecientes según $Q_{2.33}$, producen resultados comparables. El método de Mínimos Cuadrados en forma matricial da mayores valores cuando se usan las dos estaciones (HPMIN) que cuando se usa una sola (HMIN).

- El método de Regionalización genera los valores más bajos de caudal y los datos más dispersos respecto a los otros métodos.
- El método de ajuste de una distribución de probabilidades a la serie de caudales máximos instantáneos entrega resultados comparables para las dos distribuciones. La distribución Gumbel es la que produce valores mayores y fue la que presentó mejor ajuste probabilístico. Los resultados obtenidos con análisis de frecuencia son un poco menores que los obtenidos por los métodos de Zoch, Racional y Mínimos Cuadrados en forma matricial.
- Los resultados con el método del índice de crecientes son relativamente bajos comparados con las otras metodologías.
- Debido a que los métodos de Zoch, Mínimos Cuadrados en forma matricial y Grádex producen resultados similares (un poco más altos) a los obtenidos con las distribuciones ajustadas a datos históricos, esos métodos son los escogidos como los más adecuados para este estudio.
- En el caso particular de este estudio se contaba con información de lluvia y caudal en el sitio de interés, lo que permitió la calibración de la hidrógrafa unitaria, esta metodología es la recomendada para el caudal de diseño. En caso de no disponer de la información adecuada para dicha calibración la metodología recomendada sería el Grádex en su aplicación del caudal pivote obtenido por análisis de frecuencia según la distribución Gumbel.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La carencia de información hidrológica adecuada es un problema que acosa la mayoría de las regiones colombianas. Inclusive cuando existen ciertos registros de precipitación y caudal, las series disponible son cortas o se han procesado de forma inadecuada.

La región del oriente antioqueño y concretamente de San Carlos no es la excepción, ya que cuando se disponía de registros, estos se caracterizaban por ser cortos o por ser procesados inadecuadamente.

El cuidado que se tenga en la manipulación de la información incide directamente en la confiabilidad de los resultados obtenidos. Es por esto que procedimientos simples como la obtención de las curvas de calibración, las curvas de Intensidad - Frecuencia - Duración, las curvas de distribución temporal de las lluvias, y las pérdidas por infiltración puede afectar considerablemente los resultados obtenidos, ya que constituyen las bases de aplicación de muchas metodologías hidrológicas.

En la utilización de los métodos con información escasa se debe tener especial cuidado, ya que el grado de incertidumbre asociado para cierto período de retorno puede ser alto. Sería recomendable, en lo posible, la verificación de los resultados con otras metodologías o aún con la implementación de campañas de medición que a un plazo posterior permitan la realización de los métodos hidrológicos con mayor confiabilidad.

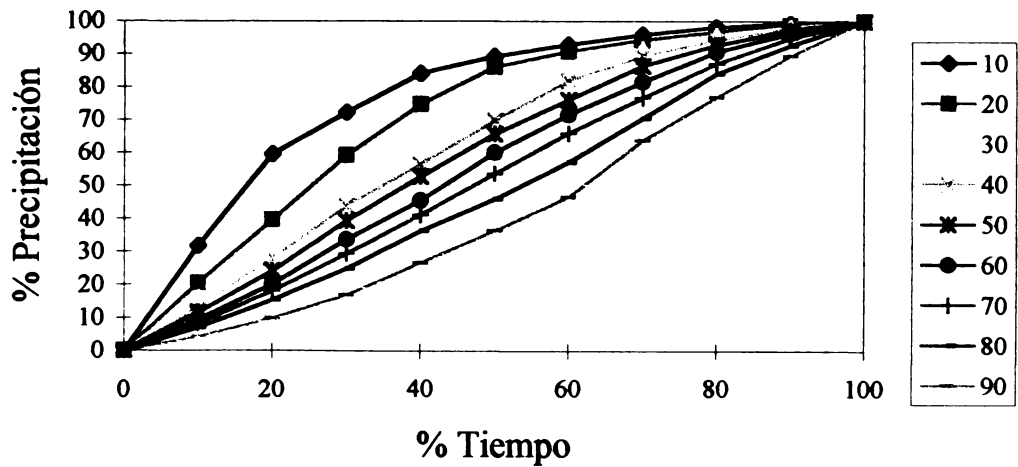


FIGURA 1 Curva De distribución temporal en la Estación San Carlos El Popo.

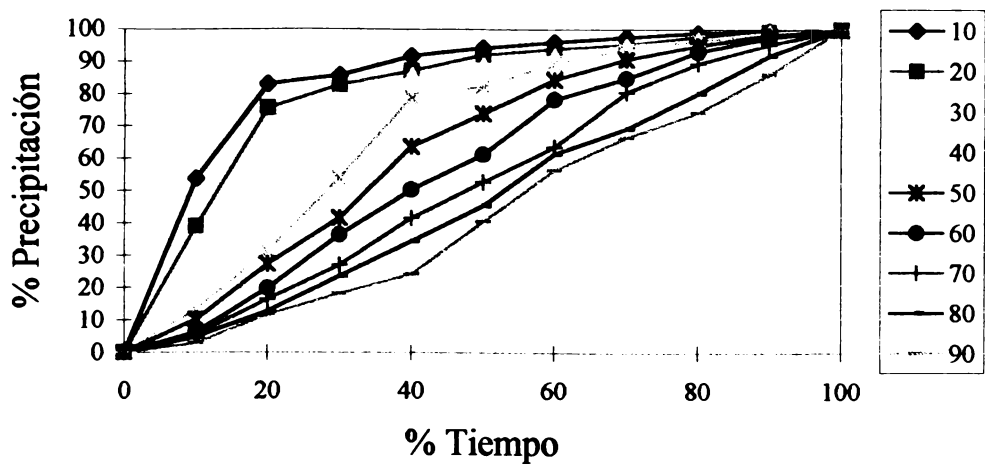


FIGURA 2 Curva De distribución temporal en la Estación Porto Belo.

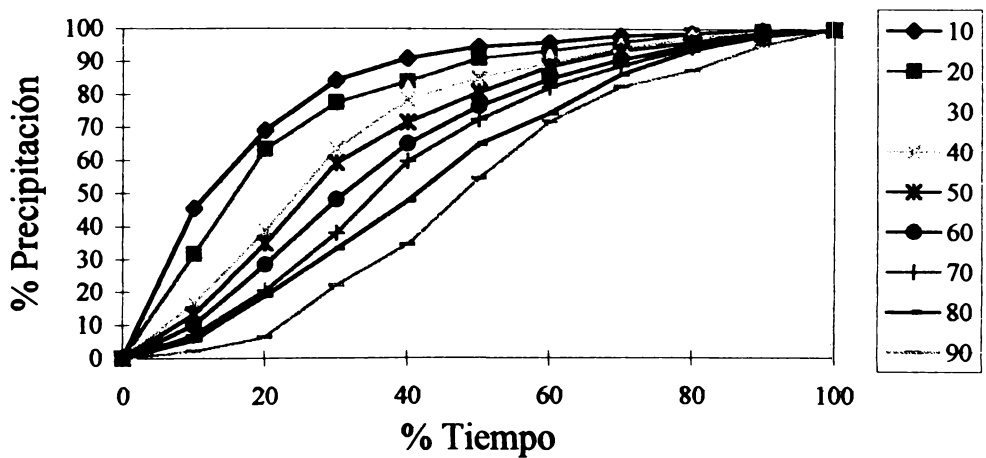


FIGURA 3 Curva De distribución temporal en la Estación Los Medios.

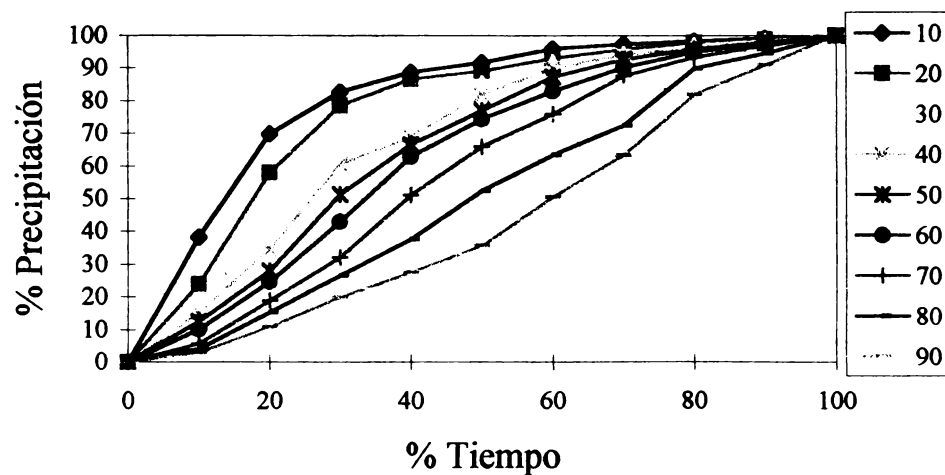


FIGURA 4 Curva De distribución temporal en la Estación La Rápida.

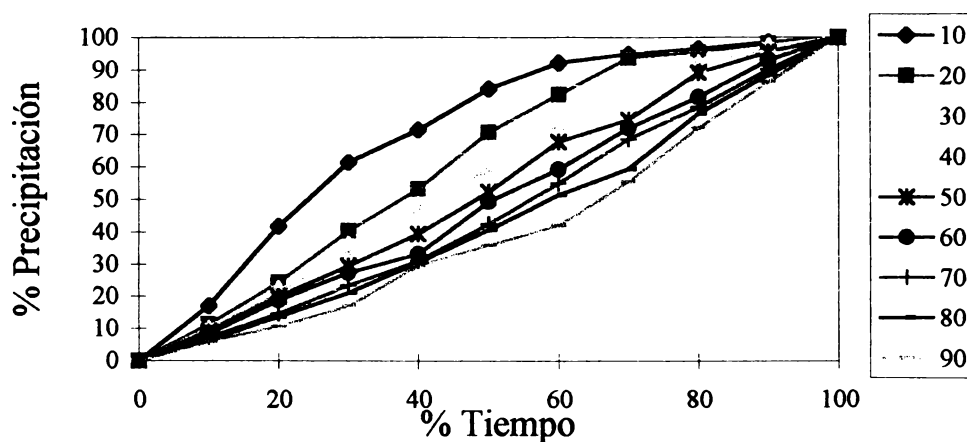


FIGURA 5 Curva De distribución temporal en la Estación La Cascada.

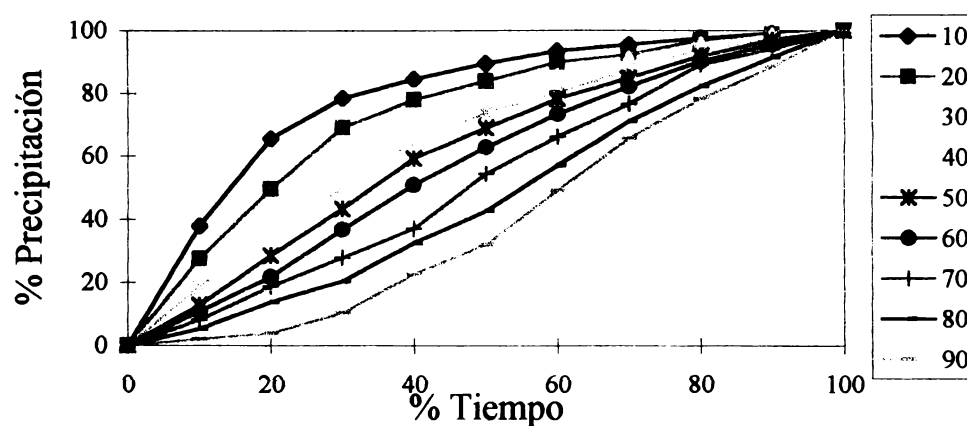


FIGURA 6 Curva De distribución temporal en la Estación Calderas.

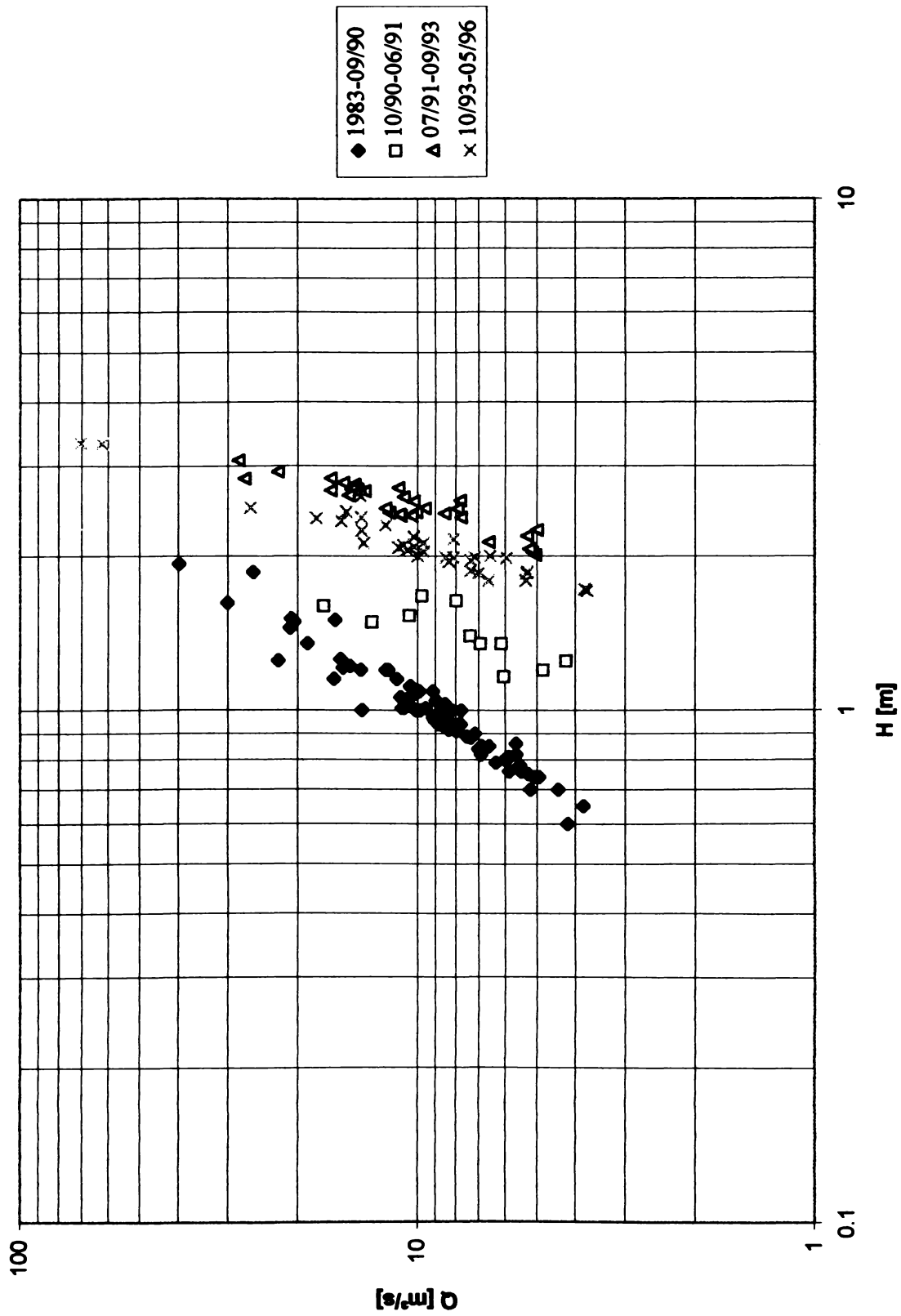


FIGURA 7. Registros de aforos líquidos en la estación Puentes Arkansas.

REFERENCIAS

1. ACOSTA, Z., RUIZ, D. "Adaptación del método Grádex en cuencas antioqueñas". Tesis. Universidad Nacional. 1997
2. BRAS, Rafael. "Hidrology". Ed. Addison-Wesley Publishing Company Massachusetts. 1990. 643p.
3. CARDONA, A., LONDOÑO, G. "Calibración de los parámetros del modelo de William y Hanns para cuencas antioqueñas". Tesis Universidad Nacional. 1991.
4. CHOW, Ven T. et al. "Applied Hydrology". Ed. McGraw-Hill Publishing Company. New York. 1988. 572p.
5. EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. "Anuario Hidrometeorológico". 1993.
6. EPAM Ltda. "Estudio para el ordenamiento y manejo de los ríos San Carlos, Guatapé bajo, Calderas, Tafetanes y quebradas San Matías, Vegas y Honda". 1984.
7. FRANCO, C. J., PÉREZ, C. A. "Regionalización de Caudales máximos en Antioquia" Tesis Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 1995.
8. ISAGEN E.S.P.A. "Anuario Hidrometeorológico". 1996.
9. LINSLEY, R, KOHLER, M. y PAULHUS, J. "Hidrología para ingenieros". 2Ed. Bogotá. McGraw-Hill, 1986. 388p.
10. POSGRADO EN APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS. "Cartilla hidrológica para el departamento de Antioquia". Medellín. 1997.
11. POSGRADO EN APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS. "Estudio hidrológico e hidráulico de las cuencas de los ríos San Carlos, Nare, Calderas, Nucito y Tafetanes". Medellín. 1997.
12. REMENIERAS, G. "Tratado de Hidrología aplicada". Editores Técnicos Asociados 1974. 515p.
13. SMITH, R., RENDÓN, L. D. "Optimización de la representación del sistema cuenca". Memorias : XVII Congreso Latinoamericano de hidráulica. Vol. 3. 1996 pág 73-849.
14. SMITH, R., VELÁSQUEZ, J. D. "Modelos conceptuales en hidrología para la estimación del hidrograma unitario". En : Avances en Recursos Hidráulicos, 1995. pág 55-72.
15. VIESSMAN, W et al. Introduction to Hydrology. 2Ed. Nuevo México, Harper y Row Editores, 1977. 704p.