

A mis hermanos, sobrinos y  
sobrinietos Emilia, Juanita,  
Pablo y Gabriel

En la materia de hidrología es importante revisar conceptos y metodologías adoptadas comúnmente, con el objeto de proponer nuevos criterios basados en análisis de calibración de modelos hidrológicos.

# Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVOS Y ALCANCES .....	1
3.	METODOLOGÍA.....	2
3.1	Método simétrico de distribución horaria de la precipitación.....	2
3.2	Descripción del Proceso Metodológico .....	4
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	6
4.1	Precipitación vs Periodo de Retorno Estación Pluviográfica Los Llanos .....	6
4.2	Caudales vs Periodo de Retorno Estación Hidrométrica Becerril.....	9
4.3	Esquema de la Cuenca a Modelar.....	12
4.4	Características Generales Subcuencas .....	14
4.5	Distribución de la Precipitación Diaria, Diversas Duraciones Método Simétrico .....	14
4.6	Factores de Reducción de la Precipitación por Duración y Área .....	19
4.7	Precipitaciones Duración 7 Horas vs Períodos de Retorno.....	20
4.8	Tiempos de Concentración y Constantes de Muskingum.....	22
4.8.1	Tiempos de concentración .....	22
4.8.2	Constantes de Muskingum .....	24
4.9	Estimativos Número de Curva CN's (Soil Conservation Sevice).....	28
4.10	Caudales y Porcentajes de Variación Duración Siete (7) Horas Calibrado vs Escenario Tabla sin Calibrar Duración Siete (7) Horas .....	29
4.11	Gráficos.....	34
4.11.1	Periodo de Retorno 50 Años.....	34
4.11.2	Período de Retorno 100 Años.....	37
4.11.3	Período de Retorno 500 Años.....	41
4.11.4	Período de Retorno 1.000 Años.....	44
4.11.5	Período de Retorno 5.000 Años.....	48
4.11.6	Período de Retorno 10.000 Años.....	51
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	55

6. BIBLIOGRAFÍA.....56

# 1. INTRODUCCIÓN

En el tema de hidrología en la ingeniería se considera de especial relevancia la estimación de caudales de diseño para diversos períodos de retorno, según el tipo de obra que se esté diseñando, el criterio del ingeniero hidrólogo y la relevancia y pertinencia de calibrar los modelos lluvia escorrentía con base en información hidrológica representativa para la(s) cuenca(s) o subcuenca(s) en análisis.

Es así como para obras de drenaje, puentes y en general manejo de aguas en infraestructura, embalses y represas ya sea para generación de energía y/o abastecimiento de agua, se debe seleccionar un período de retorno (TR) de diseño el cual puede variar normalmente entre 50 y 100 años para obras de relativamente pequeña envergadura (drenajes, puentes, pontones, entre otros) y entre 500 y 10.000 años para obras de mayor envergadura como es el caso de desviaciones y vertederos o rebosaderos en presas, represas y embalses.

En el presente documento se presenta un ejercicio de análisis para la estimación de caudales máximos para diferentes períodos de retorno donde se establece la relevancia y pertinencia respecto a la calibración de modelos lluvia escorrentía con base en información hidrológica existente y/o representativa para la(s) cuenca(s) o subcuenca(s) en análisis.

## 2. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo del presente estudio es realizar un ejercicio de análisis para estimar caudales máximos de diseño para diferentes períodos de retorno, tomado como referente la cuenca del río Maracas asociada al río Calenturitas y éste al río Cesar, corrientes localizadas en el departamento del Cesar Colombia.

Los análisis realizados se basan en información hidrológica y meteorológica representativa de la cuenca, datos aportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM dentro de su función misional de aporte de información.

Para el cálculo de caudales y precipitaciones máximas para diversos periodos de retorno se utilizó el programa Easyfit 5.6 (Programa para ajustes de distribución) desarrollado en Holanda, en la estación hidrométrica Becerril ubicada en el río Maracas y la estación pluviométrica Los Llanos ubicada en el municipio de Becerril (En el anexo 1 se presenta una descripción general del programa Easyfit).

Para la calibración del modelo de cuenca hidrológico se utilizó el programa HEC-HMS 4.2.1 (Modelación de Sistemas Hidrológicos) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, donde se estimó el número de escurrimiento CN, para cada período de retorno analizado, de manera que las precipitaciones máximas en la estación pluviométrica Los Llanos representen de una manera adecuadamente los caudales máximos en la estación hidrométrica Becerril en el río Maracas para los mismos períodos de retorno (En el Anexo 2, se adjunta un manual práctico para el manejo de éste programa).

Complementariamente se plantea un esquema de alternativas de distribución horaria de la precipitación denominado método simétrico, el cual se explicará en el siguiente numeral.

El número de escurrimiento CN estima la altura de la lluvia efectiva (de escorrentía) a partir de la lluvia total, metodología propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos el cual depende del uso, tratamiento y cobertura del suelo, pendiente del terreno, tipo de suelo y humedad antecedente.

El modelo es calibrado respecto al número de escurrimiento CN para diferentes periodos de retorno para una duración de lluvia de 7 horas aplicando el método simétrico de distribución horaria de la precipitación, método que se explicará en detalle en próximo numeral "Metodología"; adicionalmente se calculan los caudales máximos con base en la metodología de selección del número de escurrimiento CN mediante tabla sin calibración del modelo (Considerando sólo las características físicas y bióticas de la cuenca) y duración de la precipitación de 7 horas, con el objeto de analizar las diferencias en los resultados de aplicación de ambos procedimientos.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones respectivas.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Método simétrico de distribución horaria de la precipitación.

En consideración a que a mayor periodo de retorno la tendencia esperada en la duración de la precipitación es que dicha duración sea mayor, se propone una distribución horaria de la misma de 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21 y 23 horas a nivel diario, lo cual corresponde a todas la posibilidades de duración de la precipitación en un día para una hora central y las restantes horas distribuidas

simétricamente a lado la de la hora central de mayor precipitación horaria, de ahí que la duración en horas de las posibles precipitaciones a nivel diario corresponda a números impares.

A continuación se presenta los pasos a seguir para establecer la distribución simétrica de la precipitación para una duración dada:

- a) Se selecciona la duración de la precipitación a analizar, esta duración se le resta uno (1) (hora central), se divide entre dos (2) y al resultado se le suma uno (1) de manera que este número corresponde al número de horas desde la hora central hasta la primera hora de precipitación; con lo anterior se establece el factor de establecimiento de simetría al dividir uno (1) por al número de horas desde la hora central hasta la primera hora de precipitación.

Los valores iniciales de cada hora desde la primera hora de precipitación hasta la hora de precipitación central se establecen de la siguiente manera: Para la primera hora multiplicando factor de establecimiento de simetría por uno (1), para la segunda hora por dos (2), para la tercera hora por tres (3) y así sucesivamente hasta la hora de precipitación central.

- b) Se normalizan los valores dados en el paso a) dividiendo cada valor inicial por la sumatoria de los valores iniciales desde la primera hora precipitación hasta la hora de precipitación central, de manera que la sumatoria de estos últimos valores debe ser igual a uno (1), de esta manera queda establecida la fracción relativa de cada hora de precipitación desde la primera hora de precipitación hasta la precipitación central.

Seguidamente se establece la fracción absoluta de cada hora simétrica (sin considerar la hora de precipitación central), dividiendo la fracción relativa entre dos (2) desde la primera hora de precipitación hasta la última hora de precipitación anterior a la hora de precipitación central; de esta manera queda establecida las fracciones para la primera mitad de precipitaciones sin considerar la fracción de la hora de precipitación central, se replica simétricamente para la segunda mitad de horas de precipitación, donde la fracción final para la hora central de precipitación se establece restando a uno (1) la sumatoria de las fracciones de la primera mitad de precipitación (sin considerar la fracción de la hora de precipitación central) multiplicada por dos (2) para considerar la segunda mitad simétrica de las fracciones de

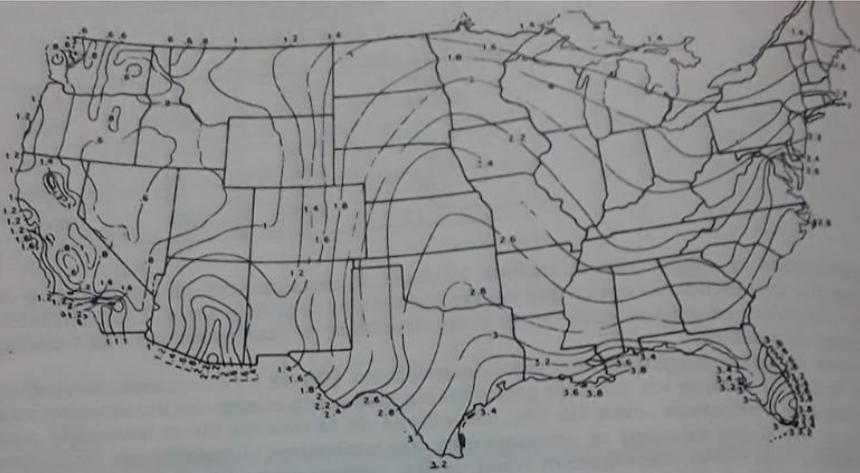
precipitación, quedando así establecida una distribución de precipitación horaria simétrica para cada duración de precipitación analizada.

### 3.2 Descripción del Proceso Metodológico

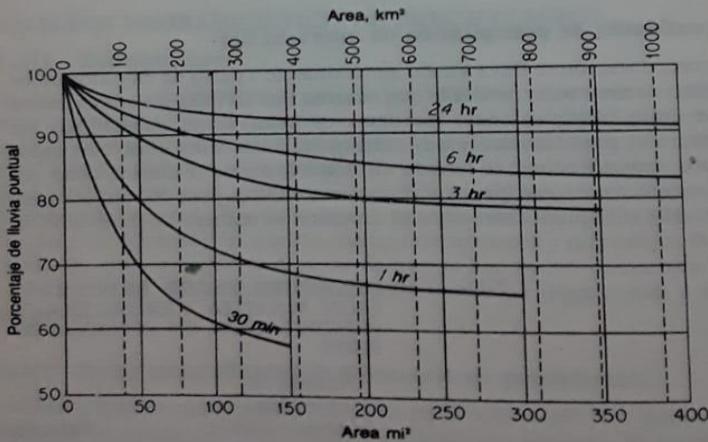
Como ya se ha explicado en parte, el desarrollo del presente trabajo consistió inicialmente en extender los datos de la estación pluviométrica Los Llanos y la estación hidrométrica Becerril hasta 10.000 años, mediante el programa Easyfit 5.6 (Programa para ajustes de distribución) desarrollado en Holanda; de esta manera se calibraron los números de Curva CN's respecto a la subcuenca Alto Maracas para varios períodos de retorno, de manera que mediante corridas sucesivas del programa HEC-HMS 4.2.1 (Modelación de Sistemas Hidrológicos), para un período de retorno dado las precipitaciones de la estación pluviométrica Los Llanos reproduzcan adecuadamente los caudales en la estación hidrométrica Becerril sobre el río Maracas.

Con base en lo anterior, se asignaron los mismos CN's para los diferentes períodos de retorno a la cuenca del Alto Tucuy ya que son cuencas colindantes con pendientes relativamente altas (Mayores al 1%); para las cuencas bajas (Bajo Maracas, Bajo Tucuy y Calenturitas) con pendiente bajas (menores al 1%) se les asignó los CN's en una proporción de 61 / 79, valores de CN's para cuencas mayores al 1% y menores al 1% y con las mismas características de tipo de suelo, uso del suelo, cobertura vegetal, tomado de las tabla de número de curvas CN's de la referencia "Francisco Javier Aparicio Mijares, Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial Limusa S.A, México, 2015": igualmente se procedió para el escenario de CN's seleccionado por tabla sin calibración.

Dentro del proceso de manejo del programa HEC-HMS 4.2.1, se establecieron las precipitaciones horarias para diferentes períodos de retorno y para una duración de 7 horas aplicando el método simétrico de distribución de precipitación horaria, aplicando los respectivos factores de reducción de precipitación por área y duración de precipitación, en este caso 7 horas, con base en la referencia "Linsley, Kohler & Paulus, Hidrología para Ingenieros, Editorial McGraw-Hill Interamericana de México S.A, Segunda Edición, México, 1990" y cuyo gráfico se presenta a continuación.



**FIGURA 11-7**  
Precipitación horaria que se espera que sea igualada o excedida en promedio una vez cada 10 años para el área continental de los Estados Unidos. (U.S. National Weather Service.)



**FIGURA 11-8**  
Valores de la reducción en función del área de drenaje para valores puntuales de precipitación. (U.S. National Weather Service.)

Igualmente se calcularon los tiempos de concentración  $T_c$ 's bajo diversas formulaciones, donde se descartaron las formulaciones que arrojaron valores fuera de la tendencia general de la mayoría de las formulaciones; calculados los  $T_c$ 's se estimaron los tiempos Lag (Tempo transcurrido desde el centroide de la precipitación neta y el pico del hidrograma).

Con los datos anteriores y para 3 tránsitos de crecientes asociados al modelo hidrológico, que se explicaran más adelante, se calcularon las constantes K y X asociadas al método de Muskingum de tránsito de avenidas.

Se procedió a operar el modelo programa HEC-HMS 4.2.1 (Modelación de Sistemas Hidrológicos) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, para los 2 escenarios, el primero con los números de curva CN's calibrados y el segundo asociado a selección de CN's mediante tabla sin calibración; se tabularon los resultados para subcuencas y puntos de conexión para periodos de retorno de 50, 100, 500, 1.000, 5.000 y 10.000 años, se graficaron los hidrogramas correspondientes comparativos respecto a los 2 escenarios para cada subcuenca, punto de conexión y para los diferentes periodos de retorno analizados.

Finalmente se establecieron las respectivas conclusiones y recomendaciones.

## 4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los análisis y resultados para el escenario de precipitación con duración 7 horas con CN's calibrados de manera que para cada período de retorno las precipitaciones en la estación lo Llanos replique adecuadamente los caudales para cada período de retorno asociado en la estación Becerril ubicada en el río Maracas y aplicando la metodología de selección del número de escurrimiento CN mediante tabla sin calibración y duración de la precipitación de 7 horas, utilizando el programa HEC-HMS 4.2.1 (Modelación de Sistemas Hidrológicos) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos como ya mencionó.

### 4.1 Precipitación vs Periodo de Retorno Estación Pluviográfica Los Llanos

Como ya se mencionó se utilizó el programa Easyfit 5.6 (Programa para ajustes de distribución) desarrollado en Holanda, el cual considera más de 55 funciones de distribución que para el caso de Estación pluviográfica los Llanos, las dos mejores funciones de ajuste correspondieron a las siguientes:

- Log-Logistic: Estadística Kolgomorov Smirnov = 0,10788
- Gen-Logistic: Estadística Kolgomorov Smirnov = 0,10878

A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados para los datos existentes, los valores estimados para periodos de retorno mayores

a 25 años, el estimativo de error establecido como el promedio del valor absoluto de los datos reales menos los datos estimados y se presenta en la parte inferior de la tabla el valor de los parámetros de cada función, donde finalmente se grafican los datos reales (línea recta) y los valores estimados.

Para la estación los Llanos como se puede observar la función de mejor ajuste correspondió a la función Log-Logistic.

### Análisis de Frecuencia Estación Pluviográfica Los Llanos

No. Orden	Prob. >=	Prob. <	H.Max (mm)	TR (Años)	Frec Acum Log	Frec Acum Gen	H.Max (mm) Real	H.Max (mm) Real	H.Estim (mm) Log	H.Estim (mm) Log	Error Log	Error Gen
	0,0001	0,9999		<b>10000</b>					<b>422,8</b>	254,7		
	0,0002	0,9998		<b>5000</b>					<b>379,3</b>	243,6		
	0,001	0,999		<b>1000</b>					<b>294,9</b>	217,5		
	0,002	0,998		<b>500</b>					<b>264,5</b>	206,1		
	0,010	0,990		<b>100</b>					<b>205,4</b>	179,3		
	0,020	0,980		<b>50</b>					<b>184,0</b>	167,5		
No. Orden	Prob. >=	Prob. <	H.Max (mm)	TR (Años)	Frec Acum Log	Frec Acum Gen	H.Max (mm) Real	H.Max (mm) Real	H.Estim (mm) Log	H.Estim (mm) Log	Error Log	Error Gen
1	0,025	0,975	200,0	40,00	0,988	0,997	200,0	200,0	177,5	163,6	22,5	36,4
	0,040	0,960	164,6	<b>25,00</b>	0,960	0,976	<b>164,6</b>	<b>164,6</b>	<b>164,6</b>	155,4	0,0	9,1
2	0,050	0,950	141,7	20,00	0,902	0,915	141,7	141,7	158,7	151,4	17,0	9,7
3	0,075	0,925	137,0	13,33	0,881	0,891	137,0	137,0	148,3	144,1	11,3	7,1
4	0,100	0,900	137,0	<b>10,00</b>	0,881	0,891	<b>137,0</b>	<b>137,0</b>	<b>141,2</b>	138,7	4,2	1,7
5	0,125	0,875	135,6	8,00	0,874	0,883	135,6	135,6	135,7	134,4	0,1	1,2
6	0,150	0,850	130,0	6,67	0,842	0,844	130,0	130,0	131,3	130,7	1,3	0,7
7	0,175	0,825	129,0	5,71	0,835	0,837	129,0	129,0	127,6	127,6	1,4	1,4
8	0,200	0,800	129,0	<b>5,00</b>	0,835	0,837	<b>129,0</b>	<b>129,0</b>	<b>124,3</b>	124,7	4,7	4,3
9	0,225	0,775	127,0	4,44	0,821	0,820	127,0	127,0	121,5	122,2	5,5	4,8
10	0,250	0,750	127,0	4,00	0,821	0,820	127,0	127,0	118,9	119,8	8,1	7,2
11	0,275	0,725	125,0	3,64	0,805	0,802	125,0	125,0	116,5	117,5	8,5	7,5
12	0,300	0,700	115,0	3,33	0,708	0,695	115,0	115,0	114,3	115,4	0,7	0,4
13	0,325	0,675	114,7	3,08	0,705	0,691	114,7	114,7	112,2	113,4	2,5	1,3
14	0,350	0,650	114,0	2,86	0,697	0,683	114,0	114,0	110,3	111,4	3,7	2,6
15	0,375	0,625	110,0	2,67	0,646	0,631	110,0	110,0	108,4	109,5	1,6	0,5