

INTRODUCCIÓN

El sistema de una cuenca está definido por los drenajes que forman el cauce principal; la divisoria de aguas de las montañas y la geografía de la cuenca condicionan la entrada de agua a la misma, para producir posteriormente escorrentía directa. La precipitación total en una cuenca se reduce debido a las pérdidas por infiltración y procesos de evapotranspiración; a la precipitación que resulta de éstas pérdidas se le conoce como precipitación efectiva, que es la que en última instancia produce el caudal total en el cauce principal de una corriente.

La estimación de las variables hidrológicas de un sistema cualquiera es un tema que debe ser tratado con total responsabilidad y certeza por parte del Ingeniero. Es evidente, que estimar adecuadamente la precipitación total en una cuenca hidrográfica y el caudal producido en la misma, es un tema que tiene diversas variables, que hacen de esta estimación una tarea que en algunos casos puede ser complicada. Existen algunos parámetros propios de la cuenca que deben considerarse con muy buen juicio y en la medida en que el ingeniero tenga una mayor experiencia en diseños hidrológicos, estos parámetros serán más o menos acertados; tales parámetros corresponden a los que definen la geomorfología y las características físicas de la cuenca como lo son: la pendiente del cauce principal y la longitud del mismo, la forma de la cuenca, el número de curva, tipo y usos del suelo, tiempo de concentración, entre otros. Dichos parámetros, los cuales se explican a lo largo del documento, son variables que juegan un papel muy importante en la escorrentía finalmente producida por la lluvia en la cuenca.

El tema tratado en este documento, que hace parte del proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Civil de la Universidad EAFIT, hace referencia a un análisis de sensibilidad de los modelos lluvia escorrentía ante el cambio de

algunos parámetros geomorfométricos y climatológicos; esto con el fin de identificar el grado de incidencia que tiene cada uno de los parámetros analizados en la respuesta de una cuenca a la generación de caudales estimados mediante los modelos lluvia escorrentía a partir de hidrogramas unitarios sintéticos.

RESUMEN

Este proyecto de investigación plantea un análisis de sensibilidad que sirva de base para identificar las variables que más inciden en los modelos lluvia escorrentía, a partir de la utilización de hidrógrafas unitarias sintéticas desarrolladas por Williams & Hann (Williams, 1973) y por el Soil Conservation Service (S.C.S., 1972), donde las variables propias de cada modelo están condicionadas principalmente por las características geomorfológicas y climatológicas de la cuenca. Vale la pena anotar que en este estudio no se utilizan cuencas reales, debido a que el resultado final no está ligado a una cuenca específica, sino a las variaciones en los caudales a partir de cambios o modificaciones en los parámetros que componen los dos modelos mencionados. Tales modificaciones se producen en nueve grupos de cuencas de igual área, pero con longitudes, pendientes y factores de forma diferentes.

Finalmente, se hace un análisis de los rangos de variación y de la incidencia de cada una de las variables en los resultados finales de caudales y se presenta una serie de conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados encontrados.

Palabras clave: Modelos lluvia escorrentía, Soil Conservation Service (SCS), Williams y Hann (W&H), número de curva (CN), distribución de la lluvia en el tiempo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Comúnmente, para el diseño de obras hidráulicas se suelen llevar a cabo estudios hidrológicos que permitan representar la respuesta de una cuenca ante eventos de crecientes; dicha representación se logra utilizando y procesando la información hidrométrica disponible, realizando análisis encaminados a definir los caudales de diseño de las obras.

Debido a lo anterior, la calidad de los estudios hidrológicos se encuentra condicionada por la cantidad y precisión de la información disponible, tema sobre el cual existe una gran limitación de información de caudales en las cuencas colombianas, principalmente por la falta de instrumentación en la mayoría de ellas. Debido a esta falta de datos, en el diseño de obras hidráulicas es bastante común hacer uso de modelos lluvia escorrentía, los cuales tienen como finalidad la estimación de caudales de crecientes a partir de información de precipitaciones.

En las empresas de consultoría es muy frecuente la utilización de modelos lluvia escorrentía basados en hidrogramas unitarios sintéticos para la estimación de caudales máximos cuando se tiene escasez de información, al punto tal de realizar la estimación de dichos caudales de manera mecánica, sin tener mayor control sobre los parámetros requeridos por los modelos y su incidencia en los resultados obtenidos. Debido a esto se vio la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad que indicara el grado de influencia de cada uno de los parámetros de entrada de los modelos en los resultados de caudales máximos obtenidos, que a su vez dependen del tipo de cuenca analizada.

2. ESTADO DEL ARTE

Para la estimación de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, se pueden llevar a cabo diferentes procesos o metodologías que normalmente, son muy diferentes entre sí. Es posible obtener dichos caudales directamente por medio de análisis estadísticos de las series de registros de caudales disponibles en estaciones hidrométricas, o indirectamente mediante la utilización de diferentes metodologías cuando no se dispone de este tipo de registros. Algunas de las metodologías más importantes y conocidas para la estimación de caudales se mencionan a continuación.

2.1 ANÁLISIS DE FRECUENCIAS (MONSALVE, 1995)

La razón de ser de este análisis, es estimar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de un evento pasado o futuro. Como condición para este análisis, se requiere que los datos analizados sean homogéneos e independientes. La independencia de los datos se refiere a que un evento hidrológico cualquiera no debe entrar al conjunto de datos más de una vez, mientras que la restricción de la homogeneidad de los datos garantiza la fidelidad de los mismos e indica que estos provienen de la misma población.

Una vez realizado el procedimiento estadístico para la determinación de las probabilidades y frecuencias a partir de las series de registros históricos de caudales, se determina una distribución probabilística que permita ajustar de manera adecuada los caudales asociados a diferentes períodos de retorno.

2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS CON BASE EN INFORMACION DE RADARES (BEDIENT AND HUBER, 2002)

Para la estimación de caudales, los modelos construidos con base en información de radares emplean un modelo hidrológico distribuido en el cual se considera la variación espacial de parámetros tales como la pendiente, rugosidad hidráulica, infiltración y la precipitación en la cuenca de estudio, esta última utilizando los datos de precipitación obtenida por estaciones de radar.

Estos modelos calculan los caudales de una corriente solucionando la ecuación de conservación, planteando un sistema de ecuaciones por medio de metodologías tales como la onda dinámica, onda cinemática, entre otras y obteniendo la solución con algoritmos basados en la aplicación de métodos de diferencias o elementos finitos.

La integración de los diferentes parámetros utilizados por el modelo (pendiente, rugosidad e infiltración) con los datos de precipitación obtenidos por las estaciones de radar, los cuales presentan una distribución tanto espacial como temporal, se realiza usando una plataforma SIG (Sistemas de Información Geográfica), por medio de una discretización de la cuenca en pixeles, solucionando para cada uno de los mismos la ecuación de continuidad y realizando un tránsito de caudales entre las mismas.

2.3 MODELOS LLUVIA ESCORRENTÍA

Dado que es más fácil encontrar registros de precipitación en comparación con registros de caudales, se hace necesario la utilización de modelos que permitan estimar caudales a partir de información de precipitación y de las características de la cuenca. Entre los principales parámetros que intervienen en el proceso para la transformación de la lluvia en caudal, también conocido como modelo lluvia-escorrentía, se encuentran: (i) área de la cuenca, (ii) altura total de la precipitación,

(iii) características generales de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.), (iv) distribución de la lluvia en el tiempo y (v) distribución de la lluvia en el espacio.

El hidrograma unitario es quizás el modelo lluvia escorrentía de mayor utilización en la práctica de la ingeniería y se puede definir como el hidrograma de escorrentía directa que resulta de una precipitación efectiva de profundidad unitaria, uniformemente distribuida y de duración específica.

Los hidrogramas unitarios sintéticos han sido desarrollados para enfrentar el problema de información escasa. Generalmente estos modelos relacionan las características principales del hidrograma unitario sintético (caudal pico, tiempo al pico, tiempo base y otros) con características morfométricas de la cuenca (área, pendiente, longitud del cauce principal y otros). Una vez estimadas las características morfométricas requeridas, se puede calcular el hidrograma unitario, el cual se convoluciona con la precipitación efectiva para producir el hidrograma de escorrentía directa de la cuenca de estudio. Si lo que se quiere es el caudal máximo asociado a un cierto periodo de retorno, la convolución se hace con la precipitación efectiva que tiene ese periodo de retorno y se asume que el pico del hidrograma de escorrentía directa representa el caudal máximo buscado con esa probabilidad de ocurrencia (Smith, 1997).

La precipitación efectiva corresponde a la precipitación total menos las pérdidas de precipitación por infiltración, retención y evapotranspiración. Para estimar las pérdidas es frecuente la utilización del método propuesto por el U. S. Soil Conservation Service (S.C.S., 1985), en el cual las pérdidas se calculan a partir de la intensidad de la precipitación y de un parámetro denominado número de curva (CN), que a su vez es función de la cobertura vegetal, del tipo y uso del suelo, de la impermeabilidad del terreno y su humedad antecedente.

Existen diferentes hidrogramas sintéticos; algunos de los hidrogramas de mayor utilización en nuestro medio son: el de Snyder (Snyder, 1938), que relaciona las características geomorfométricas de la cuenca; el hidrograma unitario del United

States Soil Conservation Service (S.C.S., 1972) y el hidrograma unitario de Williams y Hann (Williams, 1973), basados en hidrogramas unitarios adimensionales y finalmente el hidrograma unitario de Clark (Clark, 1945), que está basado en la capacidad de almacenamiento de la cuenca y el tránsito de la misma.

Para la selección de los hidrogramas unitarios sintéticos a utilizar en los análisis, se partió del hecho de que un gran número de estudios han dado una respuesta parcial al modelo que mejor ajuste ha tenido en cuencas con características como las presentes en nuestro medio. En un estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia (Mesa, 1997) con miras a determinar la aplicabilidad de los hidrogramas unitarios sintéticos en la estimación de caudales, se presenta un resumen de diversos estudios que tratan de explicar o dar respuesta a los métodos que mejor se ajustan a los caudales observados. Muchos de estos fueron desarrollados en cuencas colombianas y otros en cuencas de Estados Unidos y Nueva Zelanda. Algunos de los modelos de hidrogramas evaluados en las investigaciones que se mencionan en dicho estudio son: (i) Williams y Hann, (ii) Snyder, (iii) Soil Conservation Service, (iv) Clark, (v) Método Racional, (vi) Taylor, (vii) Geomorfoclimático, entre otros.

Si bien las respuestas obtenidas en aquellos estudios no siempre han sido las mismas, podría decirse que de todos los hidrogramas unitarios sintéticos utilizados en la estimación de caudales, estadísticamente, el que mejores resultados ha arrojado para las cuencas colombianas es el de Williams y Hann y en menor proporción, el hidrograma sintético del SCS se ha comportado de manera satisfactoria. No obstante, lo anterior no quiere decir que los demás modelos sean obsoletos, o que no puedan usarse para la estimación de caudales.

Finalmente, bajo el supuesto de que los modelos propuestos por Williams y Hann y por el SCS, no sólo son los modelos que mejores resultados han tenido en las

investigaciones, sino que son los más utilizados en nuestro medio, se seleccionaron estos dos para el análisis de sensibilidad que aquí se plantea.

A continuación se hace una breve descripción de los hidrogramas unitarios sintéticos seleccionados.

2.3.1 Hidrograma unitario del U. S. Soil Conservation Service

El hidrograma unitario de las cuencas se calcula multiplicando las ordenadas y abscisas del hidrograma adimensional propuesto por el U.S. S.C.S. (Figura 2.1) por el caudal pico y el tiempo al pico de cada cuenca, empleando las siguientes expresiones:

$$Tp = \frac{D}{2} + Lag \quad (2.1)$$

$$Qp = 0,208 \frac{A}{Tp} \quad (2.2)$$

Donde:

Tp : Tiempo al pico, en horas.

D : Duración unitaria de la lluvia, en horas.

Lag : Tiempo de retraso de la cuenca, en horas.

A : Área de la cuenca, en km^2 .

Qp : Caudal pico en $m^3/s/mm$.

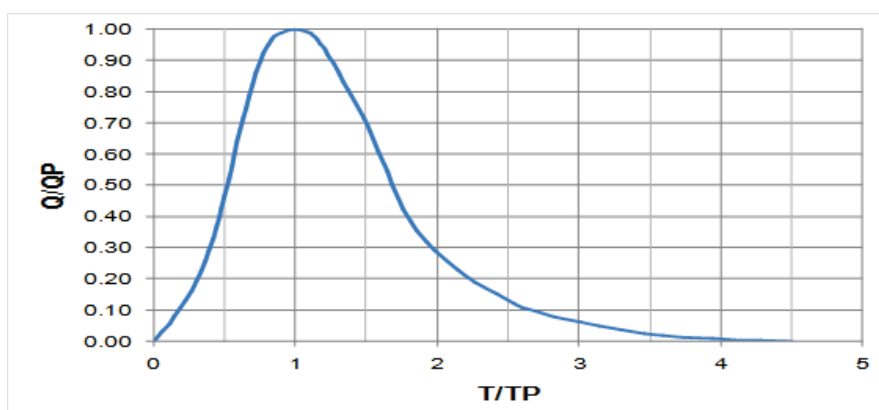


Figura 2.1 Hidrograma Unitario del U.S. S.C.S.

2.3.2 Hidrograma unitario de Williams y Hann

En este, el cálculo de las crecientes se realiza aplicando la lluvia de diseño al hidrograma unitario adimensional propuesto por Williams y Hann (Figura 2.2). Tal como se procedió con el método del U. S. Soil Conservation Service, el hidrograma unitario de la cuenca se obtuvo multiplicando las ordenadas y abscisas del hidrograma adimensional por el caudal pico y el tiempo al pico característico de cada cuenca.

Las expresiones empleadas para calcular estos parámetros son las siguientes:

$$Tp = 4,63 \cdot A^{0,422} \cdot SLP^{-0,46} \cdot \frac{L}{W}^{0,133} \quad (2.3)$$

$$K = 27 \cdot A^{0,231} \cdot SLP^{-0,777} \cdot \frac{L}{W}^{0,124} \quad (2.4)$$

$$Qp = \frac{B \cdot A \cdot R}{896,99 \cdot Tp} \quad (2.5)$$

Donde:

Tp : Tiempo al pico, en horas.

A : Área de la cuenca, en km^2 .

SLP : Relación entre la diferencia de cotas en la cuenca y la longitud del cauce principal, en pie/milla.

$\frac{L}{W}$: Relación longitud - ancho de la cuenca, equivalente a la relación entre la longitud al cuadrado y el área (L^2/A).

Qp : Caudal máximo del hidrograma unitario, en m^3/s .

R : Profundidad unitaria efectiva asociada con la hidrógrafa (1 mm).

El parámetro B empleado para el cálculo del caudal máximo es función de una constante n , la cual depende de la relación entre la constante de recesión (K) y el tiempo al pico (Tp), (Figura 2.3).

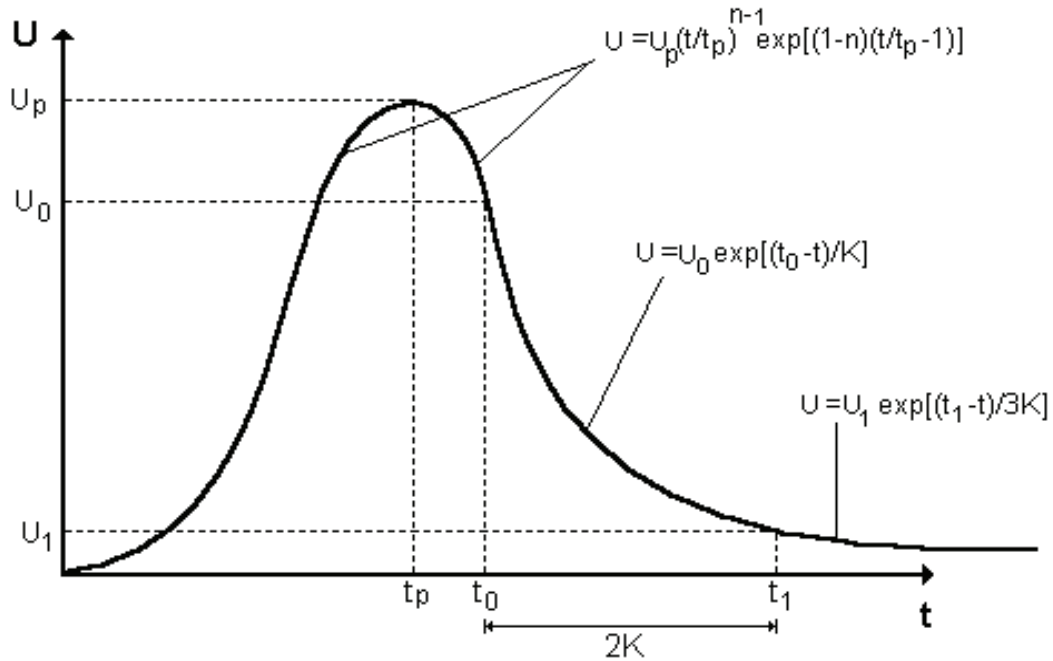


Figura 2.2 Hidrograma Unitario de Williams & Hann.

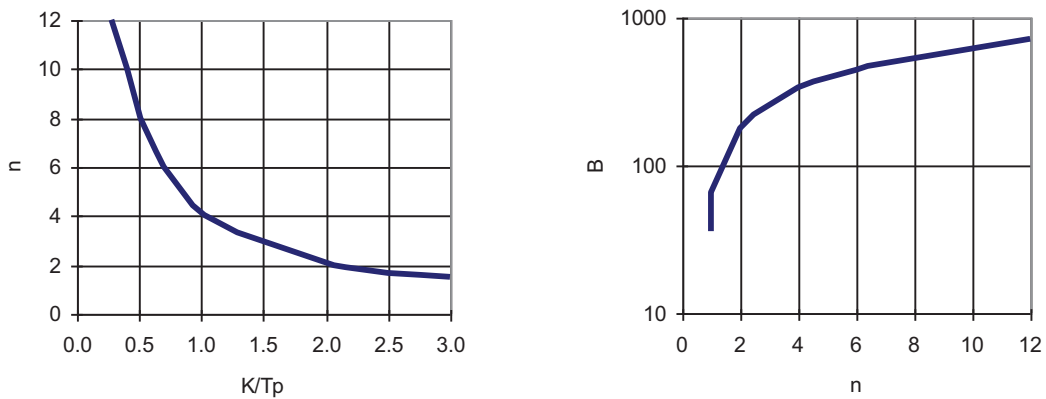


Figura 2.3 Parámetros n y B del H.U. de W & H.

Cabe anotar que el conocido método racional (Kuichling, 1888) es también un modelo lluvia escorrentía. Este modelo empírico es muy utilizado debido a su sencillez y fácil uso; no obstante, es un modelo criticado debido a que sobreestima

la lluvia producida y toma como variable un coeficiente de escorrentía que puede llegar a ser bastante impreciso, o no ser un factor altamente representativo de las condiciones del suelo. La metodología considera que el caudal es función de la intensidad de la lluvia, un coeficiente de escorrentía y el área de la cuenca.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (2.6)$$

Donde:

Q: Caudal pico, en m³/s.

C: Coeficiente adimensional de escorrentía que cuantifica las pérdidas hidrológicas y que depende del tipo de suelo y la pendiente del terreno.

I: Intensidad de precipitación, en mm/h, para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca.

A: Área de drenaje de la cuenca, en km².

El coeficiente de escorrentía (*C*) es quizás la variable que puede generar un resultado poco preciso, dado que puede presentarse cierto grado de subjetividad para la selección de dicho parámetro.

Una limitante del modelo viene relacionada con el área de la cuenca, ya que en casos de cuencas con grandes áreas, el modelo va perdiendo precisión.

3. OBJETIVOS

A continuación se describen los objetivos generales y específicos del análisis de sensibilidad desarrollado así como una explicación que justifica la selección de los parámetros seleccionados.

3.1 OBJETIVOS GENERALES

Llevar a cabo un análisis de sensibilidad de los modelos lluvia escorrentía, utilizando diferentes hidrogramas unitarios mediante variaciones de parámetros geomorfométricos y climatológicos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Hacer un análisis de sensibilidad de los modelos lluvia escorrentía definidos a partir de la utilización de los hidrogramas unitarios desarrollados por Williams y Hann y el Soil Conservation Service, variando parámetros geomorfológicos correspondientes a:

- Pendiente del cauce.
- Relación largo-ancho (L/B).

Llevar a cabo un análisis de sensibilidad del modelo lluvia escorrentía variando parámetros climatológicos correspondientes a:

- Magnitud de la lluvia.
- Distribución de la lluvia en el tiempo.
- Analizar la sensibilidad de los cambios producidos a partir de las variaciones del tiempo de concentración y el número de curva.

- Identificar cuales parámetros son los más sensibles en los modelos de las cuencas.

Los parámetros considerados en los objetivos se consideran necesarios y suficientes para llevar a cabo el estudio, ya que son los únicos involucrados en la determinación de los hidrogramas de escorrentía a partir de hidrogramas unitarios sintéticos propuestos por Williams y Hann y por el Soil Conservation Service, aplicados a unas condiciones de precipitación específicas.

4. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad planteado en los objetivos de este estudio, se desarrolló una hoja de cálculo que permite la estimación de caudales máximos utilizando los diferentes hidrogramas unitarios seleccionados y variaciones en la distribución temporal de la lluvia, como se explica más adelante.

La hoja de cálculo está desarrollada según la secuencia lógica del cálculo de caudales mediante modelos lluvia escorrentía. Como una primera fase de este proceso, se ingresan los parámetros geomorfométricos de la cuenca que corresponden al área, longitud del cauce, cotas máximas y mínimas para encontrar la pendiente longitudinal del cauce. Posteriormente, se ingresan los parámetros de abstracción hidrológica requeridos para el cálculo de la precipitación efectiva mediante la metodología propuesta por el Soil Conservation Service; tales parámetros corresponden al número de curva (CN) y la abstracción inicial del suelo (I_a), la cual corresponde a la cantidad de precipitación que no alcanza a convertirse en escorrentía directa. Acto seguido, la hoja de cálculo obtiene el tiempo de concentración de la cuenca según se explica más adelante en el Capítulo 5 y finalmente, se ingresan también los factores de reducción de la lluvia tanto en el área como en el tiempo para obtener una precipitación de diseño.

En la segunda etapa de la hoja de cálculo, se deben ingresar las precipitaciones asociadas a los períodos de retorno que se desean evaluar, con el fin de obtener la precipitación total de diseño (reducida en el área y en el tiempo) y posteriormente la precipitación efectiva mediante los parámetros de abstracción hidrológica mencionados anteriormente.

La última y quizás la más compleja de las fases, corresponde a las convoluciones de los dos métodos de hidrogramas unitarios sintéticos evaluados con las

precipitaciones efectivas, necesarias para obtener los caudales de diseño asociados a diferentes períodos de retorno. La hoja de cálculo en resumen realiza la transformación de la lluvia en caudal de escorrentía mediante los modelos propuestos por el SCS y por Williams y Hann, con base en tres metodologías distintas para la distribución de la lluvia en el tiempo: por medio de una distribución uniforme y según las distribuciones empleadas por Huff para el primer y segundo cuartil correspondientes al 50% de probabilidad (SCS, 1985).

5. DESARROLLO

La respuesta hidrológica de una cuenca cualquiera está fuertemente condicionada por un gran número de parámetros; algunos de ellos son de carácter morfométrico, es decir, consideran la forma de la cuenca y su relieve; el tipo y uso del suelo; la pendiente y la geología.

Por otro lado, se encuentran los parámetros hidrológicos, donde se hallan todos aquellos factores que inciden, directa o indirectamente, en el caudal de escorrentía. Entre estos factores pueden resaltarse los parámetros de abstracción hidrológica como lo son el número de curva (CN), el coeficiente de escorrentía (C) y la abstracción inicial (I_a).

5.1 CUENCAS ANALIZADAS

El factor de forma es un parámetro morfométrico de la cuenca que, comúnmente, no se tiene en cuenta para la estimación de caudales mediante modelos lluvia escorrentía. Tal condición puede deberse a que dichos modelos no consideran directamente la forma que pueda tener la cuenca. Si bien se considera el tiempo de concentración, que es a su vez función de la pendiente y el área de la cuenca, se omite el análisis de la forma que tiene la cuenca. Cabe anotar que nunca se corre con la suerte de encontrar una cuenca redonda en su totalidad, o una cuenca de forma cuadrada o estrictamente rectangular; pero aun así, vale la pena tener en cuenta su forma y ver cómo es su respuesta hidrológica según el valor de K_f .

El factor de forma K_f (Monsalve, 1999), es la relación que existe entre el ancho medio de la cuenca y la longitud del cauce principal de la misma. Así, una manera

de obtener el ancho medio puede ser dividiendo el área de la cuenca por la longitud del cauce principal.

$$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (5.1)$$

Donde:

K_f : Factor de forma, adimensional.

B : Ancho medio de la cuenca, en km.

L : Longitud del cauce principal, en km.

A : Área de la cuenca, en km².

El tiempo de concentración es quizás uno de los parámetros más delicados para la estimación de caudales ya que condiciona en gran parte la respuesta hidrológica de la cuenca. Si se analizan dos cuencas cuyas áreas sean iguales, pero que tienen diferentes tiempos de concentración, se obtendrán mayores caudales en aquella cuyo parámetro sea menor. De otro lado, puede inferirse que el tiempo de concentración de una cuenca es función de la pendiente del cauce principal.

Debido a la importancia del tiempo de concentración y de la forma de la cuenca en la estimación de caudales, el análisis de sensibilidad planteado contempla tres tipos de pendiente, definidas de tal manera que se representen las condiciones de zonas de alta, moderada y baja pendiente. Adicionalmente, se concibieron tres subgrupos de cuencas asociados, cada uno compuesto por tres cuencas de igual área, pero diferentes factores de forma.

Vale la pena mencionar que en el desarrollo de este proyecto se considera un valor constante para el área de las cuencas analizadas, definido de manera arbitraria con un valor de 10 km². Esta consideración se realizó bajo la premisa de que los caudales de escorrentía generados en una cuenca son directamente proporcionales al área de la misma, razón por la cual los análisis de sensibilidad se enfocaron sobre otros parámetros de mayor influencia y la respuesta a la

generación de caudales en cuencas de diferentes áreas se comportarían de manera similar independiente de su magnitud.

Para un mejor entendimiento de la situación que se desea modelar, se presenta la Tabla 5.1 con los parámetros que definen los tres grupos mencionados y sus respectivos subgrupos.

Tabla 5.1 Parámetros iniciales y grupos de cuencas.

Grupo	Cuenca	K_f	Ancho (m)	Longitud (m)	Area (km ²)	Pendiente (%)
A	1A	0,10	1.000	10.000	10	2
	2A	0,40	2.000	5.000	10	2
	3A	1,00	3.160	3.160	10	2
B	1B	0,10	1.000	10.000	10	15
	2B	0,40	2.000	5.000	10	15
	3B	1,00	3.160	3.160	10	15
C	1C	0,10	1.000	10.000	10	30
	2C	0,40	2.000	5.000	10	30
	3C	1,00	3.160	3.160	10	30

Fuente: Elaboración propia.

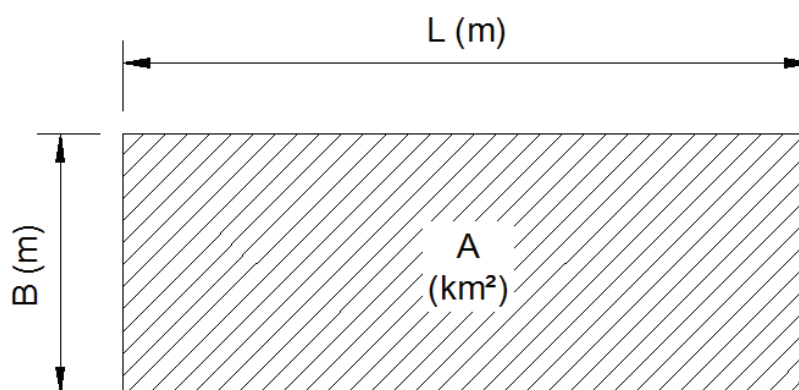


Figura 5.1 Dimensiones de las cuencas.

5.2 VALIDACIÓN DE LAS CUENCAS SEGÚN LA LEY DE HACK

Hack (Hack, 1957) encontró una función que relaciona la longitud del canal principal de una cuenca con el área de la misma de la siguiente forma:

$$L = C * A^h \quad (5.2)$$

Donde:

L: Longitud del cauce (millas).

A: Área de la cuenca (millas cuadradas).

C, h: Coeficientes obtenidos de la regresión.

Los experimentos realizados por Hack dieron como resultado que el exponente “h” es cercano a 0,6 para las cuencas estudiadas y decrece a medida que se tienen cuencas de forma alargada. Esta ecuación muestra que las cuencas no son similares en forma y que a medida que el área aumenta, se presenta una tendencia al alargamiento en cuencas grandes.

Debido a que las cuencas seleccionadas en este estudio son supuestas y ficticias, se debe garantizar que tanto el área como las longitudes seleccionadas cumplan con unas condiciones mínimas de escalamiento. Lo anterior con la intención de que los resultados obtenidos sean adecuados y acordes con una cuenca real.

Así pues, se hizo un análisis similar al de Hack pero esta vez utilizando veintidós (22) cuencas colombianas localizadas en las estribaciones de la serranía del Perijá y en la Sierra Nevada de Santa Marta. Adicionalmente, se incluyeron las tres cuencas supuestas en este proyecto correspondientes a: (i) cuenca alargada, (ii) cuenca semialargada y (iii) cuenca cuadrada. Todas las anteriores con un área igual a 10 km² (Ver Figura 5.2).

Se realizó un análisis de tendencia para determinar el ajuste con intervalos de confianza del 95% donde se encontró una ecuación con un coeficiente de ajuste R² bastante alto que ratifica la relación propuesta por Hack, aunque con un valor

menor para el exponente. Cabe anotar que en ajustes que implican fenómenos naturales como en este caso y aún más cuando se tienen poblaciones pequeñas para representar cierto fenómeno, es poco probable encontrar coeficientes de correlación cercanos a la unidad, debido a la gran dispersión de los datos y a la variabilidad de la formación de una cuenca, la cual está altamente limitada por fenómenos geológicos, climáticos, hidrológicos, entre otros. A continuación se muestra la Figura 5.2 con el ajuste encontrado:

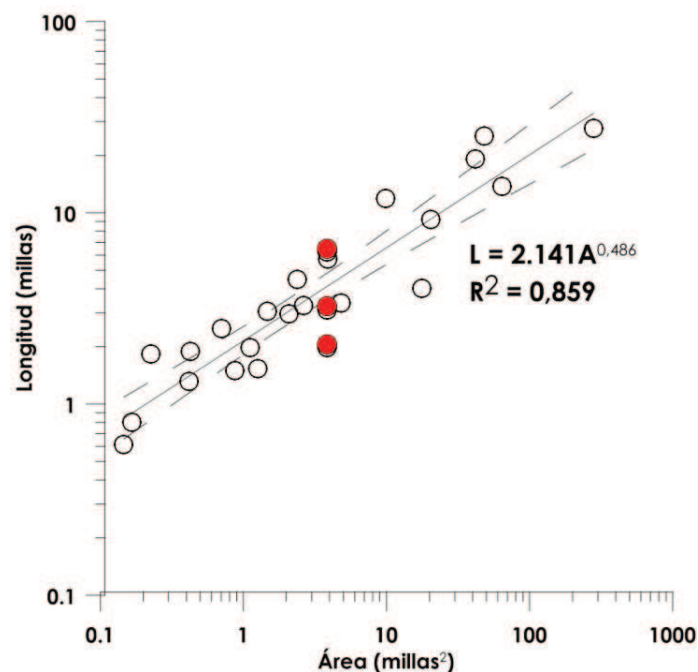


Figura 5.2 Ajuste para intervalos de confianza del 95%.

5.3 CRITERIOS Y CONSIDERACIONES

Para realizar el análisis de sensibilidad, se vio la necesidad de hacer algunas consideraciones respecto a las variables o parámetros que se deben considerar en los modelos. A continuación se mencionan los modelos lluvia escorrentía seleccionados y los valores de los parámetros correspondientes a cada modelo.

Es importante mencionar que este estudio no describe de ninguna manera un proceso para la estimación de caudales, ni pretende concluir cuál es la mejor metodología para hacer tal estimación; el objetivo es, en cambio, observar la variación de los caudales en los modelos lluvia escorrentía, limitados a la utilización de los dos hidrogramas mencionados anteriormente.

5.3.1 Hidrogramas unitarios sintéticos

El enfoque propuesto para realizar el análisis de sensibilidad, con respecto a los métodos de transformación de los modelos lluvia escorrentía, está sustentado en el Capítulo 2 de este documento, donde se hace referencia a los estudios realizados sobre estas dos metodologías y que soportan y dan validez a la selección de los hidrogramas sintéticos propuestos por Williams y Hann y del Soil Conservation Service (SCS). Adicionalmente, se seleccionaron estos dos hidrogramas unitarios sintéticos debido a su gran utilización en la empresa INTEGRAL S.A. para la determinación de caudales de diseño de diferentes obras soportados y validados por años de experiencia, que a través del tiempo han demostrado su confiabilidad en el diseño hidrológico de cuencas colombianas, ya que finalmente, el resultado de estos estudios está enfocado en la optimización de las estimaciones que se realizan actualmente en dicha empresa.

5.3.2 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (T_c) es función de la geomorfometría de la cuenca y para su estimación se utilizaron diversas metodologías y finalmente se obtuvo el promedio de ellas. Los métodos seleccionados para hallar el tiempo de concentración correspondieron a: Kirpich (1990), Ventura, Giandotti (1990), U.S.A.C.E, Bransby (en Pilgrim y Cordery, 1993) y Chow (1962), (Smith, 1997).

Es necesario resaltar que para este parámetro no se hace un análisis de sensibilidad de manera directa. Lo anterior se debe básicamente, a que el tiempo

de concentración es un parámetro que viene definido implícitamente de acuerdo con las características morfométricas de las cuencas.

Tabla 5.2 Tiempos de concentración utilizados en el análisis.

Grupo	Cuenca	S (%)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (min)						
			KIRPICH	VENTURA	GIANDOTTI	U.S.C.E.	BRANSBY	CHOW	PROM.
A	1A	2	104,5	210,8	146,6	152,8	255,2	188,1	176,3
	2A	2	61,3	125,3	151,1	90,2	127,6	120,7	112,7
	3A	2	43,0	88,8	164,1	63,7	80,7	90,0	88,4
B	1B	15	48,4	144,5	53,5	104,2	170,6	98,7	103,3
	2B	15	28,4	85,9	55,2	61,5	85,3	63,4	63,3
	3B	15	19,9	60,9	59,9	43,4	53,9	47,2	47,5
C	1C	30	37,1	126,9	37,9	91,3	148,5	79,1	86,8
	2C	30	21,8	75,4	39,0	53,9	74,3	50,7	52,5
	3C	30	15,3	53,5	42,4	38,0	46,9	37,8	39,0

Fuente: Elaboración propia

Nota: S corresponde a la pendiente longitudinal del cauce.

5.3.3 Número de curva (CN)

La metodología del número de curva constituye una de las herramientas de mayor uso en el proceso de estimación de caudales mediante modelos lluvia escorrentía. La obtención de este parámetro puede depender de varios factores y según el buen uso de estos, esta variable será más o menos acertada. Normalmente se hace un estudio de los usos del suelo de la cuenca para definir su valor; también es común hallar este valor mediante el procesamiento de imágenes satelitales, que facilite la diferenciación de los diferentes tipos de cobertura presentes en el área de estudio.

El valor asignado para el número de curva depende de varios factores tales como:

- Usos del suelo.
- Pendiente del terreno.

- Condición hidrológica del suelo (Pobre o buena).
- Tratamiento superficial al que ha sido sometido el suelo.
- Grupo hidrológico del suelo y humedad antecedente.

El valor definido para la condición inicial del número de curva fue de 90. Aquí es importante mencionar que, dada la condición de análisis de sensibilidad aquí propuesta, es indiferente el valor que tome el número de curva debido a que no existe interés en encontrar el caudal correspondiente a un número de curva en específico, sino evaluar la sensibilidad de los modelos ante el cambio de este parámetro en un rango aplicable a los tipos de suelos encontrados en nuestro medio. Así pues, un valor de CN igual a 90 es propio de tierras cultivadas sin tratamientos de conservación, de pastizales con condiciones pobres y de distritos industriales y residenciales característicos de suelos relativamente impermeables (CHOW., 1994). Por otro lado, se definió un valor mínimo para el CN de 70, correspondiente a cuencas con buenas coberturas de bosques, cultivos o pastizales.

5.3.4 Factores de reducción en el área y en el tiempo

La lluvia máxima diaria estimada para cada periodo de retorno, a partir de un análisis de frecuencia, es necesario reducirla en el tiempo y en el área, esto con el fin de considerar el efecto de no simultaneidad de la precipitación en toda la cuenca.

Para el caso de la reducción de la precipitación en el área, es de destacar que, según estudios realizados en varias cuencas del mundo, este factor es aplicable a cuencas con áreas de drenaje mayores a 25 km² (ver Figura 5.3, Wiesner, 1970). Debido a que las cuencas supuestas son de 10 km², dicho factor de reducción es muy cercano a la unidad lo que indica que la reducción de la lluvia en el área para las cuencas evaluadas en el proyecto no es relevante. Por tal motivo no existirá

reducción de la lluvia debido a la distribución espacial de la misma para las cuencas evaluadas.

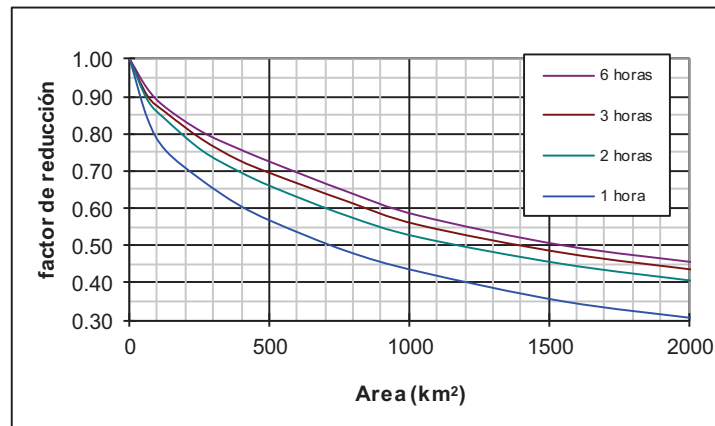


Figura 5.3 Factores de reducción de la lluvia en el área.

Por otro lado, como los datos de lluvias máximas utilizados en los modelos lluvia escorrentía generalmente provienen de una serie de registros de precipitaciones máximas de 24 horas de duración, principalmente por la forma de captura de los datos, ésta se debe reducir en el tiempo debido a que los tiempos de concentración de las nueve cuencas evaluadas son menores a un día. La reducción anterior se debe básicamente a que el tiempo de concentración es el más crítico para la estimación de caudales y duraciones de lluvia superiores a este no generan un aumento significativo en el caudal pico de la hidrógrafa.

En el caso del factor de reducción en el tiempo se utilizó una relación propuesta por INTEGRAL S.A., que ha sido deducida a través de una gran cantidad de información de precipitaciones en varias zonas del país y su estimación se realiza en función del tiempo de concentración de la cuenca, por medio de una ecuación de regionalización del siguiente tipo:

$$F_t = \frac{Pd}{P_{24h}} = a + b \cdot \ln(Tc) \quad (5.2)$$

Donde:

F_t : Factor de reducción en el tiempo, adimensional.

P_d : Precipitación para una lluvia con duración igual al tiempo de concentración, en mm.

P_{24h} : Precipitación máxima de 24 horas de duración, en mm.

T_c : Tiempo de concentración de la cuenca, en min.

a, b : Coeficientes de la ecuación de regionalización.

En la Tabla 5.3 se presentan los valores deducidos para los factores de reducción mencionados, en las cuencas de interés.

Tabla 5.3 Factores de reducción en el área y en el tiempo.

Grupo	Cuenca	FACTORES DE REDUCCIÓN	
		En el área	En el tiempo
A	1A	1,00	0,78
	2A	1,00	0,70
	3A	1,00	0,66
B	1B	1,00	0,69
	2B	1,00	0,61
	3B	1,00	0,56
C	1C	1,00	0,66
	2C	1,00	0,57
	3C	1,00	0,52

Fuente: Elaboración propia.

5.3.5 Precipitación

Los valores de precipitación fueron tomados a partir de un análisis de frecuencia de lluvias con información real. Tal información hace parte de un estudio hidrológico realizado por INTEGRAL S.A en el Departamento de La Guajira. Lo anterior es importante debido a que las precipitaciones para diferentes periodos de retorno tienen un valor real que finalmente se verá reflejado en los correctos resultados del análisis de sensibilidad.

La Figura 5.4 presenta el resultado del análisis de frecuencia de precipitaciones máximas, utilizadas en las modelaciones, donde se encontró que el mejor ajuste estaba dado por una distribución Gumbel y en la Tabla 5.4 se presentan los valores de precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno.

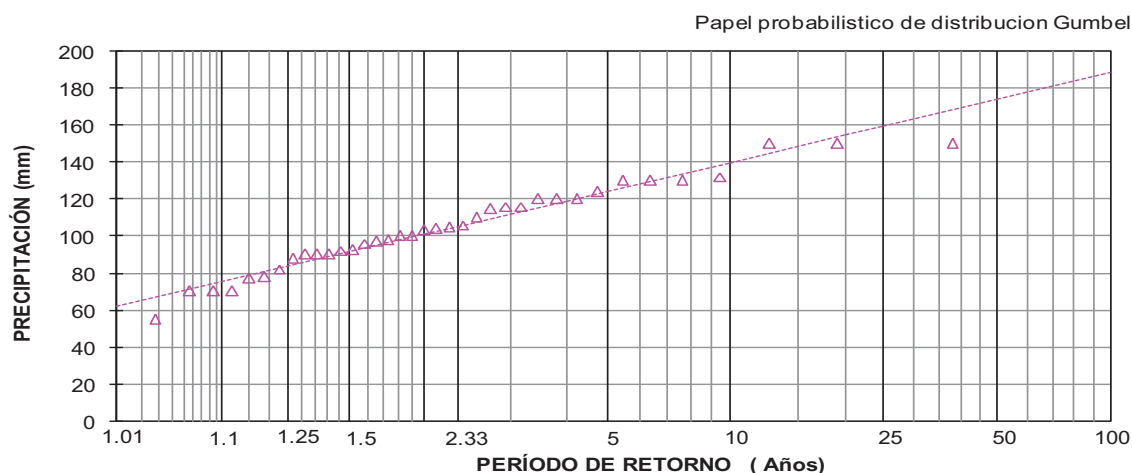


Figura 5.4 Análisis de frecuencia de precipitaciones máximas

Tabla 5.4 Precipitaciones máximas puntuales diarias

Período de retorno (Años)	2,33	5	10	25	50	100
Precipitación (mm)	107	132	149	173	190	208

Fuente: Elaboración propia.

5.3.6 Distribución de la lluvia en el tiempo

Quizás una de las herramientas más importantes en la evaluación de caudales mediante modelos lluvia escorrentía, es la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Esta herramienta es bastante útil para la estimación de caudales máximos de una cuenca pues indica la intensidad de la lluvia asociada a un período de retorno con la duración de la tormenta de diseño (generalmente esta duración es igual al tiempo de concentración).

No obstante, es común encontrar cuencas en Colombia que no tienen registros pluviográficos que definen la IDF propia de la cuenca. En estos casos es posible

recurrir a métodos de regionalización o realizar un análisis de frecuencia para encontrar la lluvia correspondiente al período de retorno de interés.

Una vez que se obtiene la lluvia de diseño, se debe distribuir esta en el tiempo (hietograma de precipitaciones). En Colombia es bastante común hacer uso de la metodología basada en los diagramas de Huff (Huff, 1967), quien realizó un estudio del comportamiento temporal de la lluvia en algunas cuencas de los Estados Unidos. No obstante, debido a la condición de trópico, característica esencial de las cuencas colombianas, la distribución de la lluvia en el tiempo tiene un comportamiento diferente al que encontró Huff para su país. Ante la situación anterior, se han desarrollado procedimientos que permiten obtener la distribución de la lluvia en el tiempo siempre y cuando se cuente con estaciones pluviográficas en la zona de estudio.

Huff planteó cuatro distribuciones divididas en cuartiles, desde el primer cuartil hasta el cuarto, donde los de mayor utilización corresponden a los del 50 % de probabilidad de ocurrencia. Huff encontró que las distribuciones del primer y segundo cuartil (Figura 5.5) se presentaban con mayor frecuencia y que la aplicación del tercer cuartil ocurría en lluvias con duraciones moderadas (12 a 24 horas), mientras que las lluvias de larga duración (más de 24 horas), se relacionaban con el cuarto cuartil (Huff, 1967).

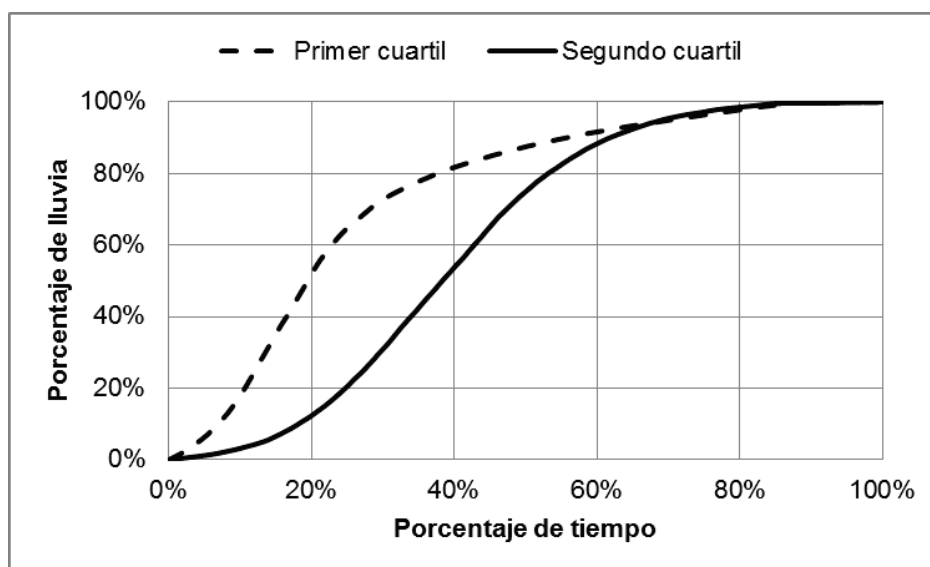


Figura 5.5 Distribución de la lluvia en el tiempo según el primer y segundo cuartil de Huff para el 50 % de probabilidad.

Ahora, analizando la distribución temporal de lluvias en Colombia, podría decirse que las duraciones de las mismas son inferiores a 12 horas. En el documento “Hidrología de Antioquia” (Smith, 1997), se obtuvieron 69 diagramas de distribución de la lluvia en el tiempo a partir de curvas IDF obtenidas de estaciones pluviográficas. En cada una de las IDF se observa que las curvas empiezan adquirir un comportamiento asintótico aproximadamente a los 100 minutos de lluvia, lo que indica que duraciones de lluvia mayores tendrían valores de intensidad relativamente bajos.

Lo anterior justifica la poca utilización del tercer y cuarto cuartil de Huff en cuencas colombianas, por lo que en este estudio sólo se consideraron el primer y el segundo cuartil para el análisis de sensibilidad.

5.3.7 Caudales evaluados

En el análisis planteado se evaluaron los cambios que se producen en los caudales asociados a 2,33 y 100 años de periodo de retorno. Lo anterior con el fin

de conocer la variación que existe entre los caudales obtenidos mediante las hidrógrafas unitarias de Williams y Hann y del Soil Conservation Service, lo que finalmente servirá para reconocer la sensibilidad de las dos metodologías a la variación de los parámetros.

La razón por la cual se seleccionaron los caudales de 2,33 y 100 años de período de retorno obedece básicamente a que el primero de ellos es un caudal altamente representativo de una cuenca cualquiera y algunos estudios demuestran que el caudal de banca llena, es decir, aquel que normalmente forma el cauce o lecho de un río, se encuentra entre 1,1 y 2,33 años de período de retorno. Otras investigaciones indican que el caudal de 2,33 años de período de retorno corresponde a la media de los caudales máximos instantáneos de un río. El segundo de ellos (100 años) es un caudal bastante utilizado para el diseño de obras de gran importancia como lo son los puentes, presas pequeñas (baja amenaza), aeropuertos de gran volumen y alcantarillas de carreteras con volúmenes de tráfico alto (Chow, 1994).

6. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad para cada una de las cuencas que componen el modelo.

6.1 CONDICIONES INICIALES

La primera fase del análisis de sensibilidad, se basó en identificar el comportamiento o característica de los caudales resultantes de las dos metodologías. Como un primer acercamiento a este problema, se notó que hay un alto grado de dispersión en los caudales estimados mediante la metodología de Williams y Hann. Caso contrario ocurre con los caudales estimados a partir del método propuesto por el Soil Conservation Service, donde la dispersión es mínima y se observa una tendencia que permite llevar la respuesta hidrológica a una ecuación logarítmica donde el caudal es función del tiempo de concentración.

Tabla 6.1 Condición inicial de caudales para los dos métodos.

Cuenca	Kf	Base (m)	Long. (m)	Área (km ²)	S* (%)	Tc (min)	CAUDAL (m ³ /s)			
							2,33 (SCS)	2,33 (W&H)	100 (SCS)	100 (W&H)
1A	0,10	1.000	10.000	10	2	176	51	50	119	115
2A	0,40	2.000	5.000	10	2	113	69	55	165	130
3A	1,00	3.160	3.160	10	2	88	81	58	195	139
1B	0,10	1.000	10.000	10	15	103	74	120	175	282
2B	0,40	2.000	5.000	10	15	63	100	140	244	339
3B	1,00	3.160	3.160	10	15	48	117	148	292	367
1C	0,10	1.000	10.000	10	30	87	82	147	197	346
2C	0,40	2.000	5.000	10	30	53	111	178	275	429
3C	1,00	3.160	3.160	10	30	39	130	191	329	473

Fuente: Elaboración propia

* **Nota:** S corresponde a la pendiente longitudinal del cauce y Long a la longitud del cauce principal.

La Tabla 6.2 representa la variación porcentual de los caudales estimados por la metodología de Soil Conservation Service respecto a los estimados por el método de Williams y Hann. En consecuencia, se observa que para pendientes bajas las dos metodologías conservan cierta similitud en los caudales y que para las cuencas del grupo A los caudales del Soil Conservation Service son más altos que los de Williams y Hann. No obstante, esta tendencia disminuye a medida que las pendientes de las cuencas van alcanzando un mayor valor. Así mismo, se observa que la variación más fuerte corresponde a las cuencas del grupo C. Por ejemplo, el caudal de 2,33 años para la cuenca 1C obtenido mediante la metodología de Williams y Hann, es variable en un 79,2 % respecto al caudal de Soil Conservation Service para la misma cuenca (cuenca alargada $K_f = 0,1$). Visto de otra manera, los caudales de 2,33 años estimados a partir del método del SCS son un 79,2% menores que los caudales estimados a partir de Williams y Hann para la misma cuenca.

Tabla 6.2 Variación entre los caudales de 2,33 y 100 años para los dos métodos.

Grupo	Cuenca	SCS / W&H	
		Q _{2,33} (%)	Q ₁₀₀ (%)
A	1A	2,7	3,2
	2A	20,9	21,3
	3A	29,0	28,7
B	1B	-63,6	-60,9
	2B	-40,0	-39,1
	3B	-25,9	-25,8
C	1C	-79,1	-75,0
	2C	-59,7	-56,0
	3C	-46,4	-43,8

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se observa que la variación porcentual que existe entre los caudales de 2,33 años para las dos metodologías, es bastante similar a la variación existente para los caudales de 100 años de período de retorno. Como

consecuencia de ello, se mostrarán las gráficas y sus respectivos análisis sólo para los caudales de 100 años debido a que el análisis para demás caudales, será exactamente el mismo.

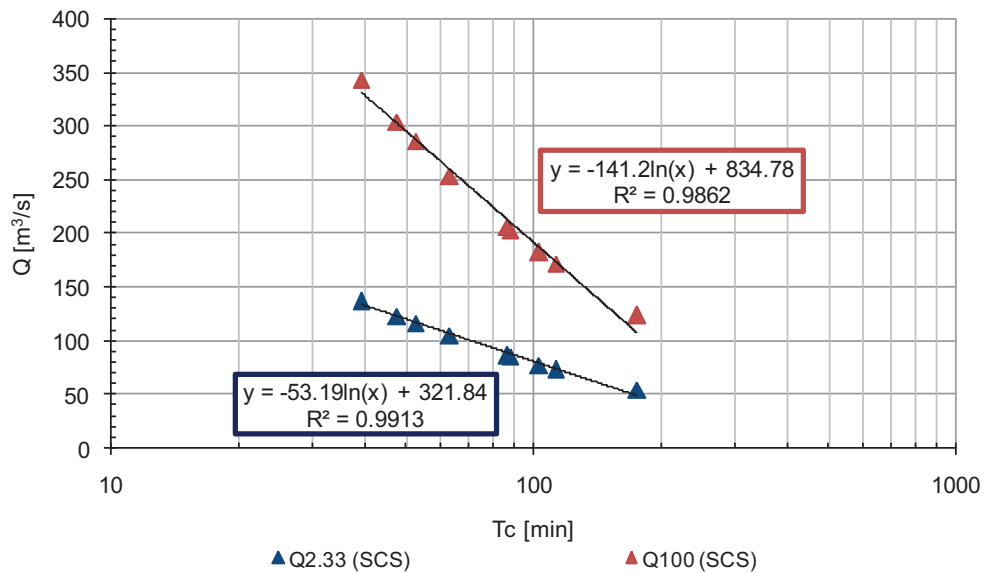


Figura 6.1 Condición inicial de caudales por el método del SCS.

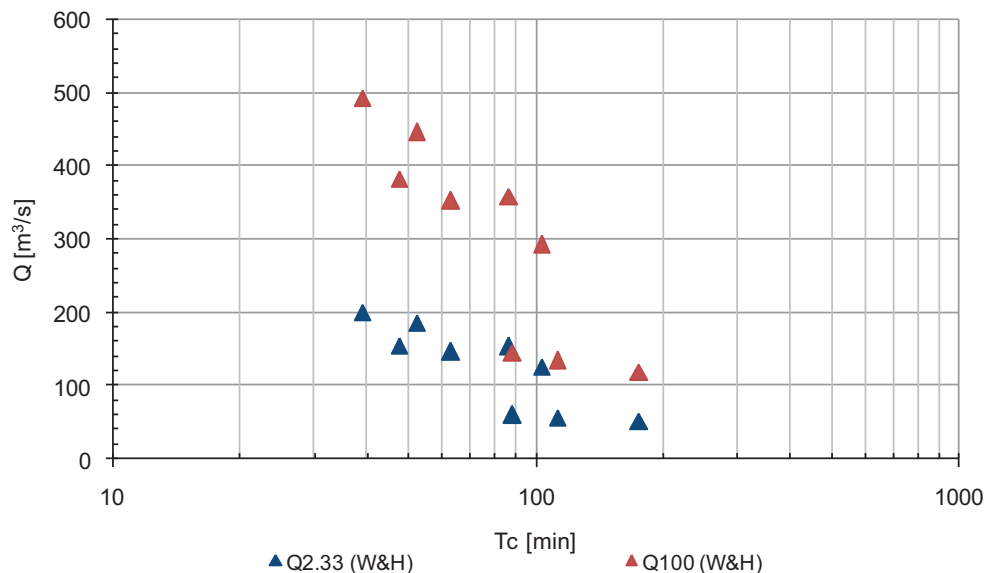


Figura 6.2 Condición inicial de caudales por el método de W&H.

6.2 NÚMERO DE CURVA (CN)

La primera variación del análisis de sensibilidad se realizó con el número de curva y se llevó a cabo mediante una disminución del valor correspondiente a la condición inicial (CN=90) a un valor de CN=70. Como era de esperarse, una disminución del número de curva significa una disminución en los caudales para todos los tipos de cuenca; pero un aspecto importante a considerar es que la variación de los caudales se hace más notoria, es decir, la respuesta hidrológica es más sensible en tanto el número de curva aumenta.

Tabla 6.3 Caudales iniciales y caudales variando el número de curva

Grupo	Cuenca	CONDICION INICIAL (CN = 90)		CN = 70	
		Q (SCS) (m ³ /s)	Q (W&H) (m ³ /s)	Q (SCS) (m ³ /s)	Q (W&H) (m ³ /s)
A	1A	123	120	74	72
	2A	171	134	97	78
	3A	202	144	111	80
B	1B	182	292	102	173
	2B	253	352	132	190
	3B	304	382	151	196
C	1C	205	359	112	211
	2C	285	445	144	235
	3C	342	492	164	240

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.4 Cambio de caudales respecto a la condición inicial (CN=90 vs. CN=70)

Grupo	Cuenca	$Q_{CN(90)} / Q_{CN(70)} (\%)*$	
		SCS	W&H
A	1A	40,2	39,6
	2A	43,2	42,3
	3A	45,1	44,7
B	1B	43,9	41,0
	2B	47,9	46,1
	3B	50,3	48,8
C	1C	45,2	41,2
	2C	49,4	47,3
	3C	52,2	51,2

Fuente: Elaboración propia

* **Nota:** Variación porcentual entre los caudales correspondientes a la condición inicial de CN (90) y los obtenidos con la reducción del número de curva a un valor de 70.

En la Figura 6.3 y en la Figura 6.4, se puede ver claramente que la pendiente de la curva es más alta para la condición inicial lo que indica que un aumento leve en el tiempo de concentración de la cuenca afectará en mayor grado el caudal correspondiente. Caso contrario ocurre en la medida que se disminuye el CN.

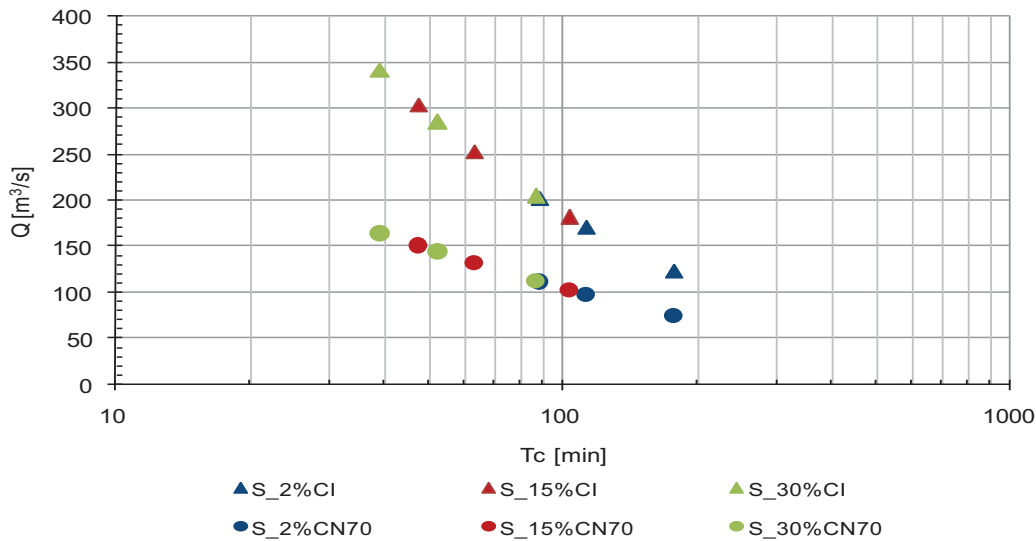


Figura 6.3 Variación del CN y caudales por el método del SCS.

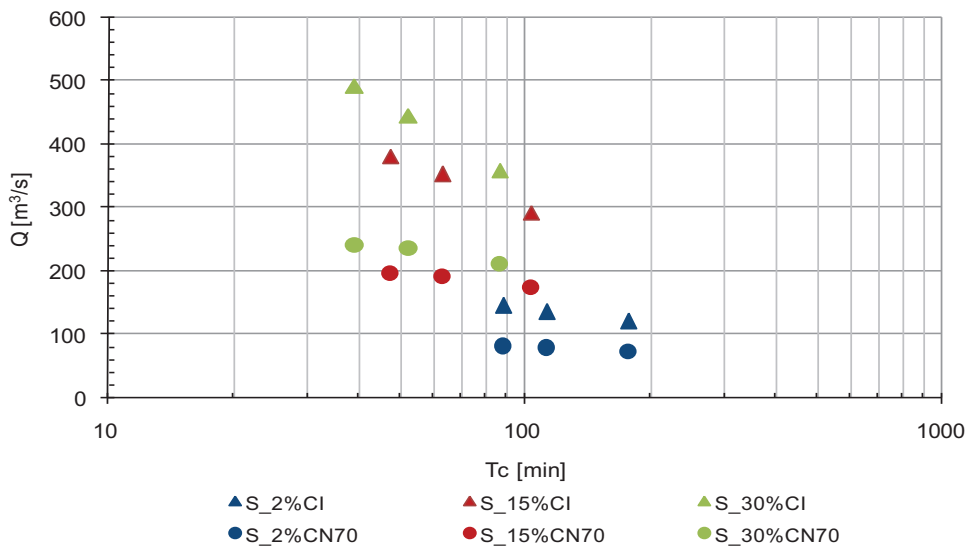


Figura 6.4 Variación del CN y caudales por el método de W&H.

6.3 PRECIPITACIÓN

Como se mencionó anteriormente, los datos de lluvia para el análisis provienen de un estudio hidrológico realizado por INTEGRAL S.A.

En lo que corresponde a esta etapa del análisis de sensibilidad, resultó el interés de identificar la variación o el efecto en los caudales debido a un cambio en la precipitación. Así pues, de manera arbitraria se redujo la lluvia en 30 mm. Ante tal variación, se encontró que existe un grado de proporcionalidad en la disminución o en el aumento de la precipitación a la hora de obtener caudales por los dos métodos propuestos.

Tabla 6.5 Variación de la precipitación máxima.

Periodo de retorno (Años)	2,33	5	10	25	50	100
Precipitación (mm)	77	102	119	143	160	178

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.6 Cambio de caudales al disminuir la precipitación.

Grupo	Cuenca	$Q_{P\text{mayor}} / Q_{P\text{menor}} (\%)*$	
		SCS	W&H
A	1A	17,0	17,0
	2A	17,3	17,2
	3A	17,5	17,6
B	1B	17,4	17,0
	2B	17,8	17,6
	3B	18,1	18,1
C	1C	17,5	17,0
	2C	18,0	17,5
	3C	18,3	17,9

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Variación porcentual entre los caudales correspondientes a la condición inicial de precipitación y los obtenidos con la reducción de la precipitación máxima de 24 horas de duración.

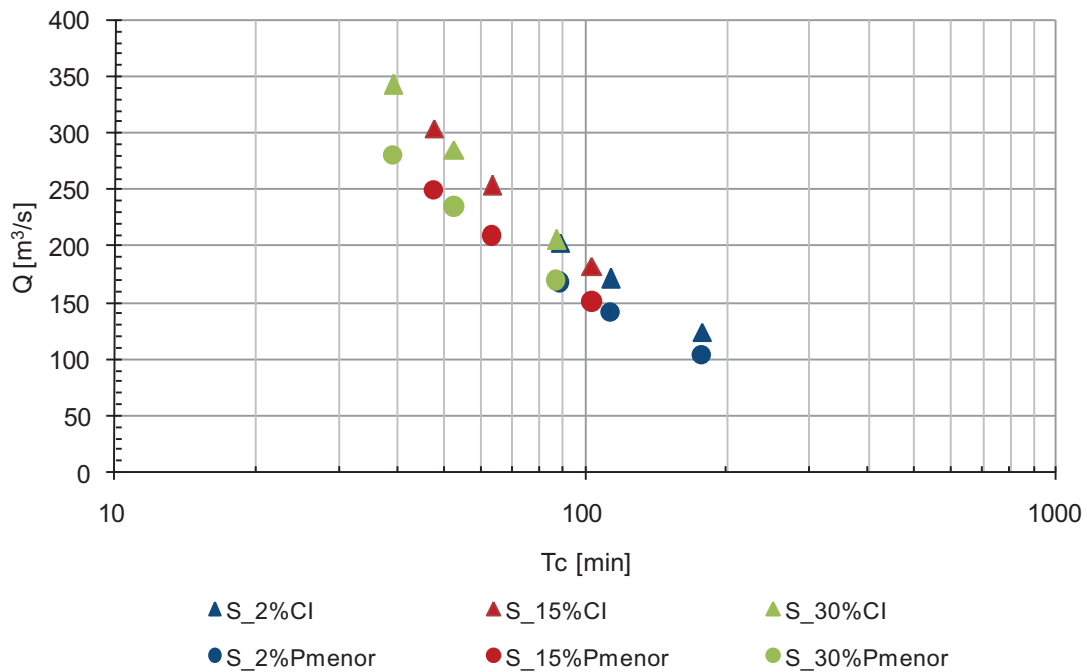


Figura 6.5 Variación de precipitación y caudales por el método de SCS.

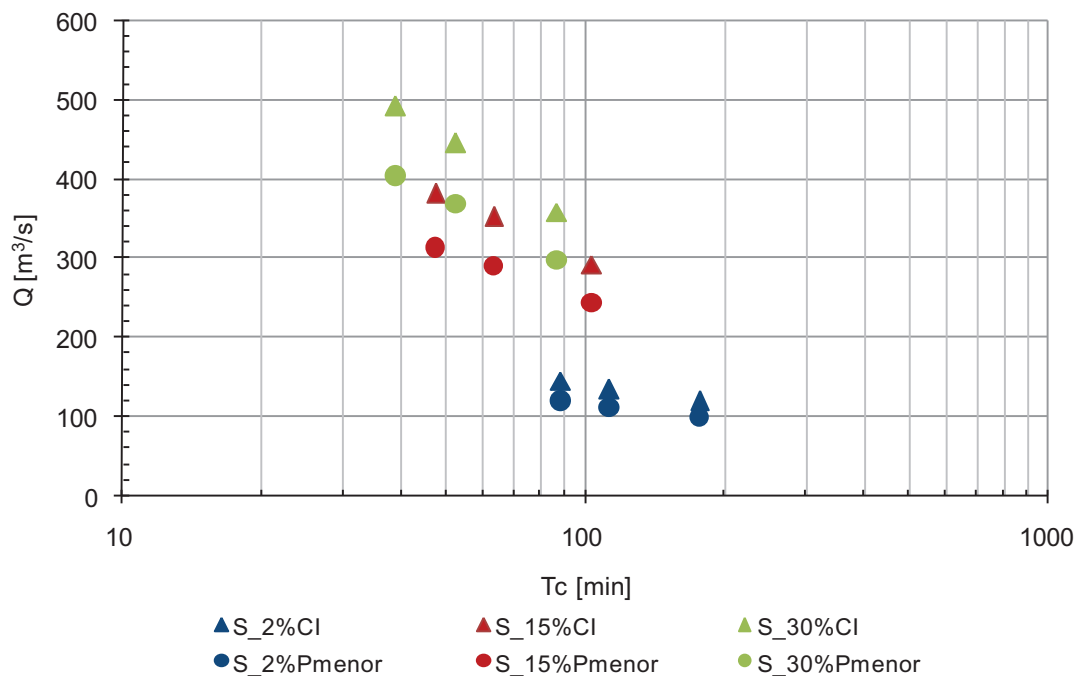


Figura 6.6 Variación de precipitación y caudales por el método de W&H.

6.4 DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA EN EL TIEMPO

La condición inicial en este caso se realizó considerando la distribución de la lluvia en el tiempo mediante el segundo cuartil de Huff con una probabilidad de ocurrencia del 50%. Esta condición se comparó asumiendo dos tipos de distribuciones, una distribución uniforme de la lluvia en el tiempo y la distribución dada por el primer cuartil de Huff para el 50 % de probabilidad.

Tabla 6.7 Variación de la distribución de la lluvia en el tiempo.

Grupo	Cuenca	CONDICIÓN INICIAL		DIST UNIFORME		PRIMER CUARTIL	
		Q SCS (m ³ /s)	Q W&H (m ³ /s)	Q SCS (m ³ /s)	Q W&H (m ³ /s)	Q SCS (m ³ /s)	Q W&H (m ³ /s)
A	1A	123	120	107	102	119	116
	2A	171	134	148	121	164	131
	3A	202	144	176	132	194	140
B	1B	182	292	158	195	174	317
	2B	253	352	221	259	243	357
	3B	304	382	265	298	291	381
C	1C	205	359	178	224	197	406
	2C	285	445	249	303	274	470
	3C	342	492	300	351	328	504

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.8 Cambio de caudales respecto a la condición inicial (Huff vs. Uniforme)

Grupo	Cuenca	Q _{2do} Cuartil / Q _{Dist. Unif} (%)*		Q _{2do} Cuartil / Q _{1er} Cuartil (%)**	
		SCS	W&H	SCS	W&H
A	1A	13,3	14,9	3,9	3,2
	2A	13,1	10,3	4,0	2,7
	3A	13,0	8,3	4,0	2,9
B	1B	13,1	33,3	4,0	-8,3
	2B	12,9	26,6	4,1	-1,2
	3B	12,7	22,1	4,1	0,1
C	1C	13,0	37,6	4,0	-13,2
	2C	12,8	31,9	4,1	-5,5
	3C	12,3	28,5	4,1	-2,4

Fuente: Elaboración propia

Nota: * Variación porcentual entre los caudales correspondientes a la condición inicial de distribución de lluvias y los obtenidos con asumiendo una distribución uniforme.

** Variación porcentual entre los caudales correspondientes a la condición inicial de distribución de lluvias y los obtenidos con asumiendo una distribución mediante el primer cuartil de Huff.

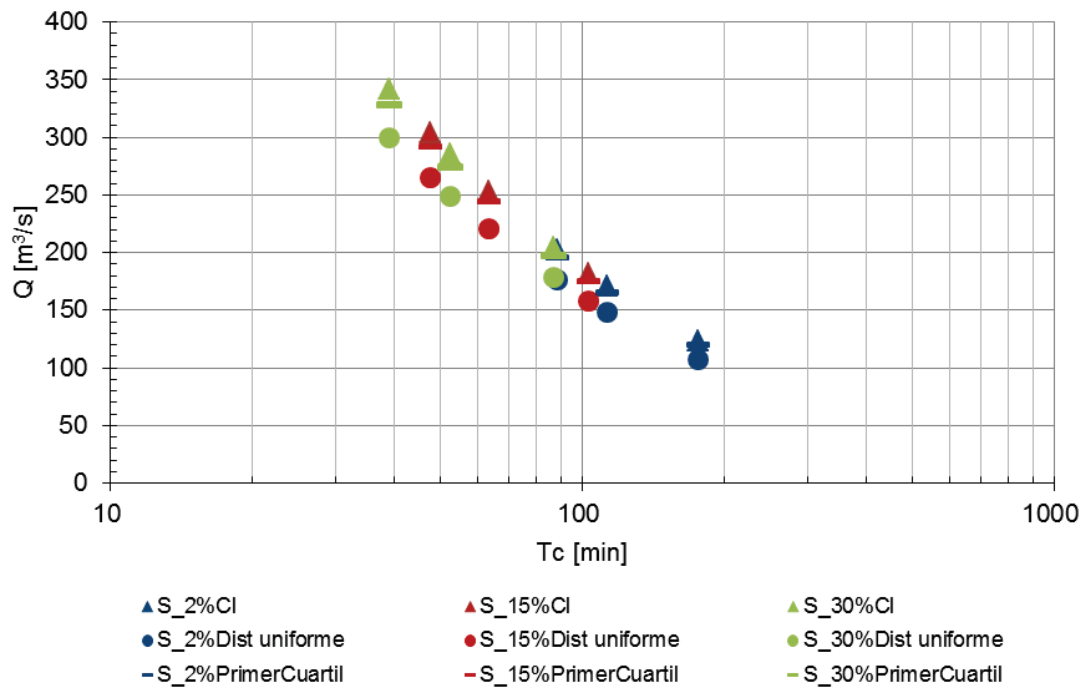


Figura 6.7 Variación de distribución de lluvia y caudales por el método del SCS.

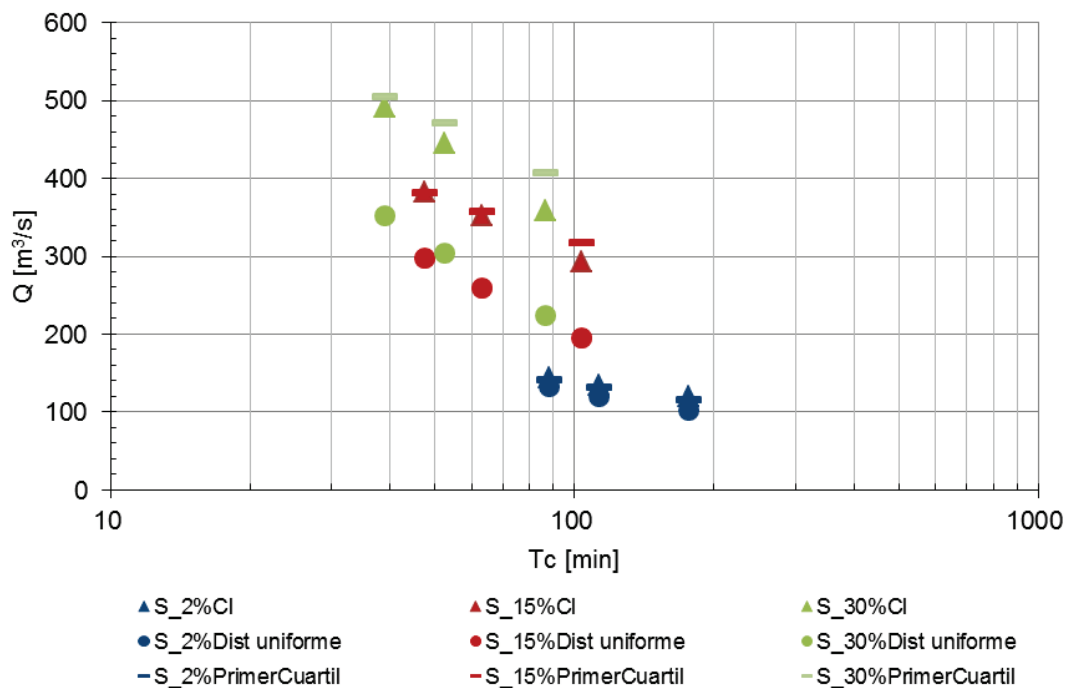


Figura 6.8 Variación de distribución de lluvia y caudales por el método de W&H.