

**ANÁLISIS DEL AJUSTE, SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE DE LOS PARÁMETROS  
DEL MODELO DEL SCS**

**PRESENTADO POR:**

**JUAN CARLOS MONROY RINCÓN**

**DIRECTOR:**

**IC, MSc. ANDRÉS VARGAS LUNA**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ DC**

**2010**



## **AGRADECIMIENTOS**

Si bien esta tesis ha requerido de gran esfuerzo y dedicación, es muy importante reconocer a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, en especial al grupo de recursos hidrológicos y al ingeniero Héctor Fabio Aristizábal director técnico ambiental de la CVC; el apoyo y suministro de la información hidrológica necesaria durante todo el proceso de estudio.

Adicionalmente, el apoyo y comprensión de todos aquellos que directa o indirectamente participaron durante el desarrollo de este trabajo como son: director de tesis, familiares y amigos; que no necesito nombrar porque tanto ellos como yo sabemos que desde lo más profundo del corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo y sin el cual no hubiera sido posible la culminación de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>1. MODELACIÓN LLUVIA – ESCORRENTÍA</b>	<b>16</b>
1.1 Generalidades del proceso	16
1.2 Modelo del SCS (Soil Conservation Service)	17
1.3 Hidrograma unitario (HU)	25
1.3.1 <i>Definición</i>	25
1.3.2 <i>Hidrograma unitario del SCS</i>	26
1.3.3 <i>Hidrograma unitario de Snyder</i>	29
1.3.4 <i>Hidrograma unitario de Clark</i>	33
1.4 Modelación avanzada	39
1.4.1 <i>Modelación de cuencas hidrográficas</i>	39
1.4.2 <i>Calibración de los modelos</i>	40
1.4.3 <i>Confiabilidad en la estimación</i>	42
<b>2. ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>44</b>
2.1 Cuenca del río Yumbo	45
2.1.1 <i>Localización</i>	45
2.1.2 <i>Características morfométricas</i>	45
2.1.3 <i>Descripción climática de la zona</i>	46
2.2 Cuenca del río Lili	54
2.2.1 <i>Localización</i>	54
2.2.2 <i>Características morfométricas</i>	55

2.2.3	<i>Descripción climática de la zona</i>	57
2.3	Cuenca del río Meléndez	64
2.3.1	<i>Localización</i>	64
2.3.2	<i>Características morfométricas</i>	65
2.3.3	<i>Descripción climática de la zona</i>	67
3.	INFORMACIÓN EMPLEADA	75
3.1	Información cartográfica	75
3.2	Información hidrológica	76
4.	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS CON LA HERRAMIENTA MCAT	84
4.1	Monte – Carlo Analysis Toolbox (MCAT)	84
4.2	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation methodology (GLUE)	86
4.3	Función objetivo	87
4.4	Análisis de Incertidumbre	88
4.5	Análisis de Sensibilidad	89
4.6	Análisis General	90
4.7	Procedimiento de análisis de los parámetros de un modelo	91
5.	MODELACIÓN AVANZADA EN LAS CUENCAS SELECCIONADAS	95
5.1	Selección de eventos	95
5.2	Condición de humedad antecedente (AMC) y tiempo de concentración (T <sub>c</sub> )	101
5.3	Combinaciones del método del SCS y los hidrogramas unitarios	104
6.	RESULTADOS OBTENIDOS	105
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	121
7.1	Ajuste de los modelos	121
7.2	Identificabilidad y sensibilidad de los parámetros	135
7.3	Incertidumbre de las estimaciones	136

<b>7.4 Valores Típicos en el diseño Hidrológico</b>	<b>138</b>
<b>7.4.1. Relación de <math>T_c</math> empírico con <math>T_c</math> medido</b>	<b>138</b>
<b>7.4.2. Relación de tiempo de rezago con tiempo de concentración ..</b>	<b>138</b>
<b>7.4.3. Evaluación de la fórmula del tiempo de rezago del SCS</b>	<b>139</b>
<b>7.4.4. Condición de humedad antecedente</b>	<b>140</b>
<b>7.4.5. Análisis de precipitación antecedente y caudal pico</b>	<b>141</b>
<b>7.4.6. Variación de los parámetros con <math>\lambda</math> constante y variable</b>	<b>144</b>
<b>7.4.7. Comparación de <math>T_c</math> registrado con <math>T_c</math> calibrado por el método de Clark</b>	<b>152</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>153</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b>	<b>155</b>
<b>10. REFERENCIAS</b>	<b>156</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>158</b>

### LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación Gráfica de la ecuación de continuidad	19
<b>Figura 2.</b> Correlación de CN para calcular el hidrograma de Precipitación de Excesos	24
<b>Figura 3.</b> Hidrograma unitario triangular del SCS	27
<b>Figura 4.</b> Hidrograma unitario curvilíneo del SCS	29
<b>Figura 5.</b> Hidrograma Unitario con un ancho de 50 y 75 % de caudal pico	32
<b>Figura 6.</b> Hidrograma Unitario de Snyder	32
<b>Figura 7.</b> Modelo conceptual del hidrograma Unitario de Clark	34
<b>Figura 8.</b> Estimación de $T_c$ y K de un hidrograma	37
<b>Figura 9.</b> Forma de la cuenca generalizada y curva sintética tiempo-área	38

<b>Figura 10.</b> Localización de las cuencas del Valle del Cauca .....	44
<b>Figura 11.</b> Plano de la cuenca del río Yumbo .....	46
<b>Figura 12.</b> Valores multianuales de precipitación total .....	48
<b>Figura 13.</b> Valores máximos en 24 horas de precipitación .....	50
<b>Figura 14.</b> Valores medios mensuales de caudal .....	52
<b>Figura 15.</b> Valores máximos mensuales de caudal .....	54
<b>Figura 16.</b> Plano de la cuenca del río Lili .....	56
<b>Figura 17.</b> Valores multianuales de precipitación total .....	58
<b>Figura 18.</b> Valores máximos en 24 horas de precipitación .....	60
<b>Figura 19.</b> Valores medios mensuales de caudal .....	62
<b>Figura 20.</b> Valores máximos mensuales de caudal .....	64
<b>Figura 21.</b> Plano de la cuenca del río Meléndez .....	66
<b>Figura 22.</b> Valores multianuales de precipitación total .....	68
<b>Figura 23.</b> Valores máximos en 24 horas de precipitación .....	70
<b>Figura 24.</b> Valores medios mensuales de caudal .....	72
<b>Figura 25.</b> Valores máximos mensuales de caudal .....	74
<b>Figura 26.</b> Comportamiento de la función objetivo para el HU del SCS .....	92
<b>Figura 27.</b> Sensibilidad de los parámetros del HU del SCS .....	93
<b>Figura 28.</b> Intervalos de confianza GLUE de los parámetros del HU del SCS .....	94
<b>Figura 29.</b> Caudal registrado y estimado mediante el HU del SCS .....	94
<b>Figura 30.</b> Selección del evento .....	97
<b>Figura 31.</b> Comportamiento de los hidrogramas de escorrentía superficial .....	98
<b>Figura 32.</b> Relación temporal entre precipitación y caudal .....	104
<b>Figura 33.</b> Estilo de gráfica resultante para la combinación 1 .....	105
<b>Figura 34.</b> Estilo de gráfica resultante para la combinación 2 .....	106
<b>Figura 35.</b> Estilo de gráfica resultante para la combinación 3 .....	107

<b>Figura 36.</b> Estilo de gráfica resultante para la combinación 4 .....	108
<b>Figura 37.</b> Estilo de gráfica resultante para la combinación 5 .....	109
<b>Figura 38.</b> Estilo de gráfica resultante para la combinación 6 .....	110
<b>Figura 39.</b> Comparación del caudal máximo para la cuenca Yumbo .....	124
<b>Figura 40.</b> Comparación del caudal máximo para la cuenca Lili .....	124
<b>Figura 41.</b> Comparación del caudal máximo para la cuenca Meléndez .....	125
<b>Figura 42.</b> Comparación del caudal máximo para la cuenca Yumbo .....	125
<b>Figura 43.</b> Comparación del caudal máximo para la cuenca Lili .....	125
<b>Figura 44.</b> Comparación del caudal máximo para la cuenca Meléndez .....	126
<b>Figura 45.</b> Relación del número de curva y la precipitación total.....	127
<b>Figura 46.</b> Análisis del ajuste de la precipitación efectiva con el método del SCS .....	128
<b>Figura 47.</b> Comparación de parámetros para el HU del SCS .....	133
<b>Figura 48.</b> Comparación de parámetros para el HU de Snyder .....	133
<b>Figura 49.</b> Comparación de parámetros para el HU de Clark .....	134
<b>Figura 50.</b> Análisis de incertidumbre para las diferentes combinaciones .....	137
<b>Figura 51.</b> Comparación del $T_c$ y $T_I$ .....	138
<b>Figura 52.</b> Comparación del $T_I$ calibrado y $T_I$ estimado por fórmula .....	139
<b>Figura 53.</b> Relación de CN con la humedad antecedente para el HU de Clark .....	140
<b>Figura 54.</b> Relación de $\lambda$ con $T_c$ .....	144
<b>Figura 55.</b> Relación de $\lambda$ con K .....	144
<b>Figura 56.</b> Relación de $\lambda$ con $C_p$ .....	145
<b>Figura 57.</b> Relación de $\lambda$ con $C_t$ .....	145
<b>Figura 58.</b> Relación de $\lambda$ con $T_I$ .....	145
<b>Figura 59.</b> Relación de $\lambda$ con CN .....	146
<b>Figura 60.</b> Relación de $\lambda$ con $T_c$ .....	146
<b>Figura 61.</b> Relación de $\lambda$ con K .....	146



<b>Figura 62.</b> Relación de $\lambda$ con $C_p$ .....	147
<b>Figura 63.</b> Relación de $\lambda$ con $C_t$ .....	147
<b>Figura 64.</b> Relación de $\lambda$ con $T_l$ .....	147
<b>Figura 65.</b> Relación de $\lambda$ con CN .....	148
<b>Figura 66.</b> Relación de $\lambda$ con $T_c$ .....	148
<b>Figura 67.</b> Relación de $\lambda$ con K .....	148
<b>Figura 68.</b> Relación de $\lambda$ con $C_p$ .....	149
<b>Figura 69.</b> Relación de $\lambda$ con $C_t$ .....	149
<b>Figura 70.</b> Relación de $\lambda$ con $T_l$ .....	149
<b>Figura 71.</b> Relación de $\lambda$ con CN .....	150
<b>Figura 72.</b> Influencia del HU en la magnitud del parámetro $\lambda$ .....	151
<b>Figura 73.</b> Comparación de $T_c$ calibrado con el HU de Clark con $T_c$ Registrado .....	152

#### LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación hidrológica de los suelos .....	21
<b>Tabla 2.</b> Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente .....	22
<b>Tabla 3.</b> Valor del número de curva para cada tipo de suelo .....	23
<b>Tabla 4.</b> Ordenadas del HU del SCS .....	29
<b>Tabla 5.</b> Características morfométricas de la cuenca hidrográfica del río Yumbo .....	45
<b>Tabla 6.</b> Valores totales mensuales de precipitación .....	47
<b>Tabla 7.</b> Valores máximos en 24 horas de precipitación .....	49
<b>Tabla 8.</b> Valores medios de caudal .....	51
<b>Tabla 9.</b> Valores máximos de caudal .....	53
<b>Tabla 10.</b> Características morfométricas de la cuenca hidrográfica del río Lili .....	55
<b>Tabla 11.</b> Valores totales mensuales de precipitación .....	57

<b>Tabla 12.</b> Valores máximos en 24 horas de precipitación .....	59
<b>Tabla 13.</b> Valores medios de caudal .....	61
<b>Tabla 14.</b> Valores máximos de caudal .....	63
<b>Tabla 15.</b> Características morfométricas de la cuenca hidrográfica del río Meléndez .....	65
<b>Tabla 16.</b> Valores totales mensuales de precipitación .....	67
<b>Tabla 17.</b> Valores máximos en 24 horas de precipitación .....	69
<b>Tabla 18.</b> Valores medios de caudal .....	71
<b>Tabla 19.</b> Valores máximos de caudal .....	73
<b>Tabla 20.</b> Relación cartográfica empleada para cada cuenca .....	76
<b>Tabla 21.</b> Eventos de la cuenca del río Yumbo .....	77
<b>Tabla 22.</b> Eventos de la cuenca del río Lili .....	78
<b>Tabla 23.</b> Eventos de la cuenca del río Meléndez .....	79
<b>Tabla 24.</b> Series de tiempo de precipitación .....	80
<b>Tabla 25.</b> Series de tiempo de caudal .....	80
<b>Tabla 26.</b> Series de tiempo de precipitación .....	81
<b>Tabla 27.</b> Series de tiempo de caudal .....	81
<b>Tabla 28.</b> Series de tiempo de precipitación .....	82
<b>Tabla 29.</b> Series de tiempo de caudal .....	83
<b>Tabla 30.</b> Combinaciones obtenidas .....	92
<b>Tabla 31.</b> Eventos de la cuenca del río Yumbo .....	99
<b>Tabla 32.</b> Eventos de la cuenca del río Lili .....	99
<b>Tabla 33.</b> Eventos de la cuenca del río Meléndez .....	100
<b>Tabla 34.</b> Tabla resumen de los eventos considerados .....	100
<b>Tabla 35.</b> Condiciones de humedad antecedente en la cuenca del río Yumbo .....	101
<b>Tabla 36.</b> Condiciones de humedad antecedente en la cuenca del río Lili .....	102
<b>Tabla 37.</b> Condiciones de humedad antecedente en la cuenca del río Meléndez .....	102
<b>Tabla 38.</b> Tiempo de concentración calculado para cada cuenca .....	103

<b>Tabla 39.</b> Escenarios para cada cuenca .....	104
<b>Tabla 40.</b> Tabla resumen del HU del SCS para la cuenca del río Yumbo .....	112
<b>Tabla 41.</b> Tabla resumen del HU del Snyder para la cuenca del río Yumbo .....	113
<b>Tabla 42.</b> Tabla resumen del HU del Clark para la cuenca del río Yumbo .....	114
<b>Tabla 43.</b> Tabla resumen del HU del SCS para la cuenca del río Lili .....	115
<b>Tabla 44.</b> Tabla resumen del HU del Snyder para la cuenca del río Lili .....	116
<b>Tabla 45.</b> Tabla resumen del HU del Clark para la cuenca del río Lili .....	117
<b>Tabla 46.</b> Tabla resumen del HU del SCS para la cuenca del río Meléndez .....	118
<b>Tabla 47.</b> Tabla resumen del HU del Snyder para la cuenca del río Meléndez .....	119
<b>Tabla 48.</b> Tabla resumen del HU del Clark para la cuenca del río Meléndez .....	120
<b>Tabla 49.</b> Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Yumbo .....	121
<b>Tabla 50.</b> Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Lili .....	122
<b>Tabla 51.</b> Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Meléndez .....	123
<b>Tabla 52.</b> Relación del número de curva recomendado por la literatura.....	127
<b>Tabla 53.</b> Rangos obtenidos para cada parámetro en cada combinación .....	129
<b>Tabla 54.</b> Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Yumbo .....	130
<b>Tabla 55.</b> Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Lili .....	131
<b>Tabla 56.</b> Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Meléndez .....	132
<b>Tabla 57.</b> Relación de la precipitación antecedente y caudal pico .....	141
<b>Tabla 58.</b> Relación de la precipitación antecedente y caudal pico .....	142
<b>Tabla 59.</b> Relación de la precipitación antecedente y caudal pico .....	143

## INTRODUCCIÓN

La presencia de desastres naturales de tipo hidrológico en el mundo, está íntimamente relacionada con el comportamiento del agua dentro de una cuenca, la cual pasa por diferentes procesos hasta que cierta porción del agua que entra a la cuenca hidrográfica gracias a la precipitación sale de ésta en forma de escorrentía superficial; por lo tanto, es de gran importancia predecir los efectos de las crecientes en las zonas que puedan afectar a la población o sus bienes.

Algunas de las problemáticas a minimizar son: inundaciones, colapso de estructuras, pérdidas humanas y materiales, etc. Un buen procedimiento en el desarrollo y/o calibración de modelos lluvia-escorrentía, garantiza buenas estimaciones de las crecientes y un mejor enfoque a las medidas preventivas que se deben tomar para evitar desastres como los anteriormente mencionados.

En Colombia, los estudios de los procesos hidrológicos que ocurren en cuencas hidrográficas son pobres, por este motivo, surge la necesidad de basar los cálculos en investigaciones realizadas por otros países.

En la estimación de escorrentía superficial se han expuesto gran variedad de hipótesis para poder encontrar un método que relacione la precipitación con la escorrentía superficial que se genera a la salida de una cuenca hidrográfica. Las suposiciones más fuertes de estos modelos consisten en relacionar sus parámetros, con los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca hidrográfica; estos modelos se han calibrado en otros lugares del mundo para establecer sus parámetros, pero el inconveniente para la aplicación de estos modelos en nuestro país, es que se han asumido los parámetros como constantes. Como consecuencia de esta generalización de los parámetros de los modelos, se sacrifica en muchos casos su precisión.

La hidrología desempeña un papel fundamental en todo lo relacionado con el manejo del agua en el mundo, y en Colombia no es la excepción. Debido a nuestra particular topografía, la cual se caracteriza por ser muy variada en relación con otros lugares del mundo, es necesario realizar las estimaciones hidrológicas lo más preciso y conciso posible.

En la hidrología aplicada es frecuente realizar estimaciones de crecientes, a partir de información de precipitación debido a que se carece de información de caudales. El método del SCS (Soil Conservation Service) es el más utilizado en nuestro país para estimar la precipitación de excesos, a partir de información de precipitación, y del tipo y uso del suelo. Alrededor del 95% de los cálculos de crecientes se realizan por medio de este método, en el que se utiliza un parámetro constante de  $\lambda = 0,2$  (Beven, 2004). A lo

que se ha llegado con la investigación realizada de este método es que el valor de  $\lambda$  no es constante, y que cambia sustancialmente en el territorio colombiano. En ese orden de ideas, no se conoce que tan preciso es este modelo y que tan sensibles e identificables son sus parámetros.

Con el fin de evaluar la sensibilidad e incertidumbre de los parámetros empleados por este modelo, en el presente trabajo se calibrará el modelo del SCS considerando sus dos parámetros y diferentes hidrogramas unitarios.

Una herramienta útil para transformar los datos de lluvia en caudal, es emplear el hidrograma unitario, este hidrograma de escorrentía superficial total es la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica ante una precipitación unitaria.

Con base en lo anterior, se pretende analizar la sensibilidad de los parámetros del método del SCS combinado con diferentes hidrogramas unitarios, para determinar la influencia de estos parámetros en la respuesta obtenida y compararlos con los valores registrados en las cuencas de estudio. La aplicación de este método se desarrollará en tres cuencas del departamento del Valle del Cauca: río Lili, río Yumbo y río Meléndez.

En el primer capítulo Modelación Lluvia – Escorrentía, se plantean las generalidades del proceso para la estimación de crecientes, la historia del modelo del SCS (Soil Conservation Service), la historia de los hidrogramas unitarios que se van a emplear, y se introduce el tema de calibración de modelos hidrológicos.

En el segundo capítulo se describe la zona de estudio, en la cual se encuentra una información detallada de las características fisiográficas y morfométricas de las cuencas del departamento del Valle del Cauca en consideración: río Lili, río Yumbo y río Meléndez, información necesaria para llevar a cabo el desarrollo del presente trabajo.

En el tercer capítulo se describe en forma detallada toda la información empleada, información cartográfica (las planchas solicitadas en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC) e hidrográfica (registros de las estaciones de precipitación y de caudal con registro continuo) de las tres cuencas del departamento del Valle del Cauca.

En el cuarto capítulo se explica el procedimiento de análisis de los parámetros con la herramienta MCAT y se describe en detalle la importancia del análisis de la sensibilidad e incertidumbre en la modelación hidrológica, mostrando adicionalmente el proceso que se lleva a cabo para realizar un análisis de este tipo.

En el quinto capítulo se observa en detalle el procedimiento llevado a cabo para realizar la modelación de las cuencas consideradas, se explica cómo se realizó la selección de los eventos y las diferentes combinaciones que se llevaron a cabo para cada modelación.

En el sexto capítulo se observan los resultados obtenidos para cada cuenca, donde se muestra la tendencia del comportamiento de la escorrentía en cada evento, considerando las combinaciones realizadas.

En el séptimo capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos para cada cuenca, evaluando la influencia de los parámetros de los modelos considerados y la veracidad de algunas suposiciones empleadas en la práctica.

Por último, se presentarán las conclusiones y/o recomendaciones necesarias para la aplicación de los modelos considerados en la estimación de crecientes y en los trabajos futuros que se realicen en este campo.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Identificar mediante un análisis de sensibilidad e incertidumbre la influencia de los parámetros del modelo del Soil Conservation Service (SCS) en la estimación de los hidrogramas de escorrentía superficial y de la precipitación de excesos, empleando diferentes Hidrogramas Unitarios.

### **Objetivos específicos**

- Comparar el ajuste de la precipitación de excesos obtenida con el modelo del SCS con la precipitación de excesos obtenida de los registros para las cuencas de estudio.
- Realizar un análisis de incertidumbre y sensibilidad de los parámetros de los modelos seleccionados mediante la metodología GLUE incluida en el Toolbox MCAT.
- Comparar el ajuste de los hidrogramas de escorrentía superficial empleando los hidrogramas unitarios de Snyder, Clarck y SCS.

## 1. MODELACIÓN LLUVIA – ESCORRENTÍA

### 1.1. Generalidades del proceso

A través de la historia se han expuesto gran cantidad de modelos lluvia-escorrentía que utilizan diversos parámetros para el desarrollo de estimaciones hidrológicas, dentro de estos parámetros se establecen coeficientes específicos que son independientes del tiempo o condiciones del lugar (Chow et al., 1988); variando desde métodos muy complejos que utilizan hasta 10 parámetros, hasta métodos más simples que utilizan un solo parámetro. Investigaciones recientes (Pizarro T et al., 2005; Wagener & Wheeler, 2006) han demostrado que los resultados que se obtienen con modelos simples dan resultados similares a los de modelos más complejos, por lo que preferiblemente se utilizan los primeros debido a las facilidades que estos presentan en la etapa de calibración.

El análisis de los modelos lluvia-escorrentía parte del conocimiento sobre los procesos hidrológicos a los que se ve sometida una cuenca hidrográfica, como son: precipitación, pérdida por interceptación, evapotranspiración, evaporación, mecanismos de infiltración, entre otros; estos procesos hidrológicos están definidos por: el clima, topografía del lugar, geología, tipo de suelos, vegetación y uso del suelo, los cuales se relacionan con el tamaño de la cuenca.

Penman (1961), definió la hidrología como la ciencia que trata de responder a la pregunta, ¿“Que pasa con la lluvia”? (Woolhiser, 2003). Esto suena como una simple pregunta, pero la experiencia con este estudio ha mostrado que el análisis del ciclo hidrológico puede llegar a ser muy complicado y está sujeto a una gran incertidumbre. El desarrollo de los modelos matemáticos está orientado a responder esta pregunta a un alto nivel de detalle, estos modelos pueden ser empleados en la planeación y diseño de la conservación del suelo, control del agua de riego, restauración de humedales y corrientes. Otros modelos son empleados en proyectos de protección contra inundaciones, envejecimiento de las presas, entre otros.

En el mundo se han realizado gran variedad de modelos que relacionan los parámetros de estos con los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca hidrográfica; dentro de los cuales se encuentran modelos como (Woolhiser, 2003; Singh & Frevert, 2002; Singh, 1995):

- Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Feldman (1981), HEC (1981,2000). Relaciona características físicas de la cuenca semidistribuidas, las cuales se aplican a modelos de escorrentía.
- Runoff Routing Model (RORB). Laurenson (1964), Laurenson y Mein (1993,1995). Basado en modelos de simulación de escorrentía.



- Model (TOPMODEL). Beven (1995). Modelo de simulación hidrológica.
- Hydrologic Model System (HMS). Yu (1996), Yu y Schwartz (1998), Yu et al. (1999). Relaciona características físicas de la cuenca, permite una distribución de los parámetros y un sistema de simulación hidrológica continua.
- Watershed Bounded Network Model (WBNM). Boyd et al. (1979, 1996), Rigby et al. (1991). Relaciona las características geomorfológicas de la cuenca y es un modelo basado en la simulación de inundaciones.
- Simplified Hydrology Model (SYMHYD). Chiew et al. (2002). Conceptualización diaria de los parámetros del modelo lluvia-escorrentía.

En el presente trabajo se ha seleccionado el método de abstracciones del SCS (explicado en el numeral 1.2) debido a la amplia difusión de este modelo en nuestro país para estimar la precipitación de excesos, a partir de información de precipitación, y del tipo y uso del suelo. Este trabajo está orientado para trabajar con eventos de periodos cortos de tiempo, con el fin de aplicar el estudio a cuencas de áreas pequeñas, y de esta manera controlar y analizar adecuadamente la variación de los parámetros.

## 1.2. Modelo del SCS (Soil Conservation Service)

En abril de 1935 el Congreso de EE.UU. aprobó la ley de conservación de suelos y declaró que el gobierno federal tiene la responsabilidad permanente de la reducción de la erosión hídrica y eólica de los suelos de la nación.

La agencia de conservación de suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service - SCS) desarrolló un método comúnmente conocido como el método del número de curva ( $CN$ ) cuyo objetivo es calcular las abstracciones de agua de una tormenta. En este método la precipitación de excesos (profundidad de escorrentía superficial) es una función de la precipitación total en la cuenca, de un parámetro de abstracción y del número de curva de escorrentía ( $CN$ ).

El método del número de curva consiste en un análisis empírico, en el cual se estudian los resultados obtenidos de escorrentía superficial en pequeñas cuencas y al mismo tiempo se realiza un monitoreo por parte del United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - USDA). Mockus (1949) propuso que cada dato podría ser representado por una ecuación con la siguiente forma (Beven, 2004):

$$\frac{P_e}{P_t - I_a} = 1 - 10^{-b(P_t - I_a)} \quad [1]$$

Ó

$$\frac{P_e}{P_t - I_a} = \left[ 1 - e^{-B(P_t - I_a)} \right] \quad [2]$$

Donde:

$P_e$  = Precipitación de Excesos (mm)

$P_t$  = Precipitación Total (mm)

$I_a$  = Pérdidas Iniciales (mm)

$b$  y  $B$  = Coeficientes que relacionan las condiciones antecedentes de la lluvia.

De acuerdo con Mockus, se sugiere que el coeficiente  $b$  relaciona las condiciones antecedentes de la lluvia, el tipo de suelo y el índice de cobertura del terreno, un índice temporal y la duración de la tormenta.

Mishra y Singh en 1969 demostraron que se puede derivar la ecuación [2], de forma tal que la velocidad de cambio de retención inicial de agua con la precipitación efectiva, se convierten en una función lineal de retención y con la limitación que  $B(P - I_a) < 1$ .

Con base en lo anterior la ecuación puede expresarse de la siguiente manera (Beven, 2004):

$$\frac{P_e}{P_t - I_a} = \frac{P_t - I_a}{S_{Máx} + P_t - I_a} \quad [3]$$

Donde:

$S_{Máx} = \frac{1}{B}$  = Volumen de retención máxima (mm)

Mishra y Singh (1969) propusieron en ese mismo año una generalización de la ecuación [3], obteniendo mejores resultados de la siguiente manera:

$$\frac{P_e}{P_t - I_a} = \frac{P_t - I_a}{S_{Máx} + a(P_t - I_a)} \quad [4]$$

Con base en lo anterior, se obtiene una generalización asumiendo un volumen de retención acumulado del agua que se ha infiltrado  $F_a$ , el cual se explica por medio de la siguiente ecuación:

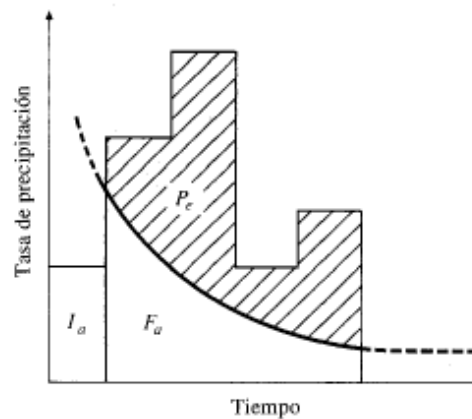
$$\frac{F_a}{S_{Máx}} = \frac{P_e}{P_t - I_a} \quad [5]$$

Por otro lado, por medio de la ecuación de continuidad se relacionan las pérdidas de agua, la precipitación de excesos y la precipitación total (Chow et al., 1988):

$$P_t = P_e + I_a + F_a \quad [6]$$

Donde:

$F_a$  = Abstracción Continuada (mm)



**Figura 1.** Representación Gráfica de la ecuación de continuidad.

En la actualidad, se realiza una suposición para determinar la abstracción inicial ( $I_a$ ) asumiendo que esta es una fracción del volumen de retención máxima,  $S_{Máx}$ , lo cual indica que (Beven, 2004):

$$I_a = \lambda S_{Máx} \quad [7]$$

Donde:

$\lambda$  = Fracción de la retención máxima perdida inicialmente.

De acuerdo con los estudios realizados por el SCS se cuenta con la siguiente ecuación para calcular la precipitación de excesos (Beven, 2004):

$$P_e = \frac{(P_t - \lambda S_{Máx})^2}{P_t + (1 - \lambda) S_{Máx}} \quad [8]$$

La relación que se establece entre el número de curva ( $CN$ ) y el volumen de retención máxima ( $S_{Máx}$ ), hace referencia a la capacidad de la cuenca hidrográfica para abstraer agua de la precipitación, y son inversamente proporcionales; debido a que ( $CN$ ) depende de las características del suelo, a mayor ( $CN$ ) no es posible una abstracción de agua y se presenta un menor valor de ( $S_{Máx}$ ); por lo contrario, a menor ( $CN$ ) existe abstracción de agua y se presenta un valor alto de ( $S_{Máx}$ ).

En la mayoría de los casos ( $\lambda$ ) se toma con un valor de 0.20, pero el propósito en este trabajo es evaluar la sensibilidad e incertidumbre del parámetro lambda ( $\lambda$ ) y calibrar este parámetro para las cuencas del Valle del Cauca consideradas; sin embargo, al modificar este parámetro de ( $\lambda$ ) que actualmente tiene un valor constante, cambia otro parámetro del método del SCS que es el número de curva ( $CN$ ), por consiguiente, los resultados que se obtendrán del método del SCS arrojarán información de ( $\lambda$ ) y de ( $CN$ ).

Con base en lo anterior, la relación de ( $CN$ ) y ( $S_{Máx}$ ) para un suelo dado se obtiene de la siguiente ecuación (Beven, 2004):

$$S_{Máx} = \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad [9]$$

La estandarización que se ha realizado para los valores de ( $CN$ ), proviene de la estimación de diferentes circunstancias del estado del suelo, vegetación y antecedentes de humedad.

El número de curva es un número adimensional, se basa en datos de precipitación y escorrentía tomados de 24 horas; dado en el siguiente rango:

$$0 \leq CN \leq 100$$

Donde:

$CN = 100$ , para superficies impermeables y superficies de agua.

$CN < 100$ , para superficies naturales.

$CN = 0$ , para superficies totalmente permeables.

Este método del número de curva ( $CN$ ) es muy popular debido a que en él se encuentra una tabulación de gran variedad de tipos y condiciones del suelo, el cual es necesario para determinar la capacidad de retención máxima de agua que se tiene en el lugar de estudio. Un inconveniente que presenta este método es que no se pueden establecer las variaciones temporales de intensidad de lluvia.

Los suelos se han clasificado en cuatro grupos (Monsalve, 1999):

**Tabla 1.** Clasificación hidrológica de los suelos.

Grupo A:	Tienen altos porcentajes de infiltración y de humedad (bajo porcentaje de escorrentía).
Grupo B:	Tienen moderados porcentajes de infiltración y son moderadamente bien drenados (moderadamente bajo porcentaje de escorrentía).
Grupo C:	Tienen bajos porcentajes de infiltración (lenta), los cuales cuentan con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo (moderadamente alto porcentaje de escorrentía).
Grupo D:	Tienen muy bajos porcentajes de infiltración (muy lenta), suelos arcillosos expansivos, con un nivel freático alto permanente (alto porcentaje de escorrentía).

El número de curva se ha ajustado dependiendo del uso del suelo (diferencia entre cultivos, prados, bosques, caminos etc.) y las condiciones antecedentes de humedad que presenta el terreno, estos ajustes hacen que bajen los valores de ( $CN$ ) si el terreno tiene un antecedente de sequía, pero hacen que los valores de ( $CN$ ) aumenten si los antecedentes del terreno son de humedad; este método tiene en cuenta tres condiciones de humedad (ver Tabla 2). Condición de humedad antecedente seca (AMC I), tienen el menor potencial de escorrentía, suelos secos listos para el arado. Condición de humedad antecedente promedio (AMC II), tienen un potencial de escorrentía promedio. Condición de humedad antecedente húmeda (AMC III), tienen el mayor potencial de escorrentía, el terreno se encuentra saturado (Monsalve, 1999).

**Tabla 2.** Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad antecedente.

<b>Condiciones de Humedad Antecedente (AMC)</b>	<b>Precipitación Acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (mm)</b>
I	0 – 36
II	36 – 53
III	más de 53

La Tabla 2 fue desarrollada utilizando datos del occidente de los Estados Unidos. Por consiguiente, se recomienda tener cautela al emplear los valores suministrados en este cuadro para determinar la condición de humedad, antecedente en otras regiones geográficas o climáticas.

En la Tabla 3 se observa una clasificación del número de curva dependiendo el tipo de suelo (Chow et al., 1988):

Tabla 3. Valor del número de curva para cada tipo de suelo.

**Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II,  $I_a = 0.2S$ )**

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada <sup>1</sup> : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena <sup>2</sup>	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial <sup>3</sup> :				
Tamaño promedio del lote      Porcentaje promedio impermeable <sup>4</sup>				
1/8 acre o menos                      65	77	85	90	92
1/4 acre                                      38	61	75	83	87
1/3 acre                                      30	57	72	81	86
1/2 acre                                      25	54	70	80	85
1 acre    20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. <sup>5</sup>	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados <sup>5</sup>	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

1 Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, Cap. 9

2 Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

3 Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4 Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.

5 En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

A continuación, se observan las diferentes ecuaciones empleadas para realizar las respectivas transformaciones de  $CN_{II}$  al  $CN_{I}$  o  $CN_{III}$  (Monsalve, 1999):

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}} \quad [10]$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057CN_{II}} \quad [11]$$

Se encuentra que las siguientes relaciones tienen una buena aproximación:

$$\frac{S_{Máx\_I}}{S_{Máx\_II}} = \frac{S_{Máx\_II}}{S_{Máx\_III}} = 2.3 \quad [12]$$

Para realizar los diferentes cálculos es necesario estimar primero el número de curva  $CN_{II}$ , y a continuación se debe hacer un análisis de acuerdo con las condiciones antecedentes de humedad que se presentan en la cuenca hidrográfica, con el fin de establecer a que número de curva corresponde, si al  $CN_I$  o al  $CN_{III}$ .

En la siguiente grafica se observan las curvas de  $CN$  estandarizadas (Chow et al., 1988):

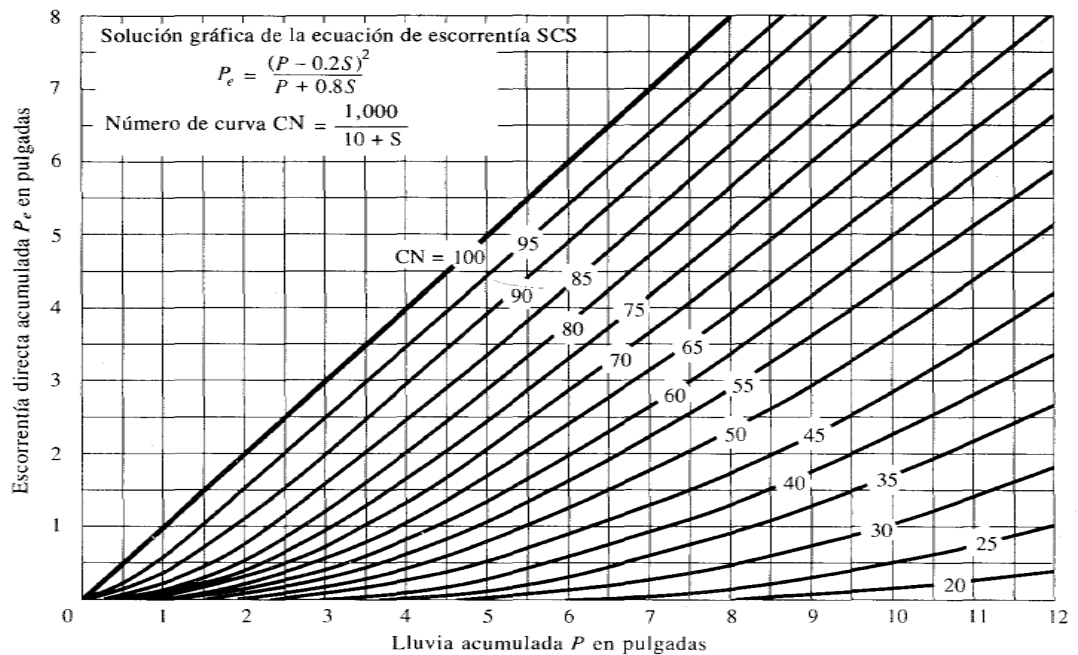


Figura 2. Correlación de  $CN$  para calcular el hidrograma de Precipitación de Excesos.



### 1.3. Hidrograma unitario (HU)

#### 1.3.1. Definición

En general, un hidrograma unitario (HU) es la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica ante una precipitación unitaria (volumen unitario de lluvia neta), uniformemente distribuida en espacio y tiempo. Las lluvias netas se suponen de distribución uniforme y de intensidad constante en toda el área de drenaje de la cuenca. Los hidrogramas unitarios sintéticos son aquellos HU's derivados de forma empírica, que se puede utilizar en cuencas no aforadas; estos HU's tratan de establecer el tiempo base y el tiempo al caudal pico de este hidrograma en función de las características morfométricas de la cuenca hidrográfica, cuyo valor puede obtenerse fácilmente de la cartografía de la zona.

Existen tres tipos de hidrogramas unitarios sintéticos (Chow et al., 1988):

- Los que relacionan las características del hidrograma unitario con las características de la cuenca (Snyder, Gray, etc).
- Los basados en hidrogramas unitarios adimensionales (SCS).
- Los basados en modelos de almacenamiento y tránsito de la cuenca (Clark, Nash, etc).

Del mismo modo que para los modelos lluvia-escorrentía, en el mundo se han realizado gran variedad de modelos para estimar hidrogramas de escorrentía superficial en cualquier punto de la cuenca hidrográfica (Monsalve, 1999; Chow et al., 1988; Viessman & Lewis, 1996).

La aplicación del método de hidrogramas unitarios consiste en cuatro pasos (Hoggan, 1997):

- 1) Determinar el hietograma de precipitación para la cuenca.
- 2) Estimar las pérdidas, restarlas del hietograma de precipitación para obtener la precipitación de excesos.
- 3) Transformar la precipitación de excesos dentro de la escorrentía directa con un hidrograma unitario.
- 4) Agregar el flujo base a la escorrentía directa para obtener el hidrograma total de escorrentía.

De los hidrogramas unitarios más utilizados en Colombia, los que se van a emplear con el método de abstracciones del SCS serán: HU del SCS, HU de

Snyder y el HU de Clark (los cuales se explican en los numerales 1.3.2, 1.3.3 y 1.3.4 respectivamente). Cada hidrograma unitario maneja diferentes parámetros para calcular los hidrogramas de escorrentía superficial, en el caso del HU del SCS se tiene un solo parámetro el tiempo de rezago (Lag Time –  $T_l$ ), para el HU de Snyder se tienen dos parámetros,  $C_p$  y  $C_t$ , basados en cuencas instrumentadas (en un rango de 0.56-0.69 y 1.35-2.65 respectivamente), y para el HU de Clark los parámetros son el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $K$ ).

En conclusión, en la aplicación del método del SCS (con  $\lambda$  variable y constante) para la estimación de la precipitación de excesos, es necesario tener en cuenta que los parámetros que utiliza el modelo se ajusten adecuadamente a la información disponible de las cuencas hidrográficas; y para el análisis de los hidrogramas de escorrentía superficial se emplearán los hidrogramas unitarios de SCS, Snyder y Clark; con el fin de analizar el comportamiento de los parámetros de cada modelo en el ajuste de hidrogramas observados.

### 1.3.2. Hidrograma unitario del SCS

El desarrollo de hidrogramas unitarios sintéticos se basa en el siguiente principio: si el volumen del hidrograma de escorrentía superficial es conocido (volumen es igual al área de la cuenca hidrográfica multiplicado por una unidad de profundidad de escorrentía superficial), el caudal pico puede ser calculado suponiendo una cierta forma del hidrograma unitario. Si se supone una forma triangular (véase Figura 3), el volumen es igual a (Monsalve, 1999):

$$V = \frac{U_p t_b}{2} = Ax(1) \quad [13]$$

Donde:

$V$  = Volumen bajo el hidrograma unitario triangular ( $m^3$ )

$U_p$  = Caudal pico ( $m^3/s$ )

$t_b$  = Tiempo base del hidrograma unitario triangular (h)

$A$  = Área de drenaje de la cuenca hidrográfica ( $km^2$ )

(1) = Una unidad de profundidad de escorrentía (mm)

De la ecuación [13] (Monsalve, 1999):

$$U_p = \frac{2A}{t_b} \quad [14]$$

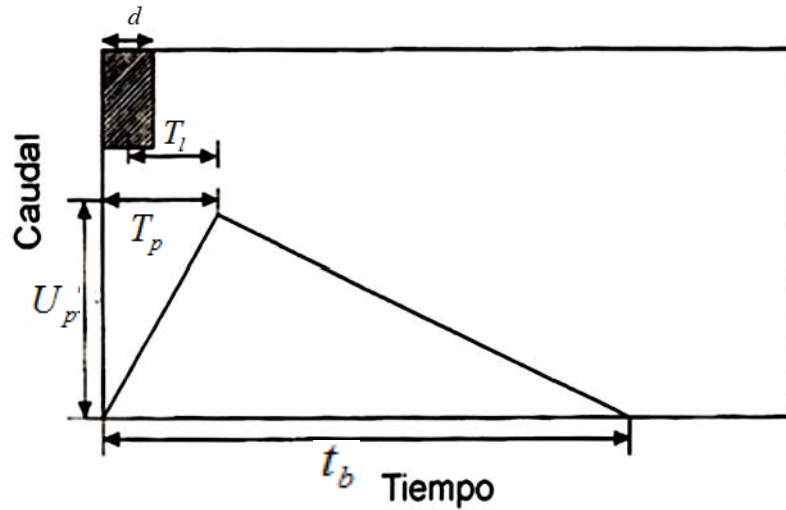


Figura 3. Hidrograma unitario triangular del SCS.

Para un milímetro de lluvia efectiva el caudal pico resulta igual a:

$$U_p = \frac{0.208A}{T_p} \quad [15]$$

Donde:

$T_p$  = Tiempo al pico del hidrograma unitario triangular (h)

Para el cálculo del tiempo al pico ( $T_p$ ) se pueden emplear las siguientes ecuaciones:

$$T_p = \frac{d}{2} + T_l \quad [16]$$

$$T_p = \frac{d}{2} + 0.6T_c \quad [17]$$

Donde:

$d$  = Duración de la precipitación de excesos (h)

$T_c$  = Tiempo de concentración de la cuenca (h)

$T_l$  = Tiempo de rezago de la cuenca (h)

El método del número de curva ( $CN$ ) ha establecido una ecuación por medio de la cual se puede obtener el valor del tiempo de rezago (Lag Time –  $T_l$ ), sin embargo, no es posible conocer la certeza de este resultado; por tal motivo, en el presente trabajo para llevar a cabo la aplicación del HU del SCS se realizará un análisis de la sensibilidad e incertidumbre de este parámetro, con el fin de analizar su comportamiento en la estimación de la escorrentía superficial.

La metodología utilizada para realizar el cálculo del tiempo de rezago Lag Time según el HU del SCS es (Beven, 2004):

$$T_l = \frac{l^{0,8} [25400 - 22,86(CN)]^{0,7}}{14104(CN)^{0,7} S_L^{0,5}} \quad [18]$$

Donde:

$l$  = Longitud axial (m)

$S_L$  = Pendiente de ladera (%)

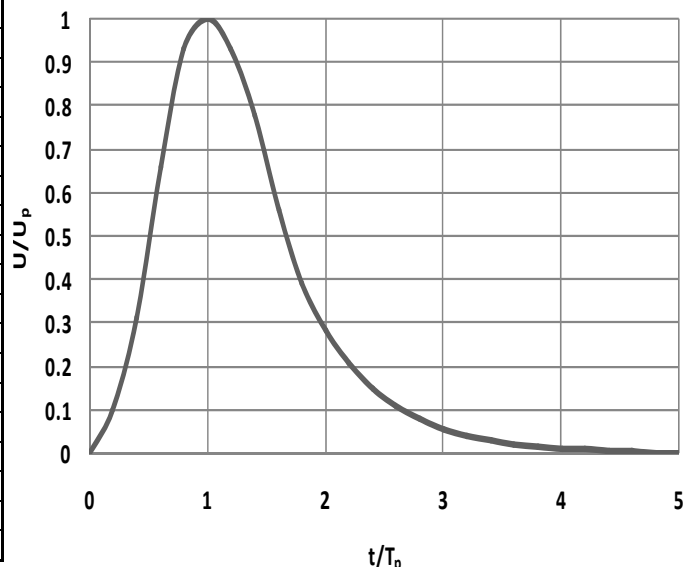
La relación del tiempo base y el tiempo al pico del hidrograma unitario triangular está dada por la siguiente ecuación:

$$t_b = \frac{8}{3} T_p \quad [19]$$

El HU del SCS es un hidrograma unitario adimensional y fue desarrollado por Víctor Mockus en 1950; a diferencia del método de Snyder, en el cual se utiliza una relación constante del tiempo base del hidrograma triangular y del tiempo al pico igual a 8/3, en el hidrograma del SCS esta relación tiene un valor igual a 5 (véase figura 4). Este hidrograma utiliza una función adimensional para proveer un hidrograma unitario con forma típica; las ordenadas que utiliza el hidrograma unitario del SCS para generar un hidrograma escorrentía superficial se observan en la Tabla 4 (Hoggan, 1997).

**Tabla 4.** Ordenadas del HU del SCS.

$t/T_p$	$U/U_p$
0.00	0.0000
0.20	0.1000
0.40	0.3100
0.60	0.6600
0.80	0.9300
1.00	1.0000
1.20	0.9300
1.40	0.7800
1.60	0.5600
1.80	0.3900
2.00	0.2800
2.20	0.2070
2.40	0.1470
2.60	0.1070
2.80	0.0770
3.00	0.0550
3.20	0.0400
3.40	0.0290
3.60	0.0210
3.80	0.0150
4.00	0.0110
4.20	0.0100
4.40	0.0070
4.60	0.0030
4.80	0.0015
5.00	0.0000



**Figura 4.** Hidrograma unitario curvilíneo del SCS.

Una vez se ha determinado  $T_p$  y  $U_p$  con los valores de la Tabla 4, se procede a calcular las ordenadas del hidrograma unitario.

### 1.3.3. Hidrograma unitario de Snyder

En 1938, Snyder introdujo el concepto del hidrograma unitario sintético. Mediante el análisis de las condiciones de escurrimiento en un gran número de cuencas, Snyder fue capaz de desarrollar valores para la duración de la escorrentía y niveles máximos de inundación para los diferentes tipos de cuencas bajo condiciones variables. Su procedimiento permite a los hidrólogos estudiar y analizar las cuencas de drenaje en las áreas de 10 a 10.000 kilómetros cuadrados para los registros que no estaban disponibles o no eran fiables. Esto incluyó un gran número de cuencas en los Estados Unidos.

Snyder definió el hidrograma unitario estándar como aquel cuya duración de lluvia  $t_r$  está relacionada con el retardo de la cuenca  $t_p$  por (Chow et al., 1988):

$$t_p = 5.5t_r \quad [20]$$

Para un hidrograma unitario estándar se encontró que:

El retardo de la cuenca es (Chow et al., 1988):

$$t_p = 0.75C_t(LL_c)^{0.3} \quad [21]$$

Donde:

$t_p$  = Tiempo de retardo (h)

$L$  = Longitud del cauce principal (km)

$L_c$  = Longitud centroide (km)

$C_t$  = Coeficiente basado en cuencas instrumentadas (en un rango de 1.35 - 2.65).

El caudal pico  $q_p$  por unidad de área de drenaje del hidrograma unitario estándar es (Chow et al., 1988):

$$q_p = \frac{2.75C_p}{t_p'} \quad [22]$$

Donde:

$C_p$  = Coeficiente basado en cuencas instrumentadas (en un rango de 0.56-0.69).

Si el tiempo de retardo  $t_p$  de la cuenca satisface la ecuación [20], no es necesario hacer una corrección a este tiempo, pero en la mayoría de los casos no se cumple esta condición, por lo tanto, el tiempo de retardo corregido  $t_p'$  es (Chow et al., 1988):

$$t_p' = t_p - 0.25(t_r - d) \quad [23]$$

Donde:

$t_p'$  = Tiempo de retardo corregido (h)

$d$  = Duración de la precipitación de excesos (h)

El caudal pico del hidrograma unitario estándar es (Chow et al., 1988):

$$U_p = q_p A \quad [24]$$

$A$  = Área de drenaje de la cuenca hidrográfica (km<sup>2</sup>)

De acuerdo a las unidades de la ecuación [24] el caudal pico del hidrograma unitario se da en (m<sup>3</sup>/s)/cm, por lo tanto, es necesario dividir el caudal entre diez con el fin de expresar su valor en milímetros.

Para los parámetros  $C_t$  y  $C_p$  se realizará un análisis de la sensibilidad e incertidumbre por medio de la metodología GLUE incluida en la herramienta de MCAT (explicada en el numeral 4), los valores de  $L$  y  $L_c$  se miden utilizando un mapa de la cuenca. A partir de los registros de las estaciones de precipitación y caudal con registro continuo se obtienen los valores de duración de la precipitación de excesos  $d$  en horas.

El tiempo base  $t_b$  en horas del hidrograma unitario puede determinarse utilizando el hecho de que el área bajo el hidrograma unitario es equivalente a una escorrentía directa de 1 cm (1 pulg en el sistema inglés de unidades). Suponiendo una forma triangular para el hidrograma unitario, el tiempo base se puede estimar por (Chow et al., 1988):

$$t_b = \frac{5.56}{q_p} \quad [25]$$

El tiempo al pico del hidrograma unitario está dado por la siguiente ecuación (Chow et al., 1988):

$$T_p = t_p' + \frac{d}{2} \quad [26]$$

El método de Snyder fue muy utilizado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos. Su experiencia condujo a dos fórmulas empíricas que ayudan a determinar la forma del hidrograma unitario de Snyder (Bras, 1989):

$$W_{75} = \frac{1.22}{q_p^{1.08}} \quad [27]$$

$$W_{50} = \frac{2.14}{q_p^{1.08}} \quad [28]$$

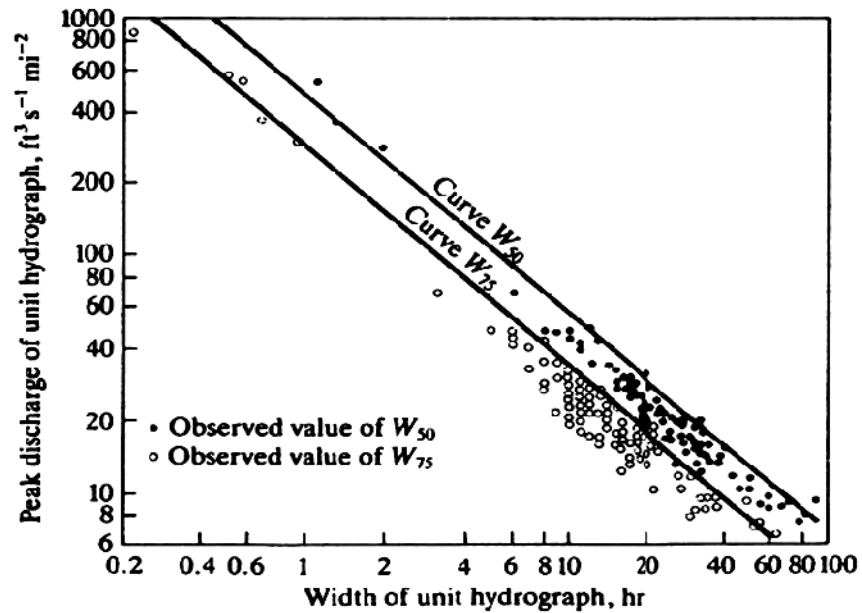


Figura 5. Hidrograma Unitario con un ancho de 50 y 75 % de caudal pico. Fuente: (Bras, 1989).

Donde  $W_{50}$  es el ancho del hidrograma unitario para el 50% del caudal pico (h), y  $W_{75}$  es el ancho del hidrograma unitario para el 75% del caudal pico (h). Estos anchos de tiempo deben ser proporcionados de tal manera que una tercera parte quede localizada antes del caudal pico y que las dos terceras partes restantes lo sean después de este.

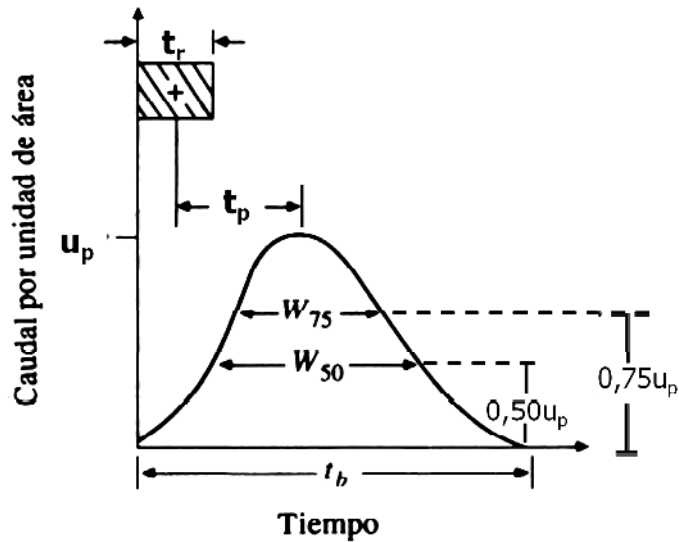


Figura 6. Hidrograma Unitario de Snyder. Fuente: (Chow et al., 1988).



#### 1.3.4. Hidrograma unitario de Clark

Clark en 1945 (Estados Unidos) desarrolló su hidrograma unitario, se calcula transitando un incremento unitario de precipitación efectiva, primero a través de un histograma de tiempo-área y luego a través de un embalse lineal hipotético; este método utiliza el concepto de hidrograma unitario instantáneo (HUI) para definir un único hidrograma para una cuenca.

El hidrograma unitario de Clark consiste en la superposición de un tramo de transporte lineal que representa el retraso, y un embalse lineal, que representa la amortiguación (estos dos componentes se modelan separadamente). El flujo de salida del tramo de transporte lineal es el flujo de entrada del embalse lineal, y el flujo de salida del embalse lineal es el HUI. El tramo de transporte lineal emplea el método de las isocronas (relación entre el área y tiempo) para describir la propagación de la escorrentía en la cuenca. Las isocronas representan la superficie porcentual de la cuenca que se encuentra a un tiempo de viaje determinado del punto de desagüe. La relación de área-tiempo se realiza dividiendo el área de la cuenca en varias subcuencas con distinto tiempo de recorrido de la escorrentía superficial, desde la línea isocrona seleccionada hasta el punto de salida (ver Figura 7).

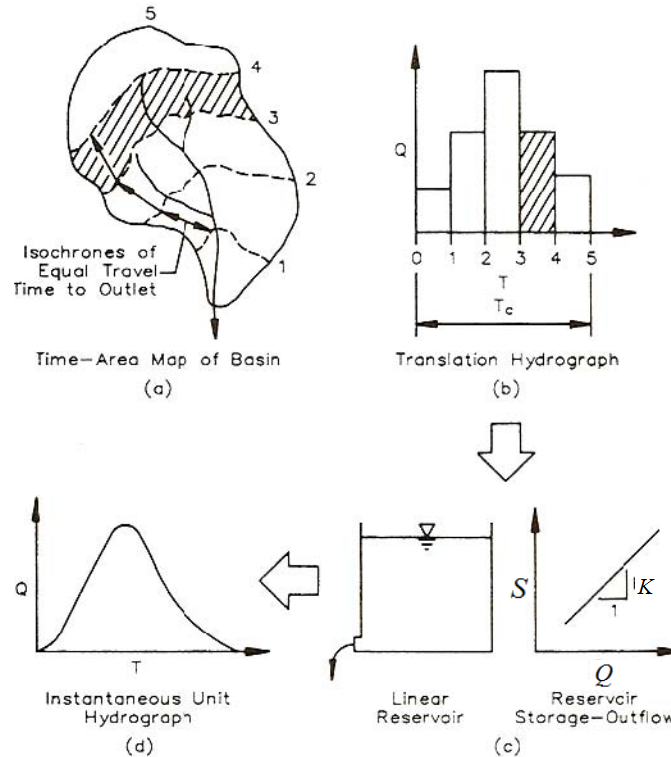
El método de las isocronas se efectúa en los siguientes pasos (Hoggan, 1997):

- a) Se divide la cuenca en varias subcuencas, tal que el intervalo  $T_c$  tiempo de recorrido, a través de cada una, sea igual al tiempo de recorrido desde el punto más alejado dividido por el número de subcuencas más uno. Las líneas divisorias de las subcuencas se denominan **isocronas**, cuyo número debe ser mayor a 5.
- b) Se calculan las áreas parciales que se encuentran limitadas por cada isocrona.
- c) Se construye el polígono de área y tiempo de viaje. Para el hidrograma unitario, con una lluvia efectiva también unitaria. La lluvia efectiva es instantánea.
- d) El polígono de áreas, puede, por lo tanto, representar el hidrograma de entrada al embalse hipotético, el cual se transita hacia la salida.
- e) Se transforma el hidrograma transitado en d) a unidades de caudal usando un factor de  $f$ , obteniendo así el Hidrograma Unitario Instantáneo (HUI).

$$f = \frac{\text{Lluvia efectiva unitaria en } m \times \text{Área Total en } m^2}{\text{Intervalo entre isocronas en seg.} \times 100} \quad [29]$$

- f) Promediando las ordenadas del HUI se obtiene el HUI para una duración igual al intervalo entre isocronas.
- g) Se transforma el HU resultante al HU para la duración de la lluvia efectiva deseada mediante el procedimiento de la curva S.

En la siguiente grafica se observa el procedimiento llevado a cabo cuando se emplea el hidrograma unitario de Clark (Hoggan, 1997):



**Figura 7.** Modelo conceptual del hidrograma Unitario de Clark.

El componente de embalse lineal representa los efectos globalizados de almacenamiento y resistencia en la cuenca. El caudal de salida del embalse y el almacenamiento se relacionan de la siguiente manera (Hoggan, 1997):

$$S_i = KQ_i \quad [30]$$

Donde:

$S_i$  = Almacenamiento al final del periodo  $i$

$Q_i$  = Caudal de salida durante el periodo  $i$

$K$  = Coeficiente de almacenamiento

El caudal de salida del embalse lineal es analizado por medio de una ecuación de continuidad (Hoggan, 1997):

$$\bar{I}_i - \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \quad [31]$$

Donde:

$\bar{I}_i$  = Caudal de entrada promedio en el periodo  $i$ , determinado de la relación de área-tiempo

Combinando las ecuaciones [30] y [31], (Hoggan, 1997):

$$\bar{I}_i - \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = \frac{KQ_i - KQ_{i-1}}{\Delta t} \quad [32]$$

Realizando una sustitución de la siguiente manera (Hoggan, 1997):

$$c = \frac{2\Delta t}{2K + \Delta t} \quad [33]$$

Se obtiene la siguiente ecuación (Hoggan, 1997):

$$Q_i = c\bar{I}_i + (1 - c)Q_{i-1} \quad [34]$$

Un hidrograma unitario de duración  $\Delta t$  se computa como un promedio de dos hidrogramas unitarios instantáneos espaciados con un intervalo de tiempo  $\Delta t$  por medio de la siguiente ecuación (Hoggan, 1997):

$$U_i = 0.5(Q_i + Q_{i-1}) \quad [35]$$

Donde:

$U_i$  = Hidrograma unitario

Los parámetros del método de Clark son el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y el coeficiente de almacenamiento ( $K$ ), los cuales representan la curva del embalse lineal del almacenamiento y el caudal de salida. Los parámetros se pueden obtener de los hidrogramas de los eventos (ver Figura 8), el tiempo de concentración se puede obtener gráficamente (el tiempo de duración entre el instante en que se termina la precipitación y el punto de inflexión ó cambio de curvatura del hidrograma); el parámetro  $K$  se puede estimar dividiendo la descarga de la escorrentía directa en el punto de inflexión entre la pendiente de la

curva en ese punto. El punto de inflexión para el flujo de entrada al embalse lineal es cero, por lo tanto, en ese término se puede quitar y la ecuación [31] queda de la siguiente manera (Hoggan, 1997):

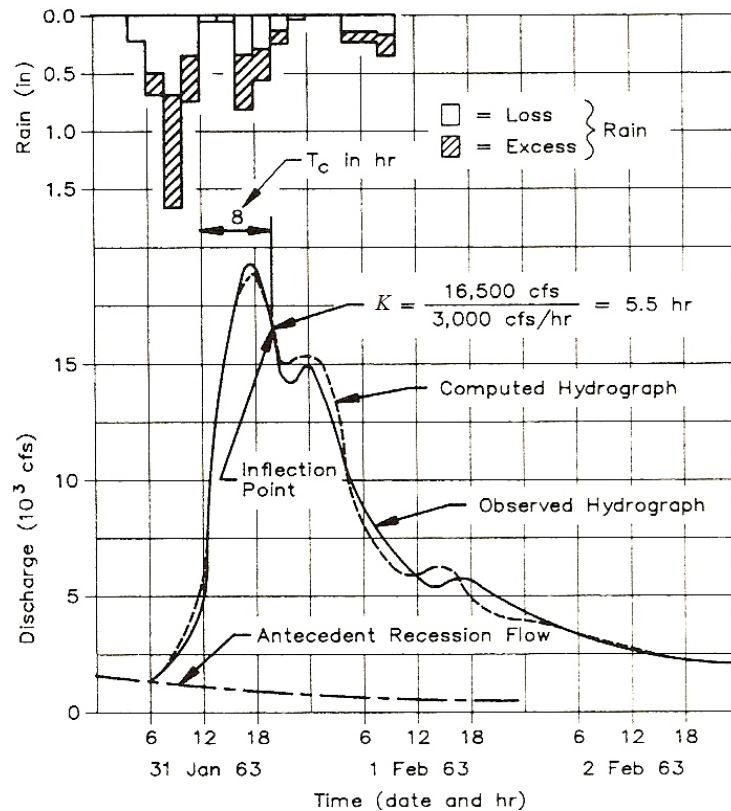
$$-\frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t} \quad [36]$$

Sustituyendo la relación lineal de la ecuación [30] para  $S_i$  y  $S_{i-1}$  y despejando  $K$ , queda de la siguiente manera (Hoggan, 1997):

$$K = \frac{(Q_{i-1} + Q_i)/2}{-[(Q_i - Q_{i-1})/\Delta t]} \quad [37]$$

Esto indica que  $K$  es igual a la descarga promedio del punto de inflexión dividido por el negativo de la pendiente del punto de inflexión del hidrograma. Otro medio para estimar el valor del parámetro  $K$  es determinando el volumen restante después del punto de inflexión y dividirlo por el volumen del flujo en ese punto. Por otro lado,  $K$  puede ser determinado como un promedio de los resultados de los análisis de diferentes hidrogramas.

Para los parámetros  $K$  y  $T_c$  se realizará un análisis de la sensibilidad e incertidumbre por medio de la metodología GLUE incluida en la herramienta de MCAT (explicada en el numeral 4).



**Figura 8.** Estimación de  $T_c$  y  $K$  de un hidrograma. **Fuente:** (Hoggan, 1997).

El cálculo del hidrograma unitario de Clark en el programa de HEC-1, emplea una curva sintética de tiempo-área, la cual se deriva de la forma de una cuenca generalizada para obtener el hidrograma de la cuenca en estudio. La relación de tiempo-área que se emplea en este método es la siguiente (Hoggan, 1997):

$$AI = 1.414T^{1.5} \quad \text{Donde} \quad 0 \leq T \leq 0.5 \quad [38]$$

$$1 - AI = 1.414(1 - T)^{1.5} \quad \text{Donde} \quad 0.5 < T \leq 1 \quad [39]$$

Donde:

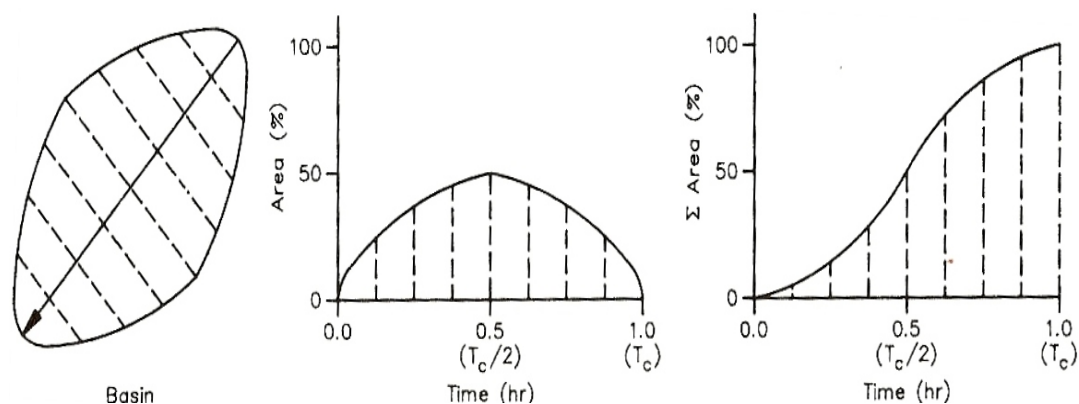
$AI$  = Es el área acumulada como una fracción del área de la subcuenca.

$T$  = Es una fracción del tiempo de concentración -  $T_c$ .

Esta curva se puede aplicar a la mayoría de las cuencas (ver Figura 9); sin embargo, para una cuenca que se desvíe sustancialmente de la forma generalizada, es necesario realizar una curva de tiempo-área específica para esa cuenca o se puede emplear otra generalización de otro método. Después de

trasformar el hidrograma se en ruta a un embalse lineal por medio de la ecuación [34]. Un hidrograma de un periodo determinado se calcula con la ecuación [35].

En la Figura 9, se observa la cuenca sintética que utiliza el método HEC-1, el análisis del tiempo de concentración que está orientado para emplear diferentes valores de tiempo de concentración a diferentes eventos y la curva sintética tiempo-área, cuando se emplea el hidrograma unitario de Clark (Hoggan, 1997).



a) Cuenca Sintética    b) Forma generalizada de  $T_c$     c) Relación tiempo-área

**Figura 9.** Forma de la cuenca generalizada y curva sintética tiempo-área empleada por HEC-1.

Con base en lo anterior, las metodologías para obtener la relación de tiempo-área son dos: la primera es realizar un análisis de isocronas donde el tiempo de concentración ( $T_c$ ) es constante durante todos los eventos que se presenten en la cuenca de estudio (en la realidad los tiempos de concentración para cada evento no son constantes, cambian dependiendo el evento), y la relación tiempo-área toma las áreas reales entre cada intervalo del tiempo de concentración (ver Figura 7). La segunda metodología emplea una curva sintética de tiempo-área (ver Figura 9), la cual permite emplear los diferentes tiempos de concentración que se dan en cada evento y obtener una relación de tiempo-área para el evento analizado; a diferencia de la metodología de isocronas, las áreas entre cada intervalo del tiempo de concentración se determinan mediante fórmulas (ver ecuaciones [38] y [39]); por lo tanto, para el presente trabajo se empleará la segunda metodología ya que permite realizar un análisis más detallado para cada evento cambiando los tiempos de concentración, y de esta manera comparar los resultados con los tiempos de concentración registrados.

## 1.4. Modelación avanzada

### 1.4.1. Modelación de cuencas hidrográficas

Con el avance tecnológico se han presentado nuevas metodologías para el manejo del recurso hídrico, un mejor desarrollo en los procesos de cuidado y calidad del agua, y nuevos estudios para la estimación de la escorrentía superficial generada en una cuenca hidrográfica. El uso del agua en la actualidad ha tomado gran importancia a nivel mundial en campos como son: económicos, ambientales, ecológicos, socio-culturales, higiene y salud de las personas.

En Colombia, la implementación de metodologías que requieran una modelación para comprender el comportamiento del agua en pocas ocasiones se aplica, en la mayoría de los casos se realiza un análisis con mediciones directas.

La clasificación de los modelos se basa en la descripción de los procedimientos, pueden ser agregados (no toman en cuenta la variación espacial, se expresan por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias), y distribuidos (toman en cuenta la variación espacial y las características de la cuenca hidrográfica), dentro de los cuales se diferencian entre: determinísticos, estocásticos y mixtos. También se pueden clasificar por medio de la escala (espacio y tiempo); o por medio del método de solución como: numérico, análogo o analítico (Singh, 1995).

En la elaboración de los modelos computacionales para la solución de problemas hidrológicos, el tipo de modelo va sujeto a la disponibilidad de la información. En general los modelos distribuidos necesitan más información que los modelos agregados y en muchos casos no se encuentra toda la información, esto afecta la calidad de los resultados debido a que los modelos piden información para efectos de calibración y validación de sus parámetros.

Con el desarrollo tecnológico han surgido nuevas metodologías para la obtención de la información, este es el caso de la tecnología SIG (Sistema de Información Geográfica), por medio de la cual se puede obtener información de: uso del suelo, geología, clima, condiciones topográficas entre otros; además se puede dividir espacialmente una cuenca hidrográfica en varias sub-cuencas con características hidrológicas similares.

El modelo considerado en el presente trabajo es de tipo agregado y en general este modelo se emplea para analizar cuencas de gran tamaño, pero con el fin de realizar un análisis detallado de los procesos que intervienen en el análisis, se han seleccionado cuencas de áreas relativamente pequeñas (ver numeral 2).

### 1.4.2. Calibración de los modelos

Cada modelo generalmente tiene dos tipos de parámetros, parámetros físicos y parámetros del procedimiento. Los parámetros físicos representan las propiedades físicas de la cuenca hidrográfica, como son: área de la cuenca hidrográfica, pendientes de la superficie, superficies impermeables de la cuenca entre otros; y los parámetros del procedimiento representan las propiedades de la cuenca hidrográfica que no se miden directamente, como son: la profundidad efectiva de almacenamiento de agua en la superficie del suelo, la tasa efectiva del flujo lateral interno, el coeficiente de la tasa de no linealidad del control de percolación para el almacenamiento de aguas subterráneas, entre otros.

El proceso de calibración del modelo consta de dos partes, que son: especificación de los parámetros y la estimación de los parámetros; la primera parte se basa en las propiedades de la cuenca hidrográfica, como son: propiedades físicas que no representan condiciones futuras, y el procedimiento de los parámetros para establecer los rango límites de iteración (máximos y mínimos); la segunda parte consiste en utilizar diferentes técnicas de diseño con el fin de minimizar la incertidumbre de los datos estimados, para poder encontrar el mejor ajuste de la información y su posterior uso (Singh, 1995).

La obtención de los parámetros se realiza mediante procesos de optimización, los cuales pueden ser manuales o utilizando herramientas computacionales, dependiendo de la complejidad en el análisis de la información. Para efectos de generalización de los parámetros, por medio de una metodología manual no se puede establecer una única solución, mientras que por medio de herramientas computacionales es más fácil encontrar una única respuesta.

Los primeros en intentar una calibración empleando herramientas computacionales son: Dawdy y O'Donnell (1965), Nash y Sutcliffe (1970), e Ibbitt (1970), entre otros. Adicionalmente al proceso de calibración va sujeto un análisis de sensibilidad e incertidumbre con el fin de establecer confianza en los resultados obtenidos.

El proceso de calibración consta de los siguientes pasos (Singh, 1995):

- Definición de la función Objetivo: Es una ecuación que se emplea para calcular una medida numérica de la diferencia entre los resultados del modelo simulado (generalmente el hidrograma de escorrentía) y los registrados en la cuenca de estudio. El propósito de la calibración del modelo es, encontrar los valores de los parámetros que optimizan (valores máximos o mínimos) el valor numérico de la función objetivo.



- **Optimización del Algoritmo:** El propósito es limitar el rango de valores que pueden tomar los parámetros, encontrar los valores apropiados máximos y/o mínimos de estos parámetros y de esta manera mejorar la confiabilidad de los resultados. Dentro de los métodos de búsqueda se encuentran locales y globales; los primeros tienen como propósito encontrar los valores mínimos de la función objetivo y a su vez se dividen en métodos de búsqueda directos y gradientes; mientras que los segundos diseñan eficientemente modelos para encontrar el valor mínimo de las funciones multimodales, las estrategias empleadas se basan en los siguientes criterios: criterio determinístico, criterio estocástico y/o una combinación de los dos determinístico y estocástico. Pero en la calibración de modelos hidrológicos no lineales, únicamente existen estudios realizados mediante el criterio estocástico y/o combinación de los dos.
- **Criterio de finalización:** El proceso iterativo debe especificar un punto para finalizar las iteraciones, donde la pendiente de la función sea cero y el valor de la función objetivo sea el menor. Una alternativa es emplear el método de la función de convergencia, la cual termina el proceso iterativo si la diferencia entre el valor actual y el próximo valor es menor o igual a 0.001; otro método es la convergencia de los parámetros, donde lo importante es determinar si la diferencia entre los parámetros es menor o igual a 0.001; MCAT utiliza un criterio de finalización que establece un número máximo de iteraciones que se pueden realizar, por lo tanto, si este número de iteraciones se excede el programa finaliza, a menos que el parámetro o la función de convergencia se encuentren primero. Para un método de búsqueda aleatorio, es normal emplear este criterio de finalización, y es el que se emplea en el presente trabajo.
- **Calibración de los datos:** Es muy importante tener en cuenta la cantidad y calidad de los datos, ya que afecta directamente los resultados obtenidos. Dependiendo de estas condiciones se puede analizar la sensibilidad de los parámetros; los posibles errores en el proceso de obtención de información disminuyen la confiabilidad de los parámetros estimados.
- **Proceso de Validación:** El propósito es encontrar cualquier imperfección, como por ejemplo: durante el proceso de calibración, en el análisis de las suposiciones del modelo seleccionado con el cual se calibran los datos, la selección de los parámetros, entre otros. Este método consiste en examinar el rendimiento de una parte de los datos que no se van a calibrar. En el presente trabajo no se va a realizar la validación de la información debido a que ya se tienen los registros de las cuencas, por lo

tanto, el paso a seguir es observar el ajuste del modelo con toda la información registrada.

- **Análisis de Sensibilidad:** El análisis de sensibilidad consiste en observar si un cambio en el valor del parámetro afecta con gran importancia el resultado, para este caso se dice que existe sensibilidad en los parámetros; pero si el valor del parámetro no afecta el resultado se dice que no existe sensibilidad.

#### **1.4.3. Confiabilidad en la estimación**

Existe cierta incertidumbre en la información y en los resultados obtenidos, los cuatro problemas que se presentan para analizar la incertidumbre son los siguientes (Singh, 1995):

1. Incertidumbre acerca de la estructura del modelo, que procesos incluye, cómo interactúan estos procesos y como se pueden caracterizar matemáticamente.
2. Incertidumbre en los parámetros del modelo, problemas en la identificación y calibración de los parámetros.
3. Incertidumbre asociada con las estimaciones de los comportamientos futuros, incertidumbre con la selección del modelo, los parámetros y los eventos.
4. Reducción de las incertidumbres críticas del modelo, a través del diseño cuidadoso de programas para monitorear y/o realizar experimentos.

Dentro de estos conceptos se tiene una incertidumbre natural, la cual se caracteriza por presentar cambios espaciales y temporales que interfieren en los procesos físicos durante la generación de escorrentía superficial; esta incertidumbre afecta directamente los datos de entrada, los parámetros del modelo y la estructura del modelo.

La incertidumbre en la cual se va a trabajar en el presente trabajo corresponde a la mencionada en el numeral 2, debido a que se van a calibrar los parámetros del modelo y realizar un análisis de la sensibilidad e incertidumbre de éstos.

Para realizar los diferentes análisis de incertidumbre se han planteado diferentes métodos, como por ejemplo (Singh, 1995): Monte Carlo Simulation (MCS), Latin Hypercube Simulation (LHS), Mean-Value First-Order Second-Moment Method (MFOSM), Advanced First-Order Second-Moment Method (AFOSM), Rosenblueth's Point Estimation Method y Harr's Point Estimation Method.

Para el análisis de la incertidumbre de los parámetros del modelo del Soil Conservation Service (SCS) se utilizará la metodología Monte Carlo Simulation (MCS), por medio de la cual se pueden realizar miles de simulaciones.

Estudios han demostrado que por medio de esta metodología se puede obtener una confianza en los resultados del 95%. Se ha desarrollado un componente para esta metodología (Beven & Binley, 1992), conocido como la metodología GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation methodology); propuesta inicialmente como un marco para la estimación de la incertidumbre de los modelos igualmente aceptables o conjuntos de parámetros.

La metodología seleccionada para realizar el análisis del ajuste y la incertidumbre en las estimaciones de los hidrogramas empleados y de la sensibilidad e identificabilidad de los parámetros de cada modelo fue la metodología GLUE (la cual se describirá en detalle en el numeral 4.2). Esta metodología permite diferenciar que tan probable es que un modelo genere resultados que describan adecuadamente el comportamiento del sistema en estudio. En el presente trabajo se empleará una herramienta desarrollada en MATLAB, que permite realizar el análisis GLUE empleando las simulaciones de Monte-Carlo, el Monte-Carlo Analysis Toolbox (MCAT), (Wagener et al., 2004).

Esta metodología es interesante y presenta varias ventajas sobre métodos estadísticos tradicionales de estimación paramétrica tales como métodos de mínimos cuadrados no lineales (NLS), como por ejemplo:

- No es necesario hacer suposiciones de distribuciones al determinar límites de confianza o de predicción.
- La no linealidad y las interacciones entre parámetros en las respuestas del modelo se manejan implícitamente en la metodología GLUE, la cual se centra en grupos de parámetros y no en parámetros individuales.
- Los errores en datos de entrada observados se manejan también en forma implícita en la metodología GLUE (Beven & Binley, 1992).

## 2. ZONA DE ESTUDIO

Las cuencas con las que se va trabajar son cuencas pequeñas (Microcuencas) debido a que en cuencas grandes la precipitación cambia sustancialmente, y en nuestro país no es la excepción; estas cuencas pertenecen al departamento del Valle del Cauca: río Lili, río Yumbo y río Meléndez, de forma oval - alargadas, poseen un alto porcentaje de población que se ve afectada por las crecientes presentadas en épocas de lluvia, su población depende de actividades económicas como: explotación minera y cultivo de caña de azúcar; topográficamente poseen un alto relieve con cambio de pendientes abruptas, por lo cual sus ríos son caudalosos y en épocas de lluvia es frecuente el desbordamiento de estos. Estas cuencas se caracterizan por tener un clima seco en la parte baja, clima semiseco en la parte media y un clima frío en la parte alta, con temperaturas medias que fluctúan entre los 26°C en la parte baja, 18°C en la parte media y 15°C en la parte alta (clima húmedo en la parte alta sin períodos secos bien definidos).

Una característica muy importante de estas cuencas es que por ser cuencas pequeñas, con alto relieve y con un sistema de drenaje “rico”, son propicias para que los ríos aumenten de caudal rápidamente una vez se ha presentado el evento de lluvia, es decir que se manejan tiempos de concentración -  $T_c$  - cortos.

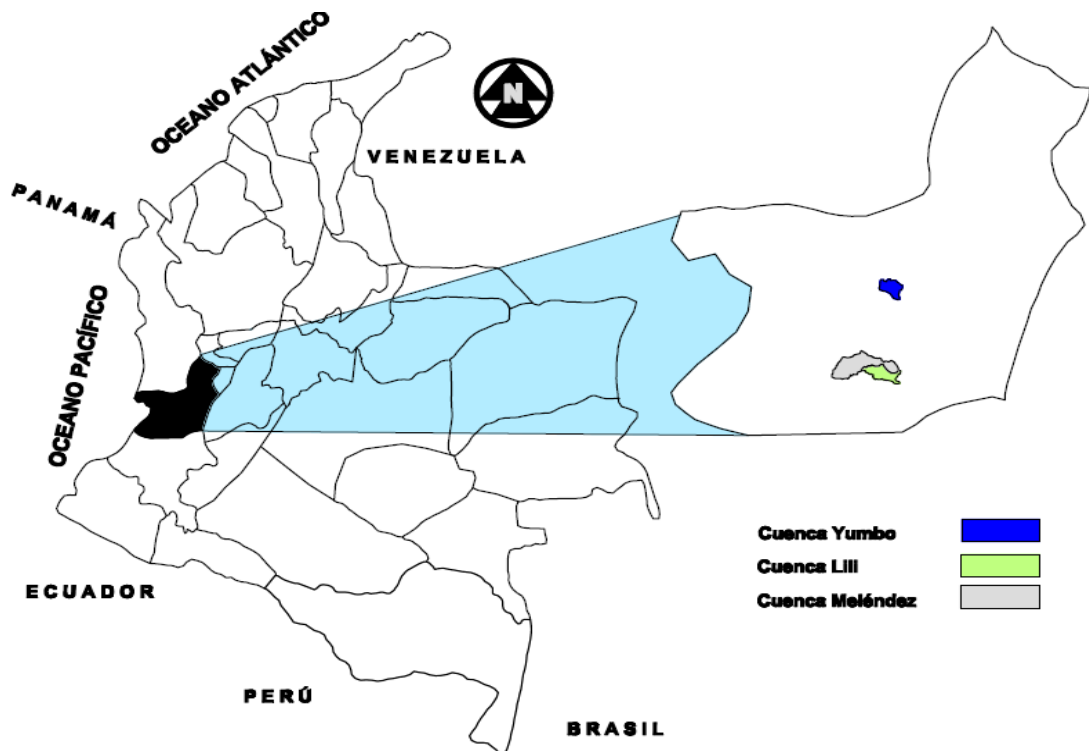


Figura 10. Localización de las cuencas del Valle del Cauca.

## 2.1. Cuenca del río Yumbo

### 2.1.1. Localización

Se encuentra ubicada en el flanco oriental de la cordillera occidental. Limita por el norte con la unidad de manejo de las cuencas Vijes - Mediacanoa, por el sur con la unidad de manejo de las cuencas Pance – Meléndez – Cali – Aguacatal, por el occidente con la vertiente del Pacífico y por el oriente con el valle geográfico del río Cauca.

El área de la cuenca considerada en este estudio se ha delimitado hasta la estación limnigráfica Paso Ancho.

### 2.1.2. Características morfométricas

Las características morfométricas ayudan a entender en gran parte el comportamiento hidrológico de una cuenca, por medio de las cuales el análisis del almacenamiento de agua, tiempos de concentración, pendientes del cauce principal y cobertura vegetal, entre otras, juegan un papel muy importante en la estimación de la escorrentía superficial. Adicionalmente, estas características son también datos de entrada a los modelos que se van a emplear en el presente trabajo.

En la Tabla 5 se muestra un resumen donde se plasman los aspectos más relevantes dentro de la cuenca como son:

**Tabla 5.** Características morfométricas de la cuenca hidrográfica del río Yumbo.

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
Área	km <sup>2</sup>	13.45
Perímetro	km	16.95
Ancho de la cuenca	km	1.97
Longitud axial	km	5.81
Longitud del río principal	km	6.66
Longitud al Centroide	km	3.90
Factor de forma		0.29
Coefficiente de compacidad		1.30
Pendiente de ladera	%	25.97
Pendiente del cauce	%	8.74

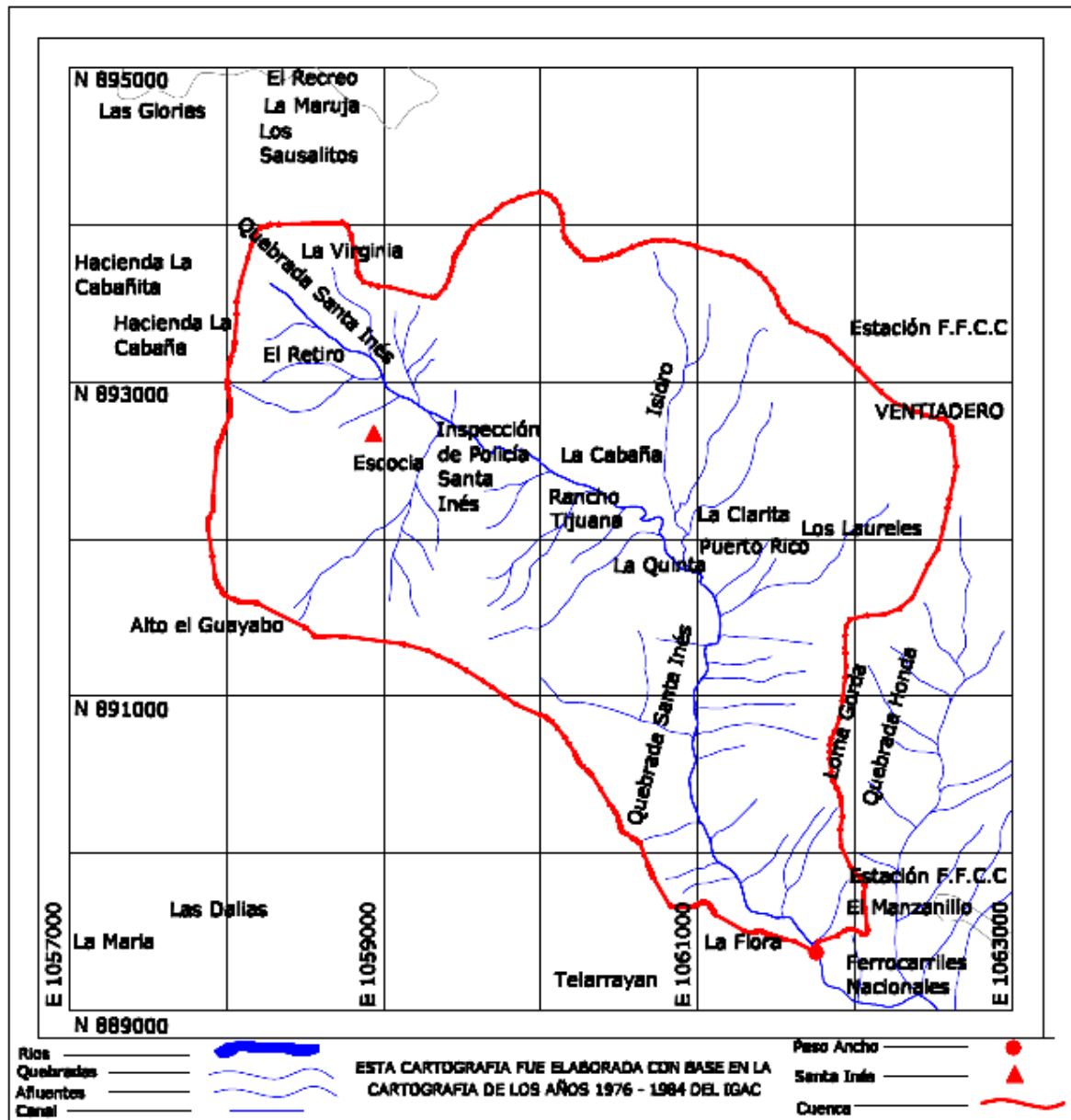


Figura 11. Plano de la cuenca del río Yumbo.

### 2.1.3. Descripción climática de la zona

En la Tabla 6 se presentan los valores totales mensuales de precipitación de la estación Santa Inés.

NOMBRE: Santa Inés	TIPO: PG
CÓDIGO: 2622600101	MUNICIPIO: Yumbo
ELEVACIÓN: 1511 m.s.n.m	DEPARTAMENTO: Valle del Cauca
CORRIENTE: Quebrada Santa Inés	FECHA INSTALACIÓN: 01/06/1971

Tabla 6. Valores totales mensuales de precipitación (mm).

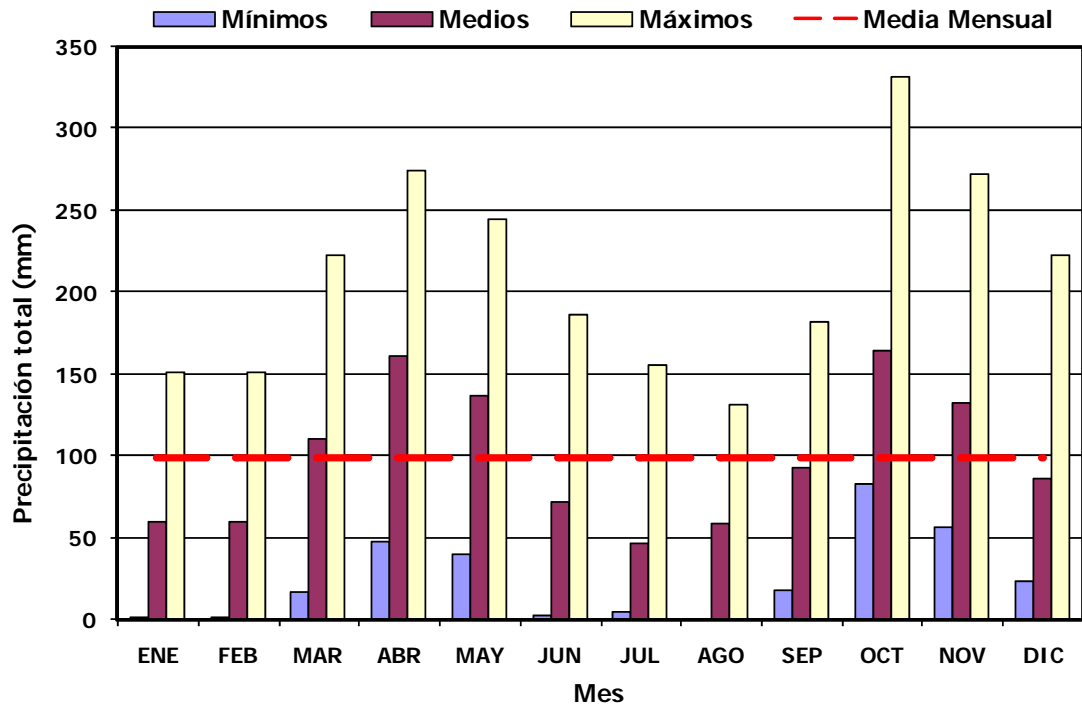
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1971						41	21	110	97	157	84	79	(589)
1972	88	88	59	107	175	42	5	43	56	168	56	50	937
1973	2	2	122	98	69	98	72	100	110	139	145	102	1059
1974	103	103	222	199	127	49	54	20	73	137	133	88	1308
1975	17	17	98	67	156	45	155	103	93	217	150	95	1213
1976	50	50	105	91	100	55	25	38	20	231	145	85	995
1977	20	20	106	111	105	100	10	61	87	186	153	62	1021
1978	28	28	131	198		28	32	60	111	152	94	135	(997)
1979	50	50	71	173	160	91	56	131	122	170	111	104	1289
1980	28	28	47	64	104	117	17	78	100	128	144	102	957
1981	43	43	58	274	233	81	46	63	60	184	121	107	1313
1982	122	122	138	238	245	12	13	1	66	163	69	87	1276
1983	22	22	156	190	111	99	37	16	18	91	107	124	993
1984	145	145	122	144	199	86	79	107	156	174	161	25	1543
1985	57	57	51	67	102	118	24	120	150	161	136	38	1081
1986	151	151	137	176	138	129	22	60	40	332	147	58	1541
1987	18	18	92	130	175	2	81	50	116	236	77	76	1071
1988	40	40	26	120	151	186	73	33	121	172	272	100	1334
1989	61	61	101	74	151	92	44	92	62	120	135	119	1112
1990	54	54	60	119	50	7	19	20	25	201	97	169	875
1991	41	41	188	259	157	15	60	19	138	86	180	55	1239
1992	70	70	94	48	172	26	36	58	119	83	113	109	998
1993	63	63	124	185	172	8	22	46	117	92	171	44	1107
1994	77	77	148	251	113	34	113	65	124	293	142	69	1506
1995	9	9	70	240	114	96	97	104	85	189	106	81	1200
1996	63	63	223	75	204	115	32	116	55	196	154	92	1388
1997	77	77	177	181	87	115	17	0	64	94	246	40	1175
1998	1	1	151	193	204	86	77	63	182	105	173	67	1303
1999	130	130	51	249	99	162	29	46	178	237	185	223	1719
2000	53	53	118	143	150	46	41	30	104	243	159	56	1196
2001	49	49	87	97	65	16	25	1	181	85	112	136	903
2002	25	25	186	222	40	101	79	43	51	204	113	73	1162
2003	19	19	101	183	108	127	73	83	71	139	131	45	1099
2004	126	126	17	156	138	25	43	12	79	109	120	23	974
2005	67	67	71	231	164	34	45	54	26	109	103	55	1026
2006	69	69	136	207	92	139	8	26	53	139	59	107	1104
2007	96	96	123	226	138	50	53	81	101	168	93	120	1345
<b>Medio</b>	59	59	110	161	136	72	47	58	92	165	132	86	<b>1179</b>
<b>Máximo</b>	151	151	223	274	245	186	155	131	182	332	272	223	<b>332</b>
<b>Mínimo</b>	1	1	17	48	40	2	5	0	18	83	56	23	<b>0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 12 se presenta el resumen de los valores multianuales de precipitación total de la estación Santa Inés.



**Figura 12.** Valores multianuales de precipitación total.

En la Tabla 7 se presentan los valores máximos en 24 horas de precipitación registrados en la estación Santa Inés.



Tabla 7. Valores máximos en 24 horas de precipitación (mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1971						10	10	12	30	30	30	20	(30)
1972	40	32	15	40	38	24	2	25	30	50	32	21	50
1973	2	9	52	28	15	37	31	20	26	20	23	16	52
1974	26	45	43	69	20	15	20	20	30	22	43	25	69
1975	8	15	25	20	53	20	25	25	28	37	25	25	53
1976	30	30	36	30	25	25	25	23	15	48	50	25	50
1977	10	15	35	30	30	35	5	10	30	54	63	25	63
1978	13	41	40	30		6	9	20	44	30	43	22	(44)
1979	15	13	20	41	22	21	13	37	27	57	27	57	57
1980	9	49	15	20	43	40	6	51	52	16	40	20	52
1981	15	17	12	38	42	17	13	17	12	40	35	40	42
1982	40	27	32	30	47	5	5	1	26	24	20	40	47
1983	19	7	33	29	30	33	20	6	10	20	20	37	37
1984	40	36	30	30	45	20	22	23	62	24	50	20	62
1985	14	2	16	16	30	59	13	24	26	49	31	15	59
1986	45	25	48	46	33	35	12	36	10	38	37	46	48
1987	6	16	49	33	30	1	36	23	50	36	40	17	50
1988	37	23	14	14	50	30	20	15	38	34	58	37	58
1989	14	30	30	23	24	25	30	32	31	35	42	37	42
1990	13	39	27	30	12	3	8	10	10	36	47	46	47
1991	30	6	41	66	36	3	23	8	27	37	53	11	66
1992	39	22	28	14	32	7	14	52	23	26	42	40	52
1993	36	25	28	61	54	3	11	19	17	29	24	13	61
1994	21	30	22	47	21	20	21	21	56	79	31	31	79
1995	6	3	24	69	25	25	39	25	31	55	24	42	69
1996	18	43	49	19	28	29	14	35	14	53	46	30	53
1997	20	10	33	64	21	45	10	0	16	36	51	29	64
1998	1	40	45	45	53	20	28	21	55	28	69	23	69
1999	36	41	18	39	19	41	8	11	42	45	44	40	45
2000	14	38	28	31	27	17	7	11	31	49	44	34	49
2001	16	17	25	27	14	10	6	1	44	16	23	33	44
2002	8	13	35	47	13	36	28	21	22	63	37	28	63
2003	8	22	53	42	30	44	29	38	19	22	42	25	53
2004	30	12	7	39	34	8	26	5	19	33	32	14	39
2005	28	18	30	89	37	9	30	36	10	23	36	29	89
2006	24	26	34	45	29	28	4	11	10	30	12	19	45
2007	40	15	35	60	30	12	20	20	86	25	30	39	86
<b>Medio</b>	21	24	31	39	31	22	17	21	30	36	38	29	<b>28</b>
<b>Máximo</b>	45	49	53	89	54	59	39	52	86	79	69	57	<b>89</b>
<b>Mínimo</b>	1	2	7	14	12	1	2	0	10	16	12	11	<b>0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 13 se presenta el resumen de los valores máximos en 24 horas de precipitación registrados en la estación Santa Inés.

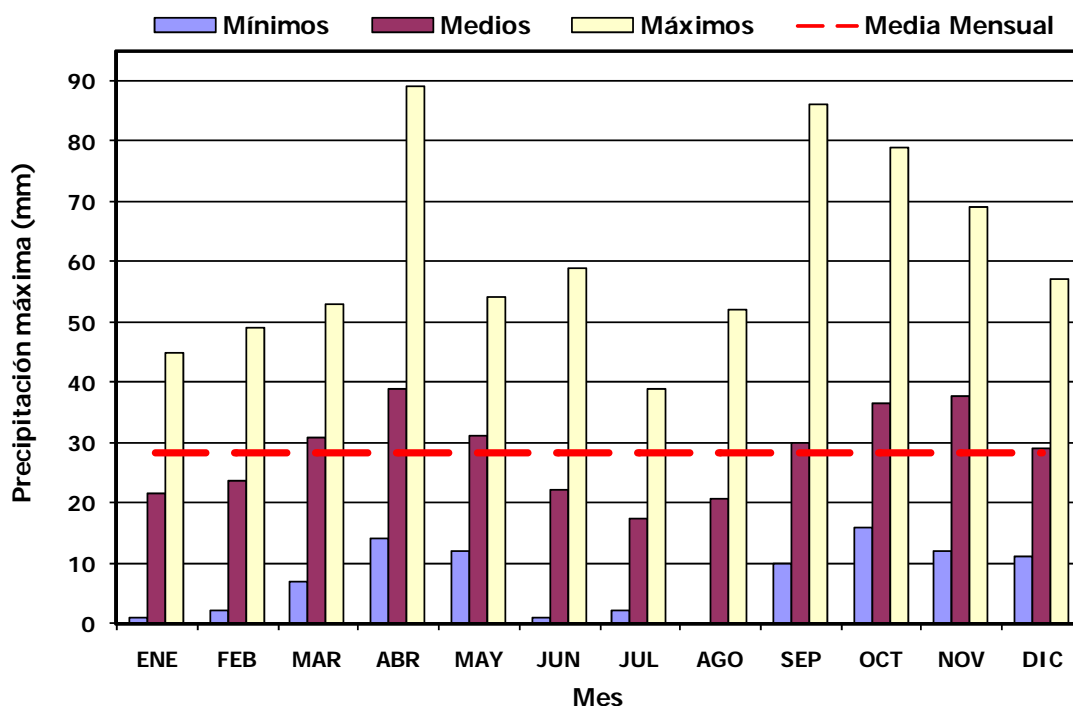


Figura 13. Valores máximos en 24 horas de precipitación.

Adicionalmente, la evaporación total anual en (mm) es 1076.79, el brillo medio mensual es 3.79 horas y la temperatura media anual es 21.40 °C.

En la Tabla 8 se presentan los valores medios mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

#### Estación Paso Ancho

<b>NOMBRE:</b> Paso Ancho	<b>TIPO:</b> LG
<b>CÓDIGO CVC:</b> 2622600401	<b>MUNICIPIO:</b> Yumbo
<b>ELEVACIÓN:</b> 1112 m.s.n.m	<b>DEPARTAMENTO:</b> Valle del Cauca
<b>CORRIENTE:</b> Quebrada Santa Inés	<b>FECHA INSTALACIÓN:</b> 01/04/1986

Tabla 8. Valores medios de caudal (m<sup>3</sup>/s).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1986				0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.3	0.4	0.2	(0.2)
1987	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2
1988	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.6	0.4	0.2	0.3	0.3	0.6	0.5	0.3
1989	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2
1990	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
1991	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2								(0.1)
1997											0.3	0.1	(0.2)
1998	1.1	1.0	1.6	0.9	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.5
1999	0.3	0.4	0.3	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.6	0.7	0.4	0.4
2000	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.3
2001	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
2002	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2
2003	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2004	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1		(0.1)
2005	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
2006	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
2007	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3
<b>Medio</b>	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	<b>0.2</b>
<b>Máximo</b>	1.1	1.0	1.6	0.9	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.6	0.7	0.5	<b>1.6</b>
<b>Mínimo</b>	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	<b>0.0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 14 se presenta el resumen de los valores medios mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

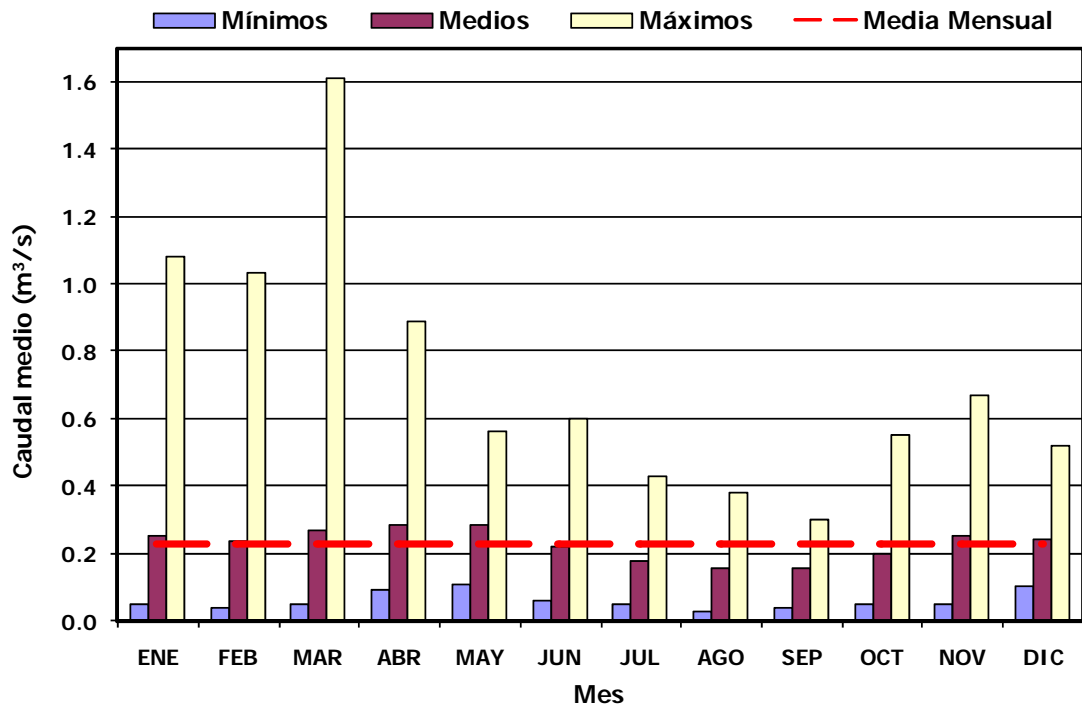


Figura 14. Valores medios mensuales de caudal.

En la Tabla 9 se presentan los valores máximos mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

**Tabla 9.** Valores máximos de caudal (m<sup>3</sup>/s).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1986				1.6	3.6	5.2	0.3	0.4	0.2	4.0	3.6	1.9	(5.2)
1987	0.3	0.4	2.2	1.5	3.6	0.2	2.6	0.8	0.8	16.2	3.0	1.2	16.2
1988	0.4	0.4	0.1	1.0	14.4	4.9	1.2	0.4	8.1	27.6	9.2	3.0	27.6
1989	1.5	3.5	2.2	2.5	3.6	1.4	0.4	0.9	0.7	3.6	3.7	16.1	16.1
1990	2.2	3.6	0.4	7.4	2.5	0.4	0.2	0.1	0.2	0.6	4.9	8.6	8.6
1991	0.8	0.1	6.9	13.5	4.5								(13.5)
1997											11.1	6.6	(11.1)
1998	1.9	4.8	11.4	44.0	8.4	3.3	0.6	0.7	3.2	0.2	4.8	0.8	44.0
1999	3.2	4.0	0.4	13.2	10.4	1.0	0.4	1.0	0.4	29.2	9.2	12.7	29.2
2000	0.9	1.0	3.7	1.5	7.1	0.2	0.4	0.3	0.4	14.1	6.9	0.3	14.1
2001	0.3	1.5	4.7	2.2	1.6	0.2	0.1	0.1	14.7	0.2	1.2	4.3	14.7
2002	1.3	12.0	18.9	26.4	1.0	3.3	2.8	0.2	0.3	2.5	8.4	3.2	26.4
2003	0.2	0.7	2.9	3.1	2.4	1.4	5.5	0.2	0.7	1.0	5.9	0.6	5.9
2004	3.5	0.2	0.1	0.1	2.2	0.2	0.1	0.0	0.2	0.3	0.1		(3.5)
2005	0.1	0.1	0.1	2.5	2.5	0.4	0.1	0.4	0.1	0.3	0.3	0.1	2.5
2006	0.4	0.1	0.5	0.7	4.5	0.6	0.3	0.5	0.3	0.5	0.4	0.7	4.5
2007	0.4	0.3	0.3	4.2	1.5	0.6	0.6	0.3	1.8	1.7	1.5	2.6	4.2
<b>Medio</b>	1.2	2.2	3.7	7.8	4.6	1.5	1.0	0.4	2.1	6.8	4.6	4.2	<b>3.3</b>
<b>Máximo</b>	3.5	12.0	18.9	44.0	14.4	5.2	5.5	1.0	14.7	29.2	11.1	16.1	<b>44.0</b>
<b>Mínimo</b>	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	<b>0.0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 15 se presenta el resumen de los valores máximos mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

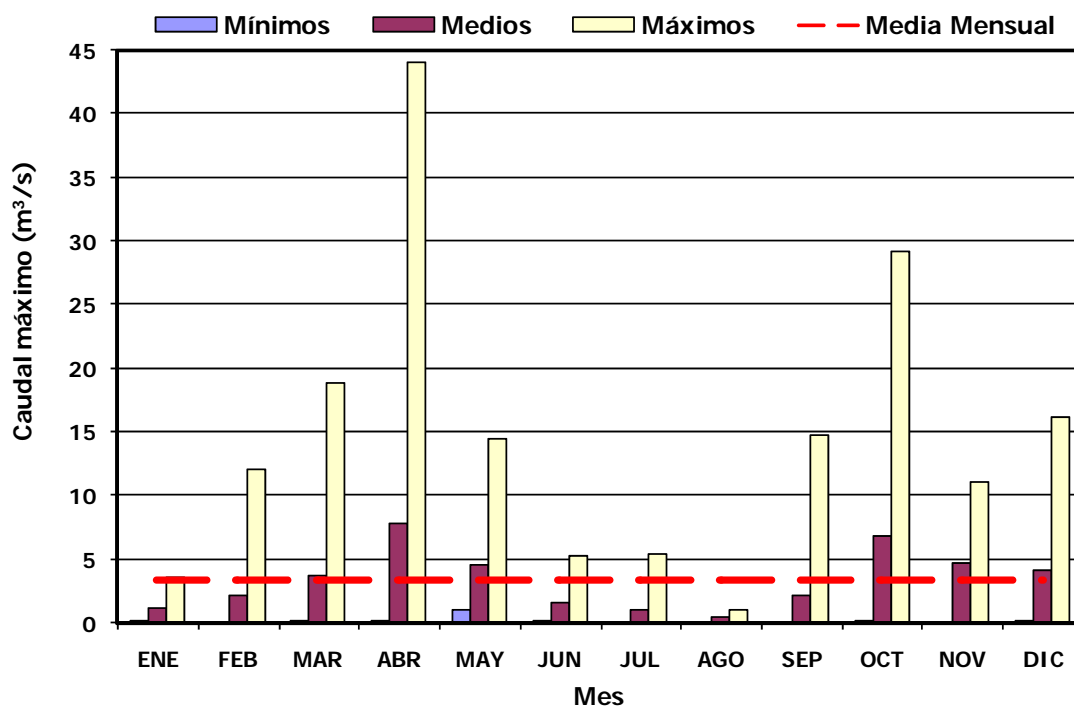


Figura 15. Valores máximos mensuales de caudal.

Con base en la información de caudal y precipitación, se observa que la cuenca presenta un comportamiento bimodal con un mínimo de precipitación en julio y/o agosto, y valores máximos de precipitación en el primer semestre del año en los meses marzo y/o junio, y en el segundo semestre en los meses agosto y/o diciembre. Estos dos periodos de lluvia máximos que se presentan en la cuenca indican que en estos meses el valor del caudal es el máximo que se puede presentar.

## 2.2. Cuenca del río Lili

### 2.2.1. Localización

Toda su cuenca hidrográfica se encuentra dentro del corregimiento de la Buitrera. Entre sus afluentes se encuentran las quebradas La Herradura, Hoyofrio y Cañasgordas. Limita al norte y occidente con la cuenca del río Meléndez, al sur con la cuenca del río Pance y el oriente con el casco urbano del municipio de Santiago de Cali.

El área de la cuenca hasta la desembocadura del río Lili en el casco urbano del municipio de Santiago de Cali es de 25,07 km<sup>2</sup>, sin embargo, el área de la cuenca considerada en este estudio se ha delimitado hasta la estación limnográfica Paso Ancho.

### 2.2.2. Características morfométricas

En la Tabla 10 se muestra un resumen donde se plasman los aspectos más relevantes dentro de la cuenca como son:

**Tabla 10.** Características morfométricas de la cuenca hidrográfica del río Lili.

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
Área	km <sup>2</sup>	17.24
Perímetro	km	24.65
Ancho de la cuenca	km	1.73
Longitud axial	km	7.27
Longitud del río principal	km	9.92
Longitud al centroide	km	5.20
Factor de forma		0.17
Coefficiente de compacidad		1.67
Pendiente de ladera	%	23.89
Pendiente del cauce	%	3.76

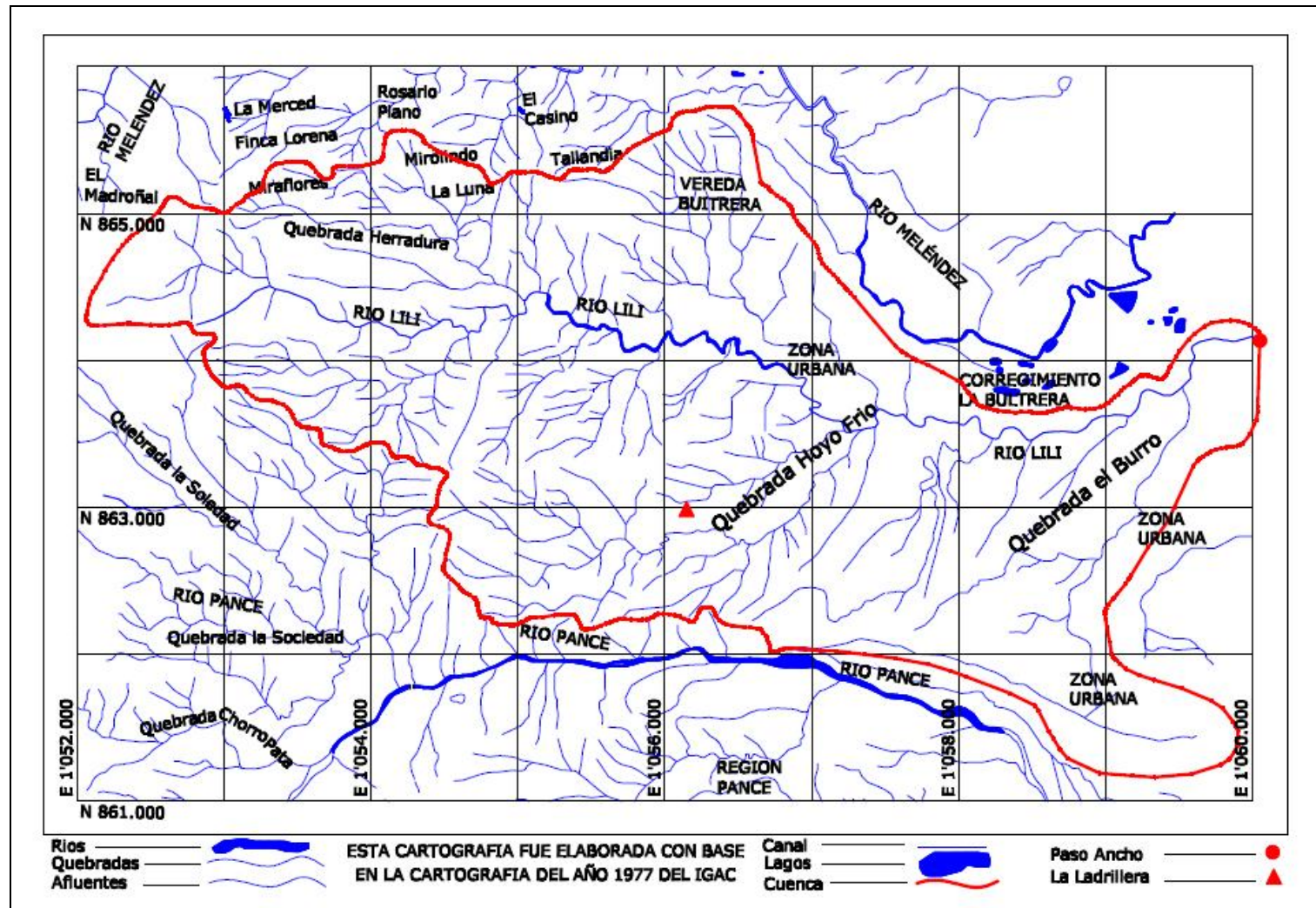


Figura 16. Plano de la cuenca del río Lili.





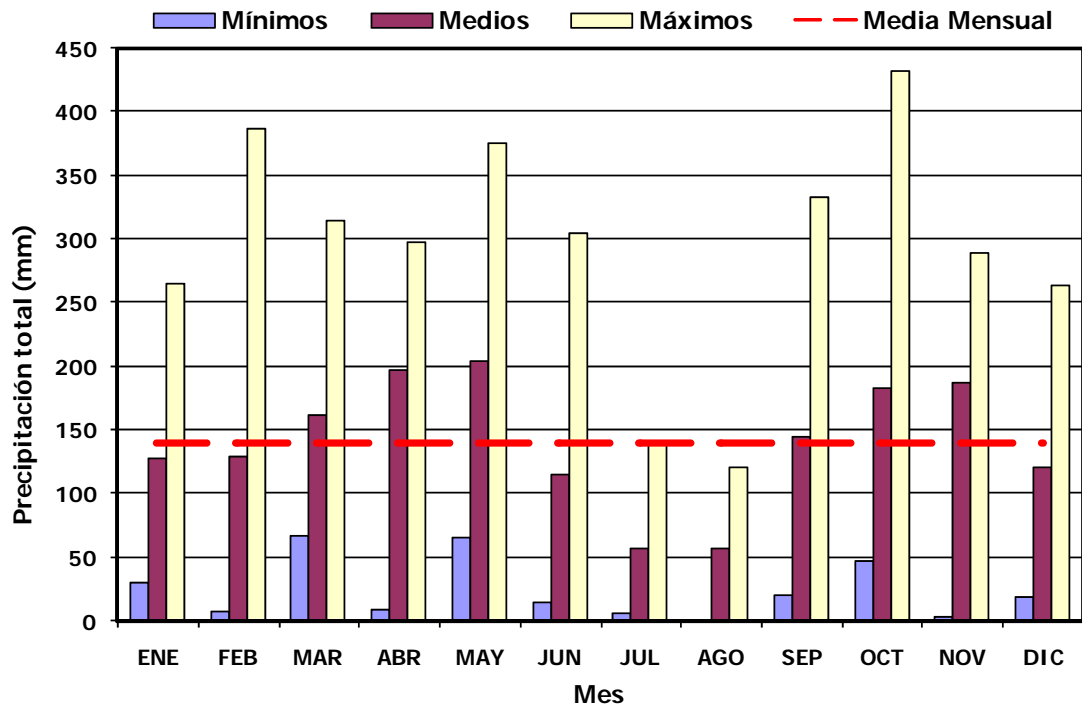


Figura 17. Valores multianuales de precipitación total.

En la Tabla 12 se presentan los valores máximos en 24 horas de precipitación registrados en la estación La Ladrillera.

**Tabla 12.** Valores máximos en 24 horas de precipitación (mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>1982</b>											3	52	52
<b>1983</b>	24	4	132	37	40	17	28	4	38	31	18	45	132
<b>1984</b>	26	77	14	54	50	57	45	18	69	42	56	39	77
<b>1985</b>	55	7	40	32	41	20	19	21	45	44	68	74	74
<b>1986</b>	25	44	28	73	55	84	0	31	51	70	38	21	84
<b>1987</b>	31	26	20	107	27	27	8	37	34	54	193	23	193
<b>1988</b>	20	34	62	50	28	42	34	49	42	39	55	50	62
<b>1989</b>	42	49	31	62	33	24	12	39	31	51	47	51	62
<b>1990</b>	20	31	53	69	29	20	13	15	8	43	14	72	72
<b>1991</b>	42	28	60	28	69	61	44	2	89	15	41	11	89
<b>1992</b>	12	42	36	23	38	43	10	18	23	29	50	22	50
<b>1993</b>	29	52	51	67	64	6	29	28	81	37	38	27	81
<b>1994</b>	39	60	70	42	78	7	15	11	34	54	62	43	78
<b>1995</b>	62	24	120	37	30	40	30	14	25	43	38	87	120
<b>1996</b>	28	10	55	54	50	37	31	16	41	95	53	68	95
<b>1997</b>	46	36	44	63	37	74	6	0	39	28	26	16	74
<b>1998</b>	0	90	76	54	70	23	20	8	50	33	37	48	90
<b>1999</b>	44	66	52	47	20	26	27	44	37	34	28	34	66
<b>2000</b>	34	52	26	30	77	29	7	57	89	25	34	13	89
<b>2001</b>	44	47	70	58									(70)

<b>Medio</b>	33	41	55	52	46	35	21	23	46	42	47	42	<b>40</b>
<b>Máximo</b>	62	90	132	107	78	84	45	57	89	95	193	87	<b>193</b>
<b>Mínimo</b>	0	4	14	23	20	6	0	0	8	15	3	11	<b>0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 18 se presenta el resumen de los valores máximos en 24 horas de precipitación registrados en la estación La Ladrillera.

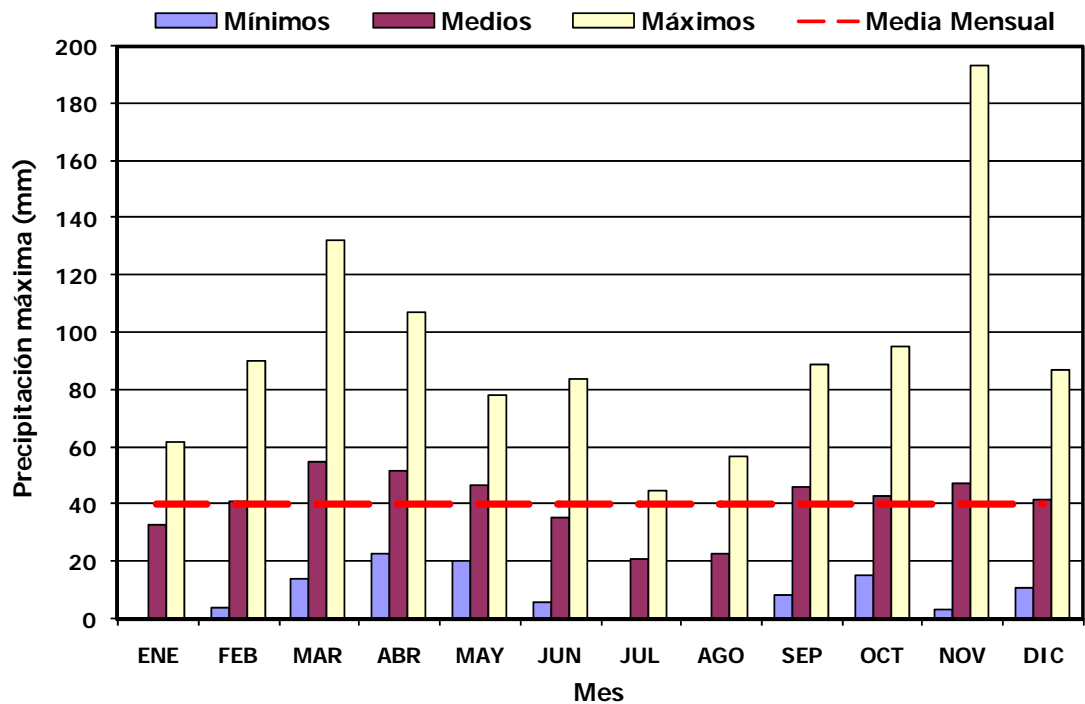


Figura 18. Valores máximos en 24 horas de precipitación.

Adicionalmente, la evaporación total anual en (mm) es 1377.89, el brillo medio mensual es 4.8 horas y la temperatura media anual es 23.30 °C.

En la Tabla 13 se presentan los valores medios mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

#### Estación Paso Ancho

**NOMBRE:** Paso Ancho  
**CÓDIGO CVC:** 2622310403  
**ELEVACIÓN:** 976.81 m.s.n.m  
**CORRIENTE:** Río Lili

**TIPO:** LG  
**MUNICIPIO:** Cali  
**DEPARTAMENTO:** Valle del Cauca  
**FECHA INSTALACIÓN:** 01/08/1994

**Tabla 13.** Valores medios de caudal (m<sup>3</sup>/s).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>1994</b>								0.3	0.1	0.3	0.5	0.4	(0.3)
<b>1995</b>	0.6	0.3	0.6	0.7	0.9	0.8	0.6	0.5	0.3	0.3	0.2	0.6	0.5
<b>1996</b>	0.3	0.3	0.4	0.6	0.9	0.8	0.4	0.3	0.3	0.8	0.4	0.5	0.5
<b>1997</b>	1.0	0.9	0.5	1.1	0.9	1.5	0.4	0.2	0.4	0.3	0.5		(0.7)
<b>1998</b>			0.4	0.6	1.1	0.8	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.6	(0.5)
<b>1999</b>	0.6	1.4	1.1	0.9	0.8	0.5	0.3	0.4	0.5	0.7	0.7	0.8	0.7
<b>2000</b>	0.7	0.7	0.6	0.7	1.1	0.7	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5
<b>2001</b>	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5	0.3	0.3	0.1	0.2	0.4	0.4	0.7	0.4
<b>2002</b>	0.4	0.2	0.9	1.1	0.7	0.3	0.3	0.2	0.1	0.4	0.9	0.7	0.5
<b>2003</b>	0.3	0.3	0.3	0.6	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4	0.7	0.6	0.4
<b>2004</b>	1.7	0.5	0.3	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2		0.2	0.6	0.3	(0.5)
<b>2005</b>	0.3	0.4	0.7	0.8	1.1	0.5	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5
<b>2006</b>	0.8	1.3	0.8	0.8	1.0	0.9	0.3	0.2	0.2	0.3	1.0	1.2	0.7
<b>2007</b>	0.4	0.3	0.3	0.5	0.7	0.3	0.1	0.3	0.0	0.6	0.3	0.8	0.4
<b>Medio</b>	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	<b>0.5</b>
<b>Máximo</b>	1.7	1.4	1.1	1.1	1.1	1.5	0.6	0.5	0.5	0.8	1.0	1.2	<b>1.7</b>
<b>Mínimo</b>	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2	0.3	<b>0.0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 19 se presenta el resumen de los valores medios mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

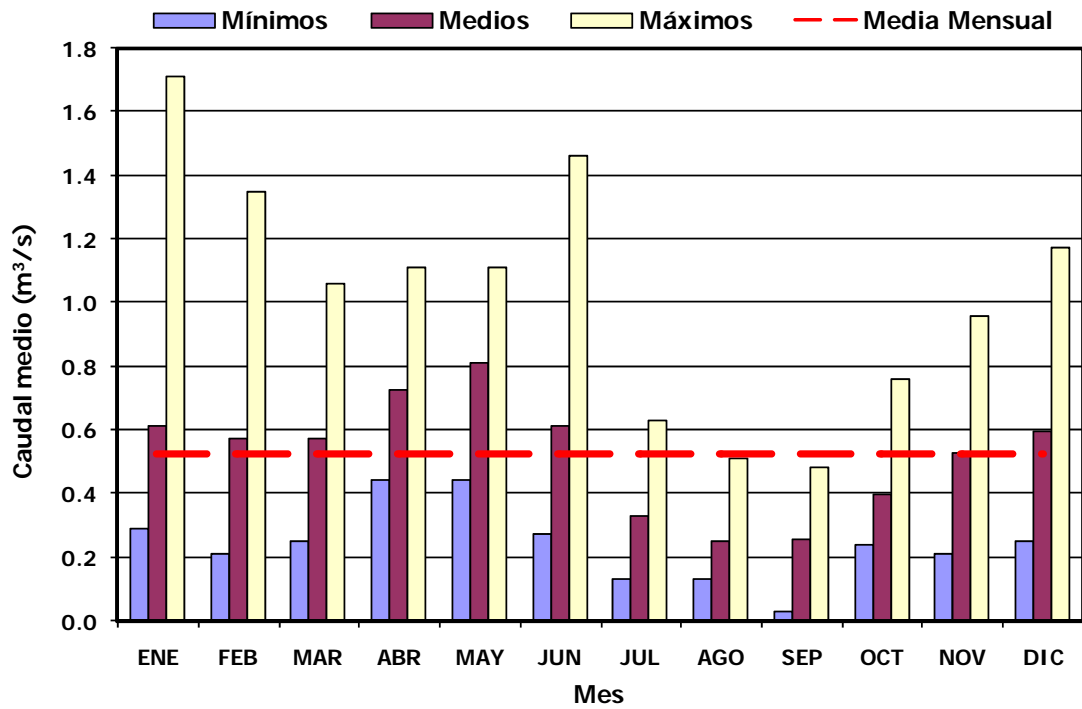


Figura 19. Valores medios mensuales de caudal.

En la Tabla 14 se presentan los valores máximos mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

Tabla 14. Valores máximos de caudal (m<sup>3</sup>/s).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1994								0.3	1.7	5.3	5.3	2.2	(5.3)
1995	19.7	0.7	27.0	6.1	6.4	13.5	17.5	2.3	5.7	4.4	1.4	55.4	55.4
1996	0.6	1.8	9.3	18.2	22.0	41.4	4.0	1.6	4.5	53.9	3.9	20.3	53.9
1997	22.4	21.9	8.5	30.3	10.8	34.2	0.9	0.3	9.7	3.1	5.5		(34.2)
1998			8.4	6.6	15.5	4.9	4.6	3.9	8.3	4.7	4.6	17.2	(17.2)
1999	10.6	28.6	17.6	9.5	12.5	13.6	3.3	6.2	3.1	15.7	12.5	5.6	28.6
2000	9.6	17.0	5.2	5.2	12.2	7.3	0.7	5.1	8.4	1.8	5.4	4.7	17.0
2001	6.3	14.3	19.9	7.3	16.8	2.3	6.4	0.3	0.7	1.8	4.7	17.3	19.9
2002	4.2	0.5	10.0	15.7	1.0	0.4	4.7	2.6	0.8	5.5	11.8	4.3	15.7
2003	1.2	5.9	1.2	5.2	4.8	1.0	0.4	0.5	4.3	16.5	9.5	4.4	16.5
2004	20.8	0.7	0.5	5.7	6.1	2.0	2.1	0.2		4.3	11.4	3.1	(20.8)
2005	5.7	4.7	28.6	13.8	10.7	14.9	2.5	0.7	2.7	5.4	24.8	9.1	28.6
2006	12.5	13.7	11.9	7.8	28.1	10.6	2.7	1.4	0.8	1.0	7.3	26.2	28.1
2007	4.2	1.7	4.5	8.4	25.1	1.6	4.7	0.3	0.0	16.0	1.4	8.4	25.1
<b>Medio</b>	9.8	9.3	11.7	10.7	13.2	11.3	4.2	1.8	3.9	10.0	7.8	13.7	<b>9.0</b>
<b>Máximo</b>	22.4	28.6	28.6	30.3	28.1	41.4	17.5	6.2	9.7	53.9	24.8	55.4	<b>55.4</b>
<b>Mínimo</b>	0.6	0.5	0.5	5.2	1.0	0.4	0.4	0.2	0.0	1.0	1.4	2.2	<b>0.0</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 20 se presenta el resumen de los valores máximos mensuales de caudal de la estación Paso Ancho.

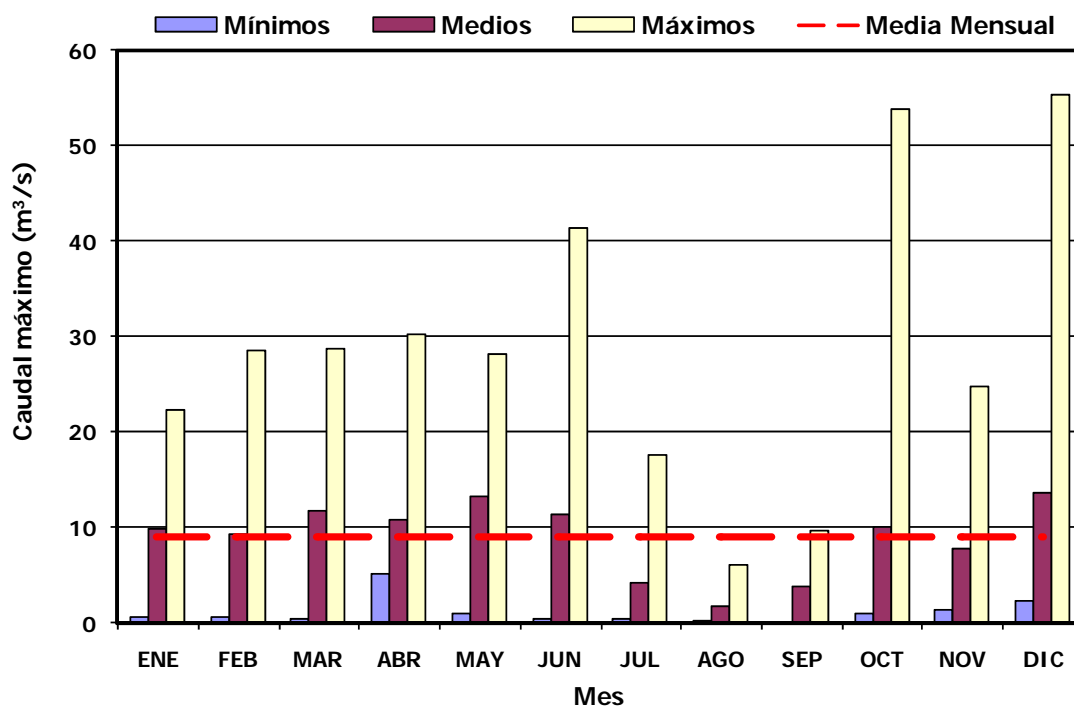


Figura 20. Valores máximos mensuales de caudal.

Con base en la información de caudal y precipitación, se observa que la cuenca presenta un comportamiento bimodal con un mínimo de precipitación en julio y/o agosto, y valores máximos de precipitación en el primer semestre del año en los meses febrero y/o mayo, y en el segundo semestre en los meses septiembre y/o diciembre. Estos dos periodos de lluvia máximos que se presentan en la cuenca indican que en estos meses el valor del caudal es el máximo que se puede presentar.

## 2.3. Cuenca del río Meléndez

### 2.3.1. Localización

Se encuentra ubicada en el flanco oriental de la cordillera occidental. Limita por el norte con la unidad de manejo de las cuencas Yumbo - Arroyohondo, por el sur con la unidad de manejo de las cuencas Jamundí - Claro - Timba, por el occidente con la vertiente del pacífico y por el oriente con el valle geográfico del río cauca.

La cuenca posee los siguiente límites hidrográficos: en el norte con cuenca de los ríos Pichindé y Cañaveralejo; en el sur con cuenca de los ríos Pance y Lili; al oriente con la cuenca del río Cañaveralejo y el casco urbano del municipio de Cali; y al occidente con la cuenca de los ríos Pance y Pichindé. A través de los 20.15



km de recorrido (ancho de la cuenca), el río recibe un gran número de tributarios, dentro de las cuales se destacan las quebradas: El Carmen, Dosquebradas y El Cascarillal, entre otras.

El área de la cuenca considerada en este estudio se ha delimitado hasta la estación limnigráfica Calle Quinta.

### 2.3.2. Características morfométricas

En la Tabla 15 se muestra un resumen donde se plasman los aspectos más relevantes dentro de la cuenca como son:

**Tabla 15.** Características morfométricas de la cuenca hidrográfica del río Meléndez.

ÍTEM	UNIDAD	VALOR
Área	km <sup>2</sup>	40.21
Perímetro	km	38.66
Ancho de la cuenca	km	2.00
Longitud axial	km	13.56
Longitud del río principal	km	19.97
Longitud al Centroide	km	12.72
Factor de forma		0.10
Coefficiente de compacidad		1.72
Pendiente de ladera	%	33.19
Pendiente del cauce	%	5.26

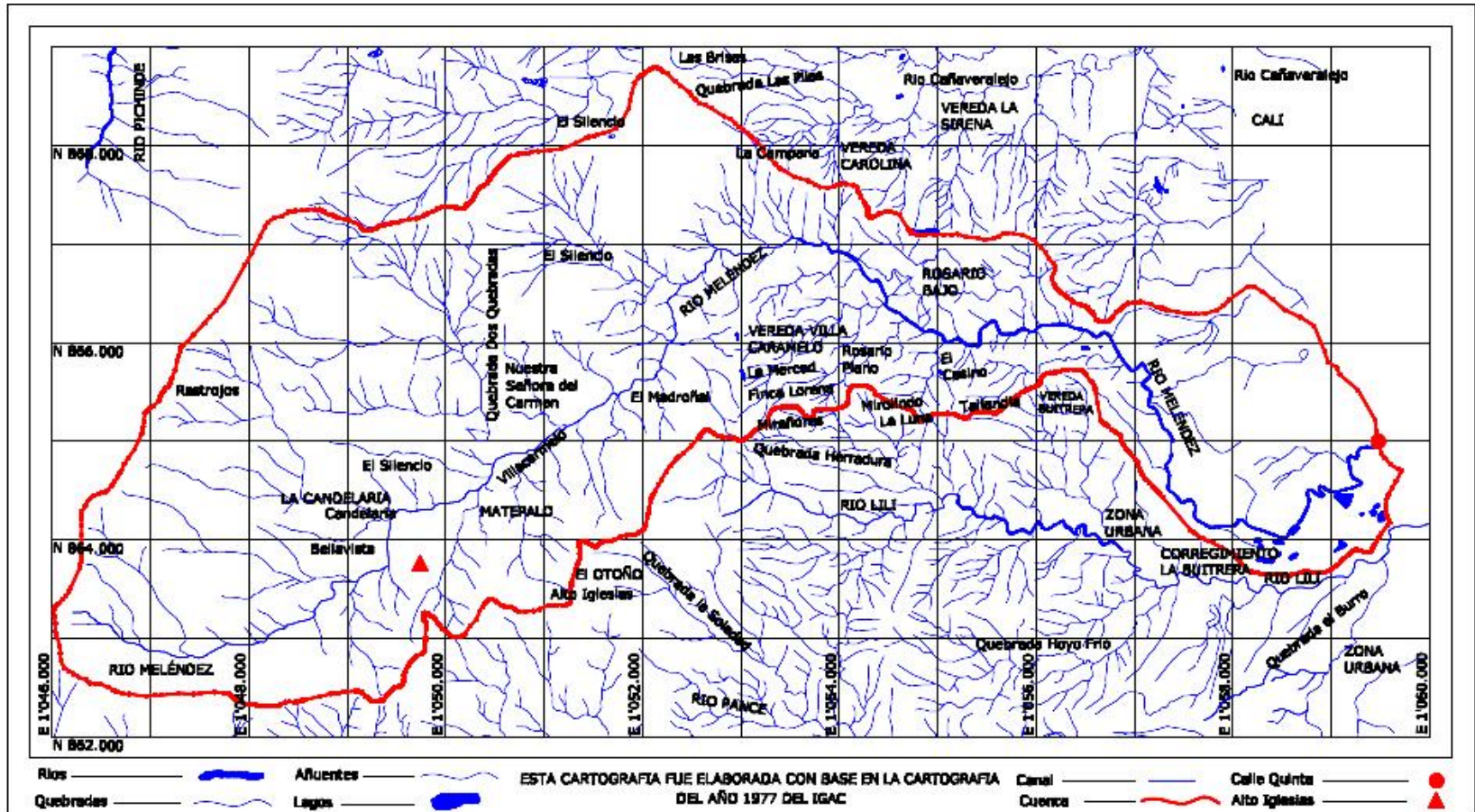


Figura 21. Plano de la cuenca del río Meléndez.

### 2.3.3. Descripción climática de la zona

En la Tabla 16 se presentan los valores totales mensuales de precipitación de la estación Alto Iglesias.

**NOMBRE:** Alto Iglesias **TIPO:** PG  
**CÓDIGO:** 2622320103 **MUNICIPIO:** Cali  
**ELEVACIÓN:** 1705 m.s.n.m **DEPARTAMENTO:** Valle del Cauca  
**CORRIENTE:** Río Meléndez **FECHA INSTALACIÓN:** 01/02/1981

**Tabla 16.** Valores totales mensuales de precipitación (mm).

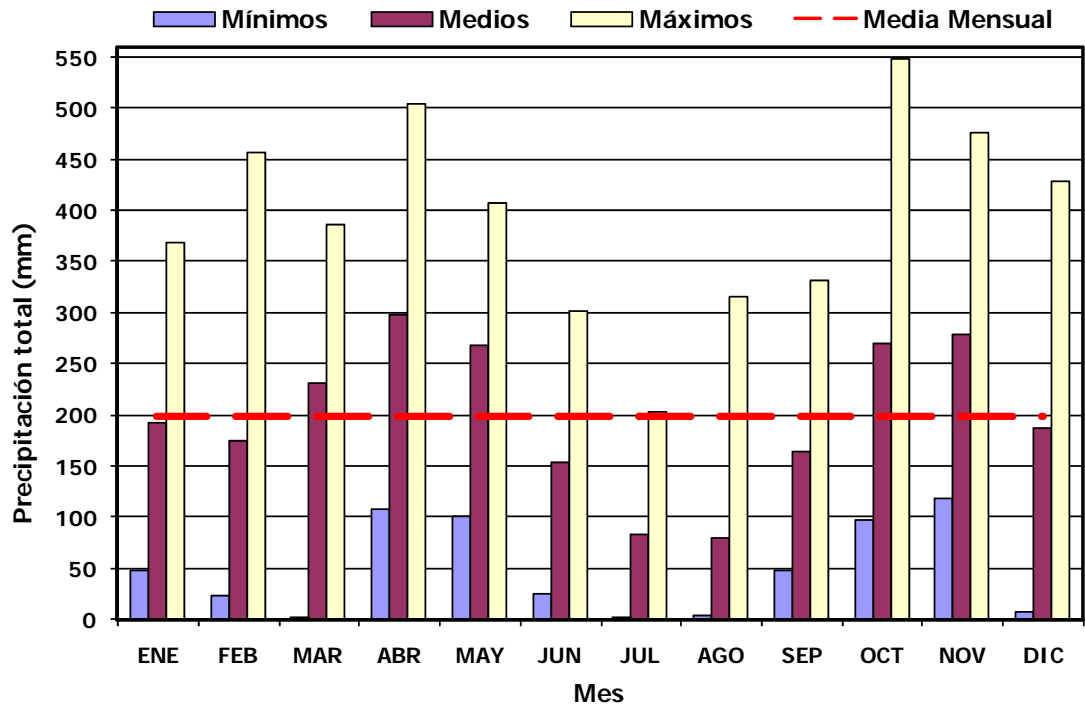
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1981			179	339	314	175	68	93	60	216	295	195	(1934)
1982	339	266		504	320	100	139	10	228	466	218	288	(2878)
1983	122	34	386	330	220	169	73	28	47	189	181	308	2087
1984	311	265	137	335	205	257	31	154	332	378	424	145	2974
1985	348	55	187	224	213	117	65	86	209	294	205	105	2108
1986	302	218	128	282	236	237	2	48	105	548	207	52	2365
1987	86	90	255	319	236	119	88	149	98	377	345	164	2326
1988	113	72	2	406	294	235	149	175	322	229	387	254	2638
1989	226	111	166	230	189	105	21	61	171	350	160	31	1821
1990	166	200	199	161	100	40	61	36	58	281	159	134	1595
1991	47	107	237	216	194	169	99	6	218	98	366	127	1884
1992	87	193	191	179	112	123	42	25	78	160	275	107	1572
1993	87	140	280	394	348	38	45	45	147	152	388	148	2212
1994	215	283	278	379	358	25	38	43	78	198	280	82	2257
1995	202	55	287	188	333	214	151	77	132	204	162	321	2326
1996	177	137	371	293	363	177	130	125	198	251	205	288	2715
1997	305	212	274	264	217	241	5	4	210	247	476	8	2463
1998	57	186	151	285	407	209	67	104	192	127	320	133	2238
1999	186	457	214	307	286	301	102	112	222	360	236	220	3003
2000	250	404	180	220	320	177	203	77	258	118	119	175	2501
2001	214	289	254	107	120	78	101	19	178	154.2	387	207	2108
2002	139	23	383	403	319	73	182	44	188	314	241	221	2530
2003	85	189.2	272	336	325	187	70	31	165	388	383	175	2606
2004	246	173	82	305	333	51	96	47	114	331	298	131	2207
2005	148	140	365	337		176	45	177	209	252	263	317	(2429)
2006	369	187	362	325	270	236	77	53	65	307	381	429	3061
2007	186	70	182	384	343	131	88	315	139	303	167	300	2608
<b>Medio</b>	193	175	231	298	268	154	83	79	164	270	279	188	<b>2382</b>
<b>Máximo</b>	369	457	386	504	407	301	203	315	332	548	476	429	<b>548</b>
<b>Mínimo</b>	47	23	2	107	100	25	2	4	47	98	119	8	<b>2</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 22 se presenta el resumen de los valores multianuales de precipitación total de la estación Alto Iglesias.



**Figura 22.** Valores multianuales de precipitación total.

En la Tabla 17 se presentan los valores máximos en 24 horas de precipitación registrados en la estación Alto Iglesias.

Tabla 17. Valores máximos en 24 horas de precipitación (mm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1981			31	53	41	58	22	38	27	47	64	63	(64)
1982	70	67		81	66	33	35	6	42	63	52	36	(81)
1983	50	19	63	59	54	85	34	17	16	34	55	41	85
1984	50	49	23	78	47	101	6	35	52	46	78	25	101
1985	74	23	51	74	70	36	27	25	40	76	34	45	76
1986	64	43	51	73	78	86	1	18	41	71	45	20	86
1987	36	38	75	90	72	37	28	55	40	51	114	71	114
1988	35	38	2	60	80	47	30	64	69	39	65	45	80
1989	31	42	51	33	33	28	17	16	45	89	38	12	89
1990	47	47	48	57	33	16	25	30	22	52	48	90	90
1991	16	36	53	61	56	45	39	2	73	26	65	20	73
1992	27	55	63	28	22	101	25	12	25	71	46	30	101
1993	22	44	81	74	46	11	20	24	36	24	43	58	81
1994	65	58	65	90	53	9	14	21	30	37	48	24	90
1995	125	22	54	42	73	37	48	15	36	49	34	64	125
1996	43	32	83	70	70	50	47	47	55	42	42	65	83
1997	54	42	76	69	66	50	4	4	56	65	79	6	79
1998	42	90	42	31	74	49	16	52	52	19	48	22	90
1999	35	63	51	41	57	43	65	30	57	71	53	43	71
2000	44	123	26	42	48	49	36	43	43	41	19	40	123
2001	61	66	34	35	25	24	82	10	48	35	69	40	82
2002	33	6	92	63	67	21	81	20	52	80	65	85	92
2003	79	43	72	44	50	85	16	9	69	73	90	49	90
2004	51	42	25	47	50	22	21	12	28	65	61	27	65
2005	42	48	60	93		47	15	68	66	40	99	47	(99)
2006	48	44	74	84	70	50	55	38	22	91	52	60	91
2007	48	32	40	78	86	64	45	53	42	33	36	80	86
<b>Medio</b>	50	47	53	61	57	48	32	28	44	53	57	45	<b>48</b>
<b>Máximo</b>	125	123	92	93	86	101	82	68	73	91	114	90	<b>125</b>
<b>Mínimo</b>	16	6	2	28	22	9	1	2	16	19	19	6	<b>1</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 23 se presenta el resumen de los valores máximos en 24 horas de precipitación registrados en la estación Alto Iglesias.

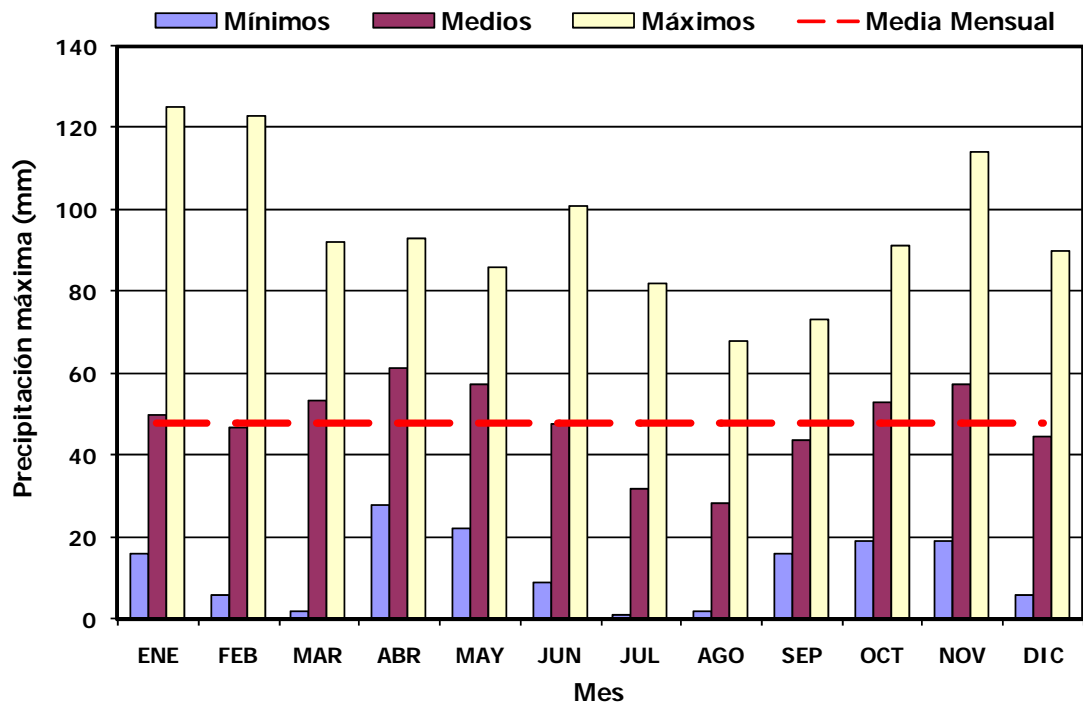


Figura 23. Valores máximos en 24 horas de precipitación.

Adicionalmente, la evaporación total anual en (mm) es 1127.44, el brillo medio mensual es 3.8 horas y la temperatura media anual es 20.70 °C.

En la Tabla 18 se presentan los valores medios mensuales de caudal de la estación Calle Quinta.

#### Estación Calle Quinta

<b>NOMBRE:</b> Calle Quinta	<b>TIPO:</b> LG
<b>CÓDIGO :</b> 2622320402	<b>MUNICIPIO:</b> Cali
<b>ELEVACIÓN:</b> 987.57 m.s.n.m	<b>DEPARTAMENTO:</b> Valle del Cauca
<b>CORRIENTE:</b> Río Meléndez	<b>FECHA INSTALACIÓN:</b> 01/11/1982

Tabla 18. Valores medios de caudal (m<sup>3</sup>/s).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1982											0.3	0.8	(0.5)
1983	0.3	0.2	0.6	1.3	0.9	1.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	1.4	0.7
1984	2.3	1.7	1.2	1.7	2.4	2.3	1.1	0.7	1.5	2.3	3.1	1.8	1.8
1985	1.9	1.0	0.7	1.3	0.9	1.7	0.6	0.5	0.8	1.3	1.7	1.1	1.1
1986	2.3	3.1	2.2	2.1	1.6	1.9	2.2	1.4	1.0	4.1	4.3	2.6	2.4
1987	1.0	0.9	0.8	1.6	1.9	0.9	0.3	0.9	0.6	1.7	3.2	3.4	1.4
1988	1.3	1.1	2.7	1.8	2.1	3.5	2.6	1.4	3.5	3.2	4.6	4.1	2.6
1989	4.0	3.0	2.2	1.8	2.6	2.1	1.0	0.8	0.4	0.3	1.6	1.9	1.8
1990	1.1	1.1	1.1	1.0						2.6	2.6	0.5	(1.4)
1991	0.2	0.1	0.4	0.7	1.2	0.6	0.2	0.3	0.2	0.3	1.2		(0.5)
1992	0.4	0.8	0.8	1.1	1.2	1.0	1.1	0.5	0.6	0.9	1.9	2.6	1.1
1993	1.1	0.7	1.8	3.2	3.1	1.9	0.6	0.3	0.4	0.6	1.8	1.4	1.4
1994	1.9	2.8	3.4						0.1	0.1	0.2	0.2	(1.2)
1995	0.7	0.3	0.6	0.5	1.7	1.7	1.9	1.4	0.5	0.6	0.9	1.0	1.0
1996	0.9	1.5	1.9	2.3	2.6	1.4	1.0	0.4	0.3	2.4	1.3	1.6	1.5
1997	2.7	2.4	3.7	2.1	1.5		0.4	0.3	0.2	0.4	3.1	0.6	(1.6)
1998	0.3	0.8	0.5	2.8	3.0	3.8	0.3	0.3	0.5	0.7	1.3	1.2	1.3
1999	1.4	4.2	3.7	2.7	3.7	2.4	1.0	0.3	0.2	0.5	1.3	2.1	1.9
2000	2.0	2.6	4.4	2.9	4.0	1.9	1.3	0.6	1.0	0.9	1.0	0.6	1.9
2001	1.0	1.2	1.8	1.1	1.0	0.6	0.3	0.1	0.3	0.3	0.6	3.8	1.0
2002	0.9	0.5	0.9	2.3	2.3	1.0	1.0	0.4	0.2	1.0	2.9	0.4	1.1
2003	0.5	0.5	0.9	1.4	2.4	2.4	1.0	0.3	0.2	0.5	2.0	1.7	1.1
2004	1.7	1.0	0.7	0.7	2.0	1.3	0.4	0.8		1.4	1.3	0.6	(1.1)
2005	0.8	0.8	1.5	2.1	2.9	3.2	1.3		1.9	1.6	2.1	3.0	(1.9)
2006	3.7	1.1	1.8	2.8	2.0								(2.3)
<b>Medio</b>	1.4	1.4	1.7	1.8	2.1	1.8	1.0	0.6	0.7	1.2	1.9	1.7	<b>1.4</b>
<b>Máximo</b>	4.0	4.2	4.4	3.2	4.0	3.8	2.6	1.4	3.5	4.1	4.6	4.1	<b>4.6</b>
<b>Mínimo</b>	0.2	0.1	0.4	0.5	0.9	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	<b>0.1</b>

Convenciones:  Dato no registrado

En la Figura 24 se presenta el resumen de los valores medios mensuales de caudal de la estación Calle Quinta.

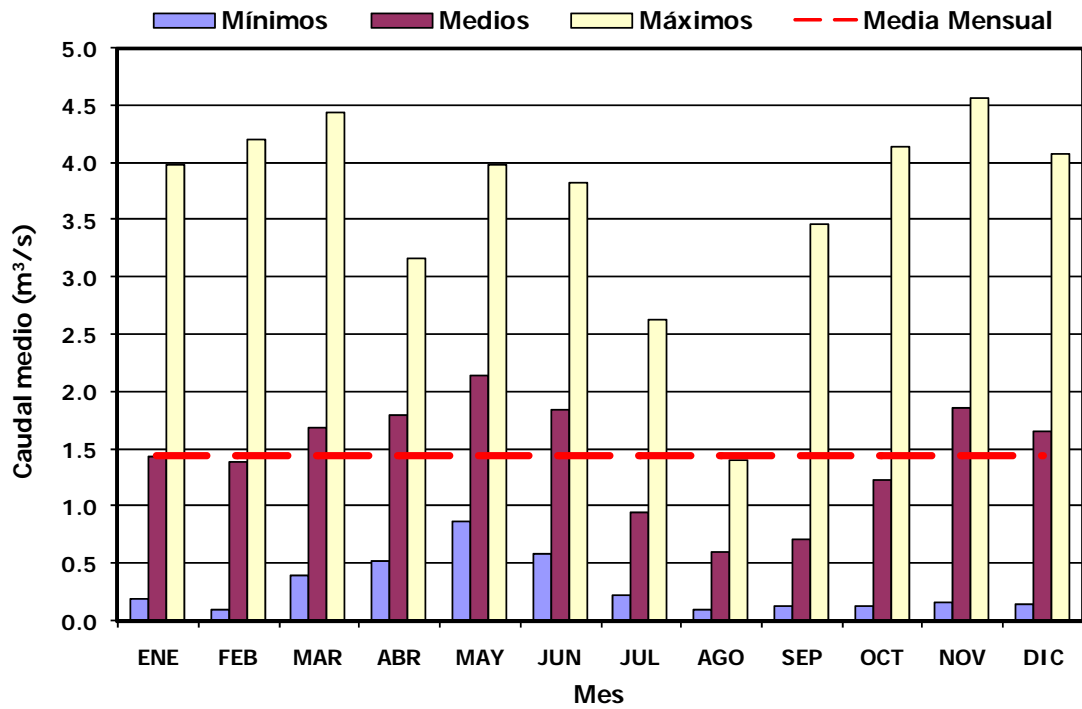


Figura 24. Valores medios mensuales de caudal.

En la Tabla 19 se presentan los valores máximos mensuales de caudal de la estación Calle Quinta.



Tabla 19. Valores máximos de caudal (m<sup>3</sup>/s).

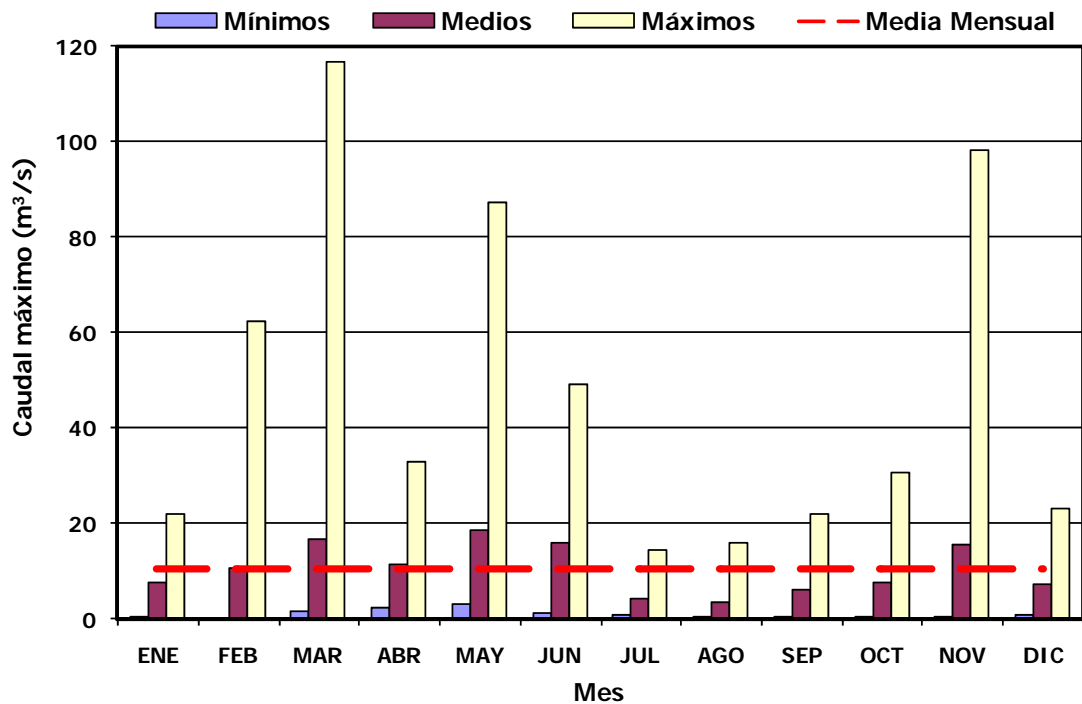
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1982											0.5	11.3	(11.3)
1983	0.5	0.2	10.1	5.1	3.4	21.6	0.8	0.9	0.8	2.5	4.7	5.6	21.6
1984	9.9	12.6	3.0	22.0	9.8	20.4	5.0	2.0	7.1	8.2	18.7	8.0	22.0
1985	7.4	1.7	9.6	14.8	19.0	7.8	2.1	2.8	4.2	4.1	10.5	1.9	19.0
1986	22.1	12.2	14.6	13.1	23.8	46.0	4.1	2.4	3.1	30.5	29.6	4.1	46.0
1987	5.9	3.4	4.1	13.4	10.3	49.3	2.5	11.6	2.8	6.6	98.0	12.2	98.0
1988	7.0	3.4	58.3	5.9	87.3	17.4	13.6	6.3	22.1	10.3	22.9	22.9	87.3
1989	20.1	13.1	4.1	8.7	3.6	18.6	2.3	16.1	0.6	0.5	16.7	16.3	20.1
1990	11.3	3.4	7.3	21.6						4.7	5.6	8.0	(21.6)
1991	0.4	1.2	5.5	6.2	9.1	4.3	1.3	0.5	7.6	2.9	7.1		(9.1)
1992	1.0	5.4	9.8	4.2	3.6	28.7	3.1	2.0	2.6	10.9	12.0	5.2	28.7
1993	4.4	11.5	16.6	22.6	23.3	3.6	2.0	0.8	3.7	1.5	9.1	3.6	23.3
1994	11.1	12.3	18.5						0.4	0.4	2.0	0.7	(18.5)
1995	5.2	1.0	7.5	2.7	5.0	3.1	10.9	3.1	2.2	2.5	4.5	1.8	10.9
1996	4.3	3.3	4.7	6.1	36.1	1.8	1.8	1.5	1.3	28.4	5.3	6.0	36.1
1997	17.8	12.6	16.8	26.0	6.1		0.8	0.6	5.3	4.7	10.1	1.7	(26.0)
1998	0.6	11.3	6.5	10.3	23.4	6.0	1.2	4.5	1.6	1.8	2.8	2.4	23.4
1999	2.8	62.4	27.0	8.3	39.3	10.3	9.8	4.4	1.2	3.8	2.9	4.6	62.4
2000	5.4	60.2	8.3	7.1	10.8	15.6	3.6	5.4	22.0	1.8	2.3	2.0	60.2
2001	2.5	10.5	10.5	3.5	13.4	4.2	14.5	0.3	14.0	1.6	5.0	16.2	16.2
2002	2.7	0.9	116.6	3.3	4.0	1.4	2.8	1.0	0.4	27.0	73.7	2.9	116.6
2003	2.7	3.0	2.8	2.8	40.0	31.6	2.3	3.4	1.1	3.1	7.5	16.0	40.0
2004	20.2	1.6	1.4	2.5	3.1	2.9	2.2	1.4		2.5	3.5	2.2	(20.2)
2005	3.1	2.5	10.4	17.4	34.0	23.0	3.5		20.9	11.4	14.1	10.4	(34.0)
2006	12.3	5.0	30.4	32.8	3.9								(32.8)
<b>Medio</b>	7.5	10.6	16.8	11.3	18.7	15.9	4.3	3.5	5.9	7.5	15.4	7.2	<b>10.4</b>
<b>Máximo</b>	22.1	62.4	116.6	32.8	87.3	49.3	14.5	16.1	22.1	30.5	98.0	22.9	<b>116.6</b>
<b>Mínimo</b>	0.4	0.2	1.4	2.5	3.1	1.4	0.8	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	<b>0.2</b>

Convenciones:



Dato no registrado

En la Figura 25 se presenta el resumen de los valores máximos mensuales de caudal de la estación Calle Quinta.



**Figura 25.** Valores máximos mensuales de caudal.

Con base en la información de caudal y precipitación, se observa que la cuenca presenta un comportamiento bimodal con un mínimo de precipitación en julio y/o agosto, y valores máximos de precipitación en el primer semestre del año en los meses enero y/o junio, y en el segundo semestre en los meses septiembre y/o diciembre. Estos dos periodos de lluvia máximos que se presentan en la cuenca indican que en estos meses el valor del caudal es el máximo que se puede presentar.

### 3. INFORMACIÓN EMPLEADA

Para el desarrollo del presente estudio fue necesario recopilar dos tipos de información, cartográfica e hidrológica, los cuales se describen a continuación.

#### 3.1. Información cartográfica

Para llevar a cabo la caracterización fisiográfica de las tres cuencas consideradas, se emplearon planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (ver Tabla 20); a partir de éstas se realizó una digitalización en Autocad con el fin de obtener la información necesaria de cada cuenca para realizar el estudio. La digitalización realizada permitió obtener la topografía de la zona en formato digital.

Después de este proceso se realizó lo siguiente:

- Definir la divisoria de aguas, con el fin de delimitar cada cuenca de estudio.
- Calcular el área de cada cuenca definida topográficamente, la cual corresponde a la proyección horizontal del área de drenaje.
- Determinar la longitud del cauce principal ( $L$ ), longitud de la cuenca ( $L_{\text{cuenca}}$ ), longitud axial de la cuenca ( $L_{\text{axial}}$ ), longitud al centroide ( $L_c$ ) y ancho de la cuenca ( $W$ ).
- Con la información anterior se puede obtener el factor de forma ( $f$ ), el coeficiente de compacidad ( $K_c$ ), pendiente del cauce principal empleando la metodología de Taylor ( $S_T$ ) y la pendiente de ladera empleando el método de la cuadrícula ( $S_L$ ).
- Adicionalmente, con esta información es posible determinar el tiempo de concentración ( $T_c$ ) por varias metodologías.

La información de las planchas que se solicitaron en el IGAC, se encuentra en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Relación cartográfica empleada para cada cuenca.

CUENCA	ESCALA	PLANCHAS
YUMBO	1:25.000	279-IV-B (1984) 279-IV-D (1984) 280-III-A (1976) 280-III-C (1976)
LILI	1:10.000	299-II-D-1 299-II-D-2 299-II-D-3 299-II-D-4
MELÉNDEZ	1:10.000	299-II-D-1 299-II-D-2 299-II-D-3 299-II-D-4

### 3.2. Información hidrológica

Es muy importante que cada cuenca cuente como mínimo con una estación pluviográfica y una limnigráfica, en las cuales se registre la información de los eventos de lluvia y los cambios de caudal (horario) respectivamente; la información hidrológica requerida va sujeta a los parámetros que utilizan los diferentes modelos a emplear, en el presente trabajo se utilizó la siguiente información:

- Localización de las estaciones de precipitación y de caudal en cada cuenca hidrográfica.
- Registros de las estaciones de precipitación de cada cuenca.
- Registros de las estaciones de caudal con registro continuo de cada cuenca.

En las Tablas 21, 22 y 23 se relacionan los eventos empleados en cada una de las cuencas consideradas. Toda la información hidrológica la suministró la Corporación Autónoma Regional de Valle del Cauca – CVC.

**Tabla 21.** Eventos de la cuenca del río Yumbo.

ID	FECHA			Precipitación Total Acumulada (mm)	Q <sup>Máx</sup> (m <sup>3</sup> /s)
	Día	Mes	Año		
1	2	4	1999	34.00	12.00
2	3	10		41.00	4.50
3	26	10		26.70	17.45
4	22	2	2000	36.90	1.01
5	9	3		25.00	0.79
6	8	11		30.00	1.35
7	19	9	2001	31.00	0.13
8	14	3	2002	30.00	0.48
9	23	3		22.00	18.87
10	28	4		47.80	22.20
11	5	6	2003	19.00	1.43
12	13	7		28.50	5.45
13	20	11		40.60	5.92
14	18	5	2004	18.50	0.17
15	19	5		38.80	2.24
16	8	4	2005	38.70	2.49
17	21	5		35.20	0.73
18	14	12		16.50	0.14
19	13	1	2006	37.50	0.41
20	9	3		16.60	0.49
21	27	4		20.90	0.46
22	20	4	2007	59.30	4.21
23	10	7		18.00	0.51
24	24	9		51.40	1.77
25	26	1	2008	49.30	3.31
26	21	4		27.82	1.64
27	24	4		11.60	0.73

**Tabla 22.** Eventos de la cuenca del río Lili.

ID	FECHA			Precipitación Total Acumulada (mm)	Q <sub>Máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)
	Día	Mes	Año		
1	21	3	1995	67.9	27.00
2	9	10		33.7	4.00
3	20	12		85.0	55.39
4	5	4	1996	41.0	18.20
5	11	5		42.5	22.03
6	14	10		47.5	34.40
7	17	1	1997	63.7	22.37
8	6	4		59.8	30.28
9	22	4		55.6	14.41
10	28	5	1998	93.6	15.46
11	23	2	1999	50.8	24.60
12	24	2		28.5	28.57
13	28	3		56.4	17.61
14	6	5	2000	72.3	5.52
15	4	9		40.0	5.22
16	4	9		39.0	8.37
17	23	2	2001	41.0	14.26
18	4	3		69.5	7.92
19	16	3		26.3	3.29

Tabla 23. Eventos de la cuenca del río Meléndez.

ID	FECHA			Precipitación Total Acumulada (mm)	Q <sub>Máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)
	Día	Mes	Año		
1	12	1	1995	123.8	5.24
2	23	3		33.0	2.33
3	24	3		41.0	4.95
4	30	1	1996	24.8	1.36
5	19	9		33.9	0.65
6	23	1	1997	46.1	17.79
7	16	3		62.2	16.76
8	6	4		63	25.97
9	28	5	1998	42.2	23.40
10	28	5		65.1	20.04
11	6	8		55.7	4.48
12	24	2	1999	62.2	62.40
13	8	5		45.7	35.33
14	13	5		51.0	39.26
15	25	3	2000	29.7	5.02
16	5	5		35.3	6.76
17	22	6		44.3	15.58
18	23	2	2001	48.0	10.49
19	6	7		80.0	4.96
20	12	12		35.5	16.16
21	2	4	2002	27.5	3.00
22	29	5	2003	27.0	40.00
23	17	6		70.0	31.60
24	14	12		49.0	16.00
25	5	1	2004	25.5	4.26
26	7	1		27.0	4.96
27	12	11		49.4	2.80
28	7	4	2005	46.7	17.40
29	7	11		65.4	2.40

A continuación se relacionan las series de tiempo de los eventos de lluvia - escorrentía empleados en cada una de las cuencas consideradas.

Para la cuenca del río Yumbo los datos registrados de precipitación y caudal se encuentran de la siguiente manera (Información del ID 1):

Estación: Santa Inés

**Tabla 24.** Series de tiempo de precipitación.

ID	FECHA	HORA	LLUVIA (mm)	ALTURA (mm)
1	2 /Abr/1999	21 : 10	0.0	0.0
		21 : 20	4.0	4.0
		21 : 30	2.0	6.0
		21 : 40	3.0	9.0
		21 : 50	18.0	27.0
		22 : 0	2.0	29.0
		22 : 10	2.5	31.5
		22 : 20	2.0	33.5
		22 : 30	0.5	34.0
		Fin del Evento22 : 40	0.0	34.0

Estación: Paso Ancho

**Tabla 25.** Series de tiempo de caudal.

ID	FECHA	MES	DÍA	HORA	Q (m <sup>3</sup> /s)
1	1999	4	2	18	0.31
	1999	4	3	0	0.31
	1999	4	3	2	12.00
	1999	4	3	3	8.64
	1999	4	3	4	5.34
	1999	4	3	5	3.18
	1999	4	3	6	2.10
	1999	4	3	7	1.92
	1999	4	3	8	1.35
	1999	4	3	9	1.17
	1999	4	3	10	0.98
	1999	4	3	11	0.92
	1999	4	3	12	0.87
	1999	4	3	13	0.81
	1999	4	3	14	0.81
	1999	4	3	15	0.76
	1999	4	3	16	0.70
	1999	4	3	17	0.70
	1999	4	3	18	0.70
	1999	4	4	0	0.59
1999	4	4	6	0.48	



Todos los resultados obtenidos de las series de tiempo, para los eventos de la cuenca Yumbo están disponibles en el anexo A.

Para la cuenca del río Lili los datos registrados de precipitación y caudal se encuentran de la siguiente manera (Información del ID 1):

Estación: La Ladrillera

**Tabla 26.** Series de tiempo de precipitación.

ID	FECHA	HORA	LLUVIA (mm)	ALTURA (mm)
1	21 /Mar/1995	06:00	0.0	0.0
		06:20	1.3	1.3
		06:40	2.0	3.3
		07:00	2.6	5.9
		07:20	10.0	15.9
		07:40	10.0	25.9
		08:00	10.0	35.9
		08:20	10.0	45.9
		08:40	10.0	55.9
		09:00	12.0	67.9
	Fin del Evento	09:20	0.0	67.9

Estación: Paso Ancho

**Tabla 27.** Series de tiempo de caudal.

ID	FECHA	MES	DÍA	HORA	Q (m <sup>3</sup> /s)
1	1995	3	21	2	0.17
	1995	3	21	4	1.60
	1995	3	21	6	27.00
	1995	3	21	8	9.70
	1995	3	21	10	8.84
	1995	3	21	12	3.30
	1995	3	21	14	1.92
	1995	3	21	16	1.46
	1995	3	21	18	1.25
	1995	3	21	20	1.11
	1995	3	21	22	0.90
	1995	3	22	0	0.78

Todos los resultados obtenidos de las series de tiempo, para los eventos de la cuenca Lili están disponibles en el anexo A.

Para la cuenca del río Meléndez los datos registrados de precipitación y caudal se encuentran de la siguiente manera (Información del ID 1):

Estación: Alto Iglesias

**Tabla 28.** Series de tiempo de precipitación.

ID	FECHA	HORA	LLUVIA (mm)	ALTURA (mm)
1	12 /Ene/1995	17 : 30	0.0	
		17 : 40	1.3	1.3
		17 : 50	1.0	2.3
		18 : 0	5.0	7.3
		18 : 10	6.0	13.3
		18 : 20	7.0	20.3
		18 : 30	4.5	24.8
		18 : 40	6.0	30.8
		18 : 50	12.0	42.8
		19 : 0	12.0	54.8
		19 : 10	12.0	66.8
		19 : 20	12.0	78.8
		19 : 30	4.0	82.8
		19 : 40	7.0	89.8
		19 : 50	8.0	97.8
		20 : 0	4.0	101.8
		20 : 10	4.0	105.8
		20 : 20	1.5	107.3
		20 : 30	2.5	109.8
		20 : 40	2.5	112.3
		20 : 50	0.5	112.8
		21 : 0	0.5	113.3
		21 : 10	4.5	117.8
21 : 20	6.0	123.8		
	Fin del Evento	21 : 30	0.0	123.8

Estación: Calle Quinta

**Tabla 29.** Series de tiempo de caudal.

ID	FECHA	MES	DÍA	HORA	Q (m <sup>3</sup> /s)
1	1995	1	12	16	0.20
	1995	1	12	18	0.21
	1995	1	12	20	0.21
	1995	1	12	22	0.20
	1995	1	13	0	0.66
	1995	1	13	2	3.95
	1995	1	13	4	5.24
	1995	1	13	6	1.26
	1995	1	13	8	1.48
	1995	1	13	10	1.79
	1995	1	13	12	1.58
	1995	1	13	14	1.37
	1995	1	13	16	1.26

Todos los resultados obtenidos de las series de tiempo, para los eventos de la cuenca Meléndez están disponibles en el anexo A.

De acuerdo a lo anterior, para la cuenca de Yumbo teniendo en cuenta solamente los eventos considerados (ver numeral 5), la duración de la precipitación promedio es de 1.57 (h), el caudal promedio es de 9.33 (m<sup>3</sup>/s), la duración promedio de la creciente es de 25.2 (h), el tiempo al pico promedio es de 4 (h), etc.

Para Lili la duración de la precipitación promedio es de 1.82 (h), el caudal promedio es de 17.98 (m<sup>3</sup>/s), la duración promedio de la creciente es de 22.20 (h), el tiempo al pico promedio es de 3.27 (h), etc.

Para Meléndez la duración de la precipitación promedio es de 1.60 (h), el caudal promedio es de 19.99 (m<sup>3</sup>/s), la duración promedio de la creciente es de 18.28 (h), el tiempo al pico promedio es de 4.22 (h), etc.

## 4. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS CON LA HERRAMIENTA MCAT

### 4.1. Monte – Carlo Analysis Toolbox (MCAT)

La herramienta de análisis de Monte Carlo, es una herramienta computacional desarrollada en Matlab, útil para realizar análisis numérico y visual de modelos matemáticos en general. El Toolbox puede ser utilizado para analizar resultados de simulaciones de Monte Carlo o para la optimización de parámetros de los modelos que utilizan técnicas de muestreo, como por ejemplo algoritmos genéticos. Un número de técnicas poderosas son incluidas dentro del Toolbox para investigar la estructura, sensibilidad y la incertidumbre de los parámetros de cada modelo.

En la herramienta MCAT la estimación de los parámetros se puede observar mediante los diagramas de dispersión, en los cuales los parámetros individuales de cada simulación de Monte-Carlo se grafican contra los valores de la función objetivo (en este caso  $1 - R^2$ ).

Con esta herramienta se puede apreciar también gráficamente el grado de sensibilidad que tiene cada parámetro y las 10 mejores combinaciones de parámetros óptimos, entregando un conjunto de información de análisis del modelo, información que le da argumentos muy importantes al modelador en la toma de decisiones (Wagener & Kollat, 2007).

Muchas de las herramientas tienen por objeto ayudar a investigar la identificabilidad de un modelo, la cual se define en el comportamiento de los parámetros del modelo que posiblemente se encuentran en un rango de valores definido. En el estudio de la identificabilidad de un modelo es importante establecer si el modelo va hacer utilizado para pruebas de hipótesis científicas, donde los parámetros tienen un significado físico y los valores de la calibración son empleados para interpretar la naturaleza del sistema, y si al cambiar estos parámetros se pueden predecir los comportamientos futuros. En los últimos 30 años se ha notado que gran parte de los modelos carecen de identificabilidad; cuando se establece un rango de parámetros que indistintamente generan buenos ajustes, por medio de un solo índice que resume las diferencias entre lo observado y lo modelado.

Uno de los principales inconvenientes que existe en la identificabilidad de los parámetros de un modelo, es que por medio de diferentes combinaciones se pueden encontrar resultados similares; aspecto denominado interdependencia paramétrica. Es posible mejorar esta identificabilidad si se cuenta con información adicional de los parámetros del modelo, la investigación de la identificabilidad realizada en el presente trabajo se orienta a la búsqueda de esta información adicional.

Para mostrar el problema de la falta de identificabilidad, se puede imaginar una situación donde se tenga un modelo parsimonioso por medio del cual se represente un sistema real, donde no existen errores de entrada ni de salida en los datos medidos, por lo tanto, el resultado del modelo que reproduzca exactamente lo observado identificará el conjunto de parámetros correctos. Sin embargo, esta situación rara vez se encuentra en la modelación hidrológica, y en presencia de errores provenientes de la parametrización se pueden obtener resultados con estadísticas de rendimiento similares, por lo tal motivo, no es posible decir con certeza cuál combinación de los parámetros es la correcta (Lees & Wagener, 2005).

Monte-Carlo es un proceso iterativo en la simulación de un modelo aplicado a una muestra aleatoria de parámetros. Usualmente, el modelo se corre con una matriz de parámetros generados aleatoriamente y almacena los objetivos para cada simulación del modelo en una matriz de resultados. Con frecuencia el no contar con suficiente información a priori de la naturaleza de la distribución de los parámetros y la interrelación de estos, da pie a emplear distribuciones uniformes; si las distribuciones uniformes se usan, entonces los límites de las iteraciones que se desean realizar deben ser especificados con un ancho adecuado para cualquier combinación de parámetros, teniendo en cuenta que el rango de variación de los parámetros no sea muy grande para evitar una sobre estimación de los mismos. El número de iteraciones determina la densidad del muestreo que se realiza a los diferentes parámetros, si el número de iteraciones es pequeño es posible realizar métodos manuales, pero si el número de iteraciones es muy grande es necesario utilizar una herramienta computacional.

MCAT contiene herramientas para la evaluación de rendimientos, identificabilidad, sensibilidad y predicción de incertidumbre apoyado en la metodología GLUE, explicado en el numeral 4.2.

Los métodos empleados por Monte Carlo utilizan un intervalo de muestreo que está basado únicamente en una estrategia definida a priori, en la cual se hacen fuertes suposiciones acerca de la forma de la respuesta esperada. Algunas de las aplicaciones más comunes de los métodos son (Wagener & Kollat, 2007):

1. Muestreo aleatorio uniforme donde todos los parámetros están incluidos en la muestra de una distribución uniforme, sin considerar la interacción de los parámetros.
2. Latin Hypercube Simulation (LHS) u otros enfoques de muestreos estratificados donde el espacio de los parámetros se observa como una abertura dentro del hipercono para garantizar una mejor extensión del muestreo.

3. Técnicas basadas en las cadenas de Markov de Monte Carlo (MCMC), dentro de este tipo se incluyen los algoritmos Metrópolis y la evolución compleja de estos.
4. En otros tipos de algoritmos se recrea la evolución de una población de parámetros que inicialmente eran aleatorios y se almacenan sistemáticamente; algunos ejemplos incluyen Algoritmos Genéticos (GA) y el impulso de la evolución compleja (SCE-UA).

#### 4.2. Generalized Likelihood Uncertainty Estimation methodology (GLUE)

En la metodología GLUE propuesta por Beven & Binley (1992), no existe un solo parámetro óptimo que sea identificado, por el contrario, un conjunto de modelos son identificados donde cada modelo tiene una probabilidad de certeza de representar correctamente el sistema. La metodología GLUE introduce el término de probabilidad como una medida del rendimiento para diferenciar que tan probable es que un modelo genere resultados que describan adecuadamente el comportamiento del sistema en estudio; las probabilidades deben estar incrementándose monotónicamente por encima de cero.

MCAT transforma objetivos en probabilidades de acuerdo con el siguiente pseudo-código (Lees & Wagener, 2005):

$$LHOOD = 1 - OBJ$$

$$IF \text{ MIN } (LHOOD) < 0 \text{ ENTONCES } LHOOD = LHOOD - \text{ MIN } (LHOOD)$$

$$LHOOD = LHOOD / \text{ MAX}(LHOOD)$$

Donde:

OBJ = El valor de la función objetivo

LHOOD = El valor de la probabilidad resultante (Likelihood)

En la metodología GLUE se emplea una distribución antecedente para determinar los valores de los parámetros, en la cual se genera un conjunto de parámetros aleatorios con el fin de ser utilizados en cada simulación de un modelo. Para la aplicación de la metodología GLUE se requieren las siguientes decisiones (Beven, 2004):

- Modelo o modelos que serán incluidos en el análisis.
- Rango factible para el valor de cada parámetro.
- Estrategia de muestreo para el conjunto de parámetros.

- Medida de probabilidad apropiada.

Decidir los posibles rangos de los parámetros no necesariamente es fácil, incluso teniendo algunas experiencias previas de la aplicación del modelo. El objetivo es tener un rango adecuado de parámetros que se adapten muy bien al modelo, y así evitar correr parámetros que no demuestren el comportamiento del modelo. En ocasiones, sin importar que el rango de parámetros sea suficientemente amplio no es posible encontrar los verdaderos límites de estos parámetros, esto puede ocasionarse porque las predicciones del modelo no son muy sensibles al cambio de los parámetros o debido a que existen parámetros más allá del límite establecido que se ajustan adecuadamente. El procedimiento empleado en este trabajo fue comenzar con rangos muy grandes de parámetros y observar si era posible reducirlos.

Un problema importante en la aplicación de la metodología GLUE es la selección subjetiva de la función de probabilidad y la evaluación de un umbral de probabilidad, la escogencia de esta medida de probabilidad puede ser determinada por la naturaleza en la predicción del problema que se quiere solucionar.

#### 4.3. Función objetivo

La flexibilidad del muestreo Monte-Carlo permite a los usuarios ajustar el procedimiento en la estimación de incertidumbre por medio de la selección de las funciones objetivo.

El rendimiento del método de estimación de incertidumbre puede y debe ser evaluado por medio de la verificación de los datos, de manera similar, debe dividirse la prueba entre calibración y validación del modelo para verificar los resultados. Debido a que la intención del presente trabajo consiste en identificar la estructura de los modelos considerados, sin incluir la evaluación de la capacidad predictiva de los resultados obtenidos, en este trabajo se realizará la etapa de calibración con todos los datos disponibles. Para la calibración de los parámetros por medio de la herramienta GLUE incluida en el Toolbox de MCAT se empleará como función objetivo la minimización de la función:

$$1 - R^2 = \frac{Var(e_i)}{Var(Y_i)} \quad [40]$$

Donde:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad [41]$$

$$Y_i = \text{Valores registrados.}$$

$\hat{Y}_i$  = Valores estimados.

Para evaluar el ajuste de los valores estimados con los valores registrados, se empleará el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [42]$$

Donde:

$\bar{Y}$  = Media de los valores registrados.

$n$  = Número de datos.

$r$  = Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Este método de Nash-Sutcliffe arroja un índice ( $r$ ) después de realizar un análisis a una serie aleatoria de datos, el cual sirve para reflejar los procesos físicos de modelos hidrológicos.

#### 4.4. Análisis de Incertidumbre

Generalmente, el conjunto de modelos de comportamiento se definen objetivamente empleando una definición de Pareto. La técnica reconoce que en presencia de errores en el modelo, la selección de diferentes objetivos de optimización dará lugar a diferentes conjuntos de parámetros óptimos. De acuerdo con lo anterior, no es posible encontrar un único conjunto de parámetros óptimos, sino más bien un conjunto de soluciones donde no es posible una distinción real, llamado conjunto de soluciones de Pareto; ninguno de los miembros del conjunto Pareto produce el mejor resultado para todas las funciones objetivo, debido a la cantidad de conjuntos de parámetros que no se pueden distinguir claramente.

Una vez que se ha identificado el comportamiento del modelo por medio de la metodología GLUE o los métodos de Pareto, los límites en la predicción de incertidumbre pueden establecerse por series de tiempo. En el caso del método GLUE se generan intervalos de confianza mientras que en el caso de Pareto los límites se encuentran por encima de todo el conjunto de modelos y el conjunto de Pareto. Para el presente trabajo se utilizarán los intervalos de confianza obtenidos con la herramienta GLUE y no con Pareto.



#### **4.5. Análisis de Sensibilidad**

El análisis de sensibilidad se evalúa como la sensibilidad de los resultados del modelo frente a los cambios de sus parámetros, estado de las variables o datos de entrada. En el caso en que los parámetros muestren insensibilidad pueden ser examinados o de lo contrario eliminados para reducir la carga computacional durante los pasos de optimización o muestreo.

Existe una particular importancia para los modelos altamente dimensionales donde las limitaciones computacionales siguen limitando el tamaño de espacio de los parámetros que pueden ser examinados, particularmente en estas estimaciones de los parámetros se incluye una incertidumbre. Los procedimientos de análisis de sensibilidad consisten de dos componentes básicos (Wagener & Kollat, 2007):

- (1) Una estrategia en la variación de los parámetros del modelo, entradas o estados.
- (2) La definición de una medida para estimar como las respuestas del modelo cambian dependiendo la variación de uno o más parámetros, entradas o estados.

La razón para realizar un análisis de sensibilidad es generalmente una de las siguientes (Wagener et al., 2002; Wagener et al., 2004; Gooseff et al., 2005; Sieber & Uhlenbrook, 2005; McIntyre & Wheeler, 2004; Letcher et al., 2007):

- (1) Probar cuales parámetros dominan una certeza en la respuesta con el fin de eliminar la insensibilidad de los parámetros y de esta manera reducir la carga en la calibración.
- (2) Como parte de un análisis de incertidumbre a priori para probar si están bien definidos los parámetros ó en donde es necesario realizar un esfuerzo adicional para reducir la incertidumbre (e.g., mejorar la calidad de los datos de entrada).
- (3) En los últimos años han surgido en la literatura diferentes variaciones de análisis temporal, para probar si los parámetros son sensibles en periodos donde los procesos que ellos representan son asumidos como dominantes. Un análisis de sensibilidad puede ser utilizado como una herramienta para la evaluación de la estructura del modelo.

Existe una amplia variedad de enfoques para el análisis de sensibilidad, pero estas pueden generalmente ser reducidas a los siguientes dos componentes básicos:

- (1) Una estrategia para variar los parámetros (variables de entrada o estado).

- (2) Una medida numérica o visual de la cantidad de impactos en la variación de los resultados del modelo.

#### **4.6. Análisis General**

Por medio de las diferentes gráficas generadas por MCAT, se realiza el análisis de identificabilidad, sensibilidad e incertidumbre de los parámetros de los modelos, considerados en el presente trabajo (Wagener & Kollat, 2007), tal como se explica a continuación:

- En el diagrama de dispersión, se grafican los valores de la función objetivo contra el valor del parámetro en una dimensión de puntos, y así se proporciona un medio para evaluar la identificabilidad de los parámetros del modelo (el usuario puede cambiar los umbrales de la función objetivo los cuales se muestran en las gráficas para ayudar a proveer una visualización de cuál es el que mejor muestra la identificabilidad de cada parámetro).
- En la grafica de análisis de sensibilidad regional, el parámetro marginal es clasificado del mejor al peor en términos de la función objetivo seleccionada, la clasificación es dividida dentro de diez columnas de igual tamaño de acuerdo con los valores de las funciones objetivo; los valores objetivo están asociados con cada serie de parámetros convertidos en medidas de probabilidad, esta distribución acumulada de cada serie se encuentra graficada como los valores de probabilidad contra los valores de los parámetros. La mayor probabilidad de distribución de los parámetros se indica por líneas negras y la menor distribución de probabilidad se indica por líneas más claras. Los colores de las líneas que están representando la distribución acumulada de los restantes ocho grupos son escalados adecuadamente.
- La gráfica de intervalos de confianza GLUE es una medida de la incertidumbre que se presenta en el ajuste del modelo estimado en comparación con los registros observados, el usuario tiene autonomía para establecer los límites de confianza superior e inferior de la banda de confianza (la banda de confianza establece el rango en el cual el modelo es válido), es importante que la banda de confianza sea lo más estrecha posible con el fin de garantizar un buen ajuste de los datos y del mismo modo disminuir la incertidumbre en la respuesta. Los límites de la banda de confianza se establecen en un porcentaje de 0 a 100, en el presente trabajo se utiliza un intervalo de confianza del 10%.

#### 4.7. Procedimiento de análisis de los parámetros de un modelo

El procedimiento de la metodología GLUE se entiende mejor por medio de un ejemplo. En este ejemplo, se considera la herramienta GLUE aplicada para el análisis de los parámetros del método del SCS (ver numeral 1.2) en la estimación de la precipitación de excesos, y en el análisis de los parámetros del hidrograma unitario del SCS (ver numeral 1.3.2) empleado para determinar la escorrentía superficial; este caso de estudio se realiza en la cuenca del río Yumbo (ver numeral 2.1). De acuerdo con los parámetros previamente establecidos para el método del SCS (ver numeral 1.1) y el HU del SCS (ver numeral 1.3.1), se realizaron las correspondientes simulaciones (10.000) teniendo en cuenta las combinaciones de estos parámetros, las cuales se muestran a continuación:

Combinación = Lambda y Lag Time variables ( $CN$ ,  $\lambda$  y  $T_l$ )

Para este ejemplo se considero el evento 1 de la cuenca de Yumbo, empleando unos rangos para el parámetro Lag Time de (1.0 a 4.0) y  $\lambda$  entre (0.01 a 0.25), debido a que entre estos valores la banda de confianza es cuando mejor se ajusta.

En la Figura 26 se presenta el comportamiento de los parámetros del HU del SCS cuando se emplea la combinación previamente dada. Se observa que el parámetro Lag Time ( $T_l$ ) es claramente identificable porque existe un valor mínimo para el cual la función es óptima, mientras que los demás parámetros lambda ( $\lambda$ ) y número de curva ( $CN$ ) muestran un bajo nivel de identificabilidad debido a que no es claro que exista un valor mínimo, lo contrario, el valor que se tome de ( $\lambda$ ) y ( $CN$ ) no cambia drásticamente los resultados.

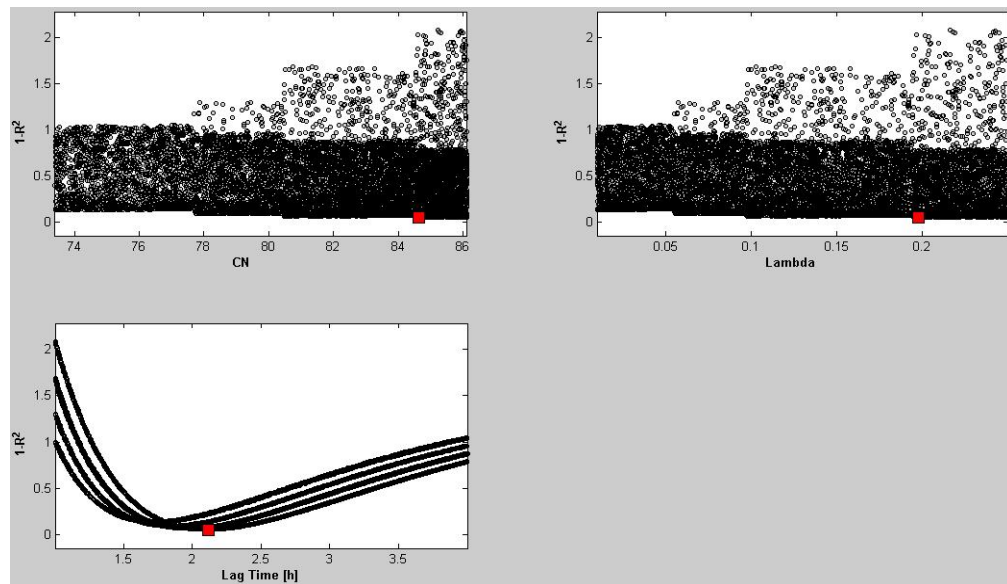


Figura 26. Comportamiento de la función objetivo para el HU del SCS.

Las diez mejores combinaciones obtenidas para estos parámetros son las siguientes, ordenadas de la mejor a la peor:

Tabla 30. Combinaciones obtenidas.

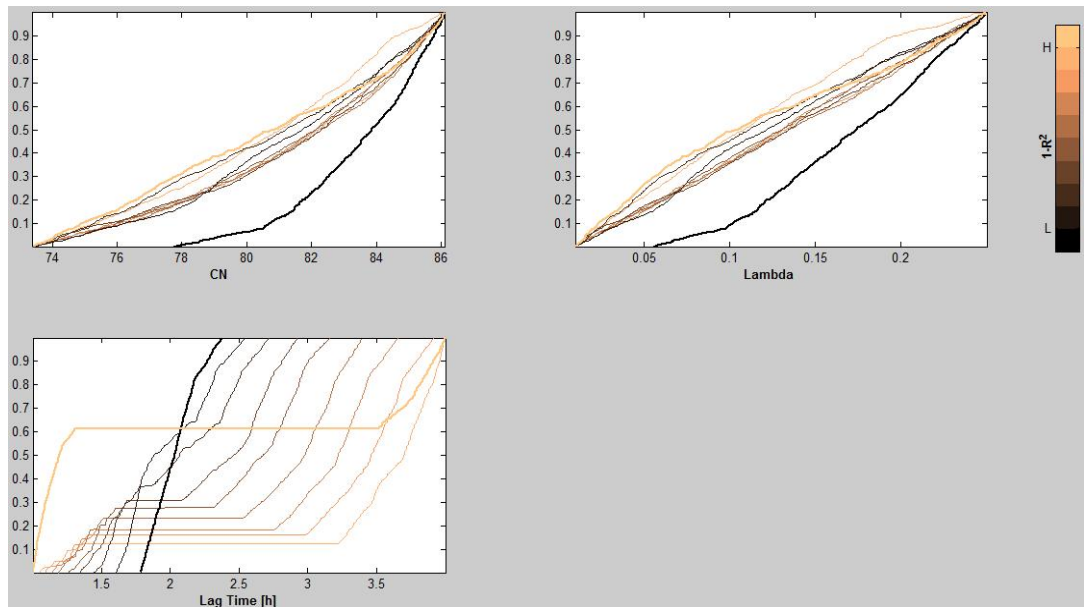
CN	LAMBDA	LAG TIME (h)
<u>84.65</u>	<u>0.197</u>	<u>2.11</u>
84.66	0.198	2.11
84.71	0.199	2.11
84.67	0.198	2.12
84.81	0.202	2.12
84.66	0.198	2.13
84.62	0.196	2.13
85.14	0.214	2.11
84.64	0.197	2.13
85.02	0.210	2.12

De lo anterior se tiene que el valor óptimo de Lag Time es 2.11 (h), mientras que para ( $\lambda$ ) y ( $CN$ ) no existe un valor óptimo, pero el que mejor se ajusta es 0.197 y 84.65 respectivamente.

En la Figura 27 se presenta la sensibilidad de los parámetros del HU del SCS, cuando se emplea la combinación dada. Se observa que el parámetro Lag Time ( $T_l$ ) es altamente sensible, porque tiende a haber grandes diferencias en el valor de los parámetros y su probabilidad generando un buen modelo de salida, mientras que los

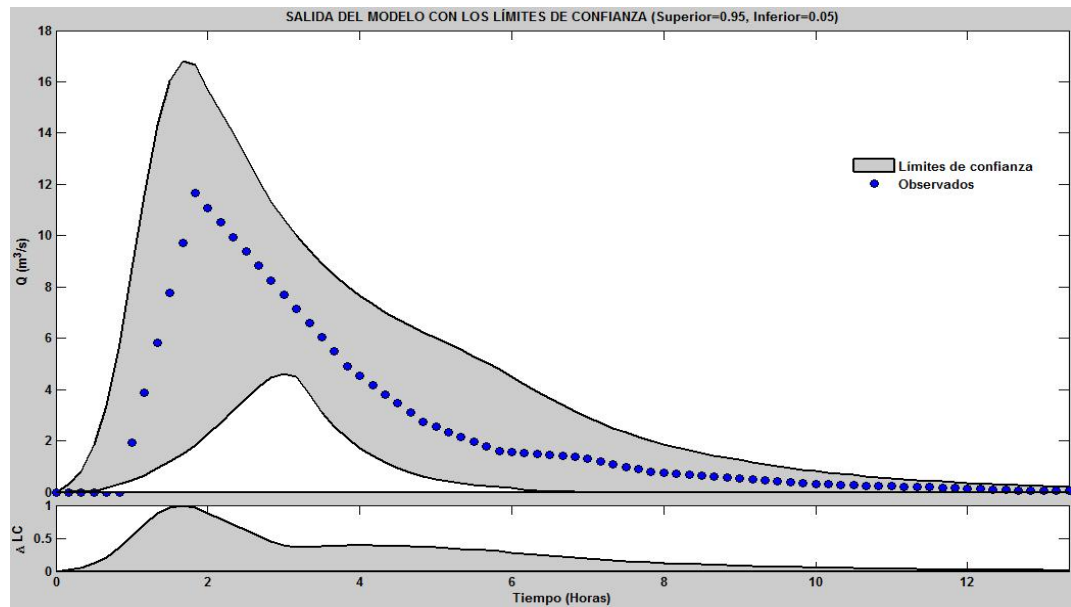
demás parámetros lambda ( $\lambda$ ) y número de curva ( $CN$ ) no muestran un buen nivel de sensibilidad, esto se observa por la similitud en las distribuciones acumuladas a través de los diez grupos principales de sensibilidad.

Con base en lo anterior se puede decir que si un parámetro es identificable, al mismo tiempo es un parámetro sensible; por lo tanto en la Figura 26 el parámetro Lag Time es identificable, y en la Figura 27 se observa que este parámetro es muy sensible.



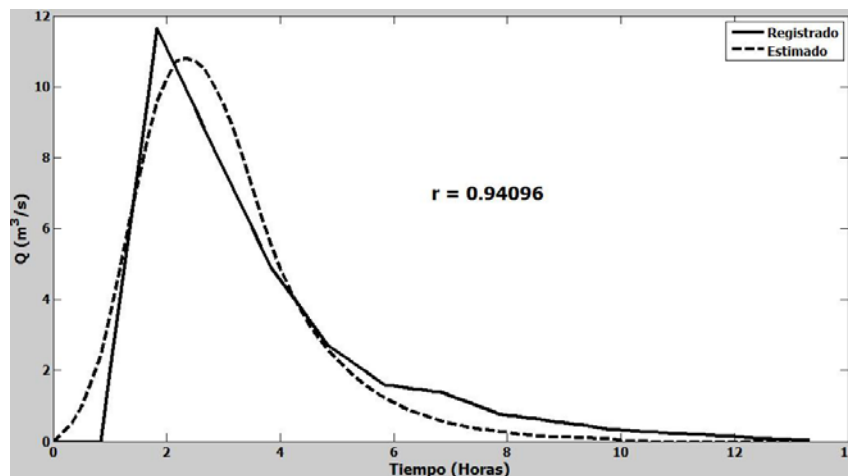
**Figura 27.** Sensibilidad de los parámetros del HU del SCS.

En la Figura 28 se observa la banda de confianza que establece el rango en el cual el modelo es válido, esta gráfica se conoce como los intervalos de confianza GLUE. La banda de confianza encierra la mayor parte de los datos, de esta manera se disminuye la incertidumbre en la respuesta y se garantiza que el modelo es válido para predecir un evento que se ajuste adecuadamente a los registros observados.



**Figura 28.** Intervalos de confianza GLUE de los parámetros del HU del SCS.

En la Figura 29 se presenta la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado mediante el hidrograma unitario empleado. En esta gráfica se observa que el caudal generado por el HU del SCS con un valor de  $\lambda$  variable, da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado, y se ajusta adecuadamente en la mayor parte de la gráfica del caudal registrado; por lo tanto, representa adecuadamente las condiciones observadas del evento dado. Adicionalmente, el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ), da un valor muy cercano a uno ( $r = 0.94096$ ), lo cual indica que no existe gran diferencia entre el caudal registrado y el estimado.



**Figura 29.** Caudal registrado y estimado mediante el HU del SCS.

## **5. MODELACIÓN AVANZADA EN LAS CUENCAS SELECCIONADAS**

Existen muchos factores a priori que son muy importantes cuando se quiere realizar un procedimiento de modelación, donde el conocimiento de la estructura del modelo y el comportamiento de sus parámetros ayudan a reducir la incertidumbre de los datos de entrada; en cada cuenca se dispone de información de las estaciones de precipitación y de caudal con registro continuo donde se observan los diferentes eventos que se presentan durante el año en la zona, esta información es bastante amplia, por lo tanto, es necesario tomar la información más representativa de estos eventos los cuales generan grandes crecientes que afectan a la población y sus alrededores.

En el análisis de la estructura del modelo se identifican los parámetros, la información morfométrica, y otras características importantes para que los resultados sean representativos. Cada modelo posee sus parámetros y no necesariamente son los mismos, por eso es muy importante establecer que información adicional se requiere y aplicar de una manera adecuada esta información.

### **5.1. Selección de eventos**

El proceso de selección comienza desde el análisis de la información de las estaciones de precipitación y de caudal con registro continuo, información suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Valle del Cauca – CVC, en la cual se establecen los registros de los eventos de lluvia y mediciones de caudal en cada cuenca. Para cada estación de precipitación se identifican en promedio 3 eventos de lluvia máxima por año (estos registros se encuentran en un intervalo de 10 ó 20 minutos), esta información se contrasta con los registros de caudal horario para garantizar que el evento de lluvia generó un aumento significativo del caudal, dependiendo de las condiciones de humedad antecedente el caudal puede aumentar súbitamente en el instante en que se registra la precipitación. En ese orden de ideas, no necesariamente la precipitación máxima genera un aumento significativo del caudal, para garantizar que el evento de precipitación máxima aumente el caudal súbitamente es necesario tener en cuenta las condiciones de humedad antecedente (es importante conocer la precipitación de los 5 días anteriores al evento).

El número de eventos por año son tres como máximo con el fin de abarcar un mayor periodo de análisis y que los eventos seleccionados sean representativos de las grandes crecientes presentadas en cada cuenca, esta selección de eventos disminuye la carga computacional, toma las medidas extremas a las que la cuenca está expuesta y facilita el análisis de los resultados del método del SCS.

A los eventos previamente seleccionados se les realiza un análisis de la precipitación máxima acumulada y el caudal máximo registrado. En los casos en que el caudal

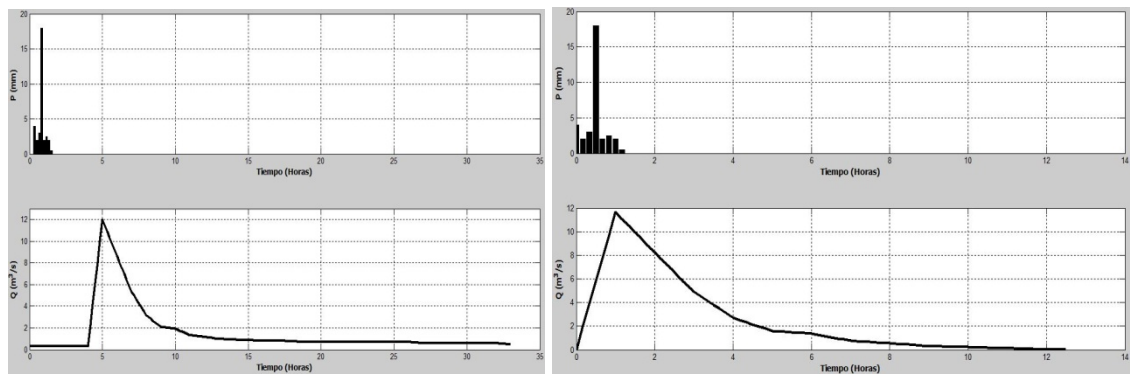
máximo registrado no muestre un aumento de caudal importante, entonces, no se tiene en cuenta el evento.

A continuación se grafican los eventos resultantes, cuyo objetivo es observar el comportamiento de los hidrogramas de escorrentía superficial, establecer el tiempo de duración de cada evento, seleccionar los eventos que representen adecuadamente las condiciones reales, comparar los registros de precipitación acumulada y caudal máximo con los registros de precipitación diaria y caudal medio diario respectivamente (para verificar que los eventos seleccionados sí son los máximos en la cuenca).

Con base en lo anterior, para graficar los eventos es necesario establecer un intervalo de tiempo adecuado para manejar los datos de precipitación y de caudal; generalmente, la información de precipitación está dada en un intervalo de 10 – 20 minutos; mientras que la información de caudal se expresa en horas, por lo tanto, es necesario que exista coherencia de unidades de tiempo para los registros de caudal y de precipitación. En el presente trabajo el intervalo de tiempo que se maneja es de 10 o 20 minutos dependiendo la información de precipitación, y se realiza una interpolación a los datos de caudal para expresarlos en minutos. Una vez ya se tienen los registros en una sola unidad de tiempo el paso a seguir es graficar el histograma de precipitación total y el hidrograma de escorrentía (ver Figura 30), para llevar a cabo este proceso en MATLAB se programaron unas funciones que permiten realizar la selección de los eventos, y adicionalmente descontar el flujo base (ver anexo B), donde, una vez graficado el hidrograma de escorrentía y el histograma de precipitación para el evento analizado, se procede a recortar la selección de caudal y de precipitación de manera exacta con el fin de eliminar la información que no representa el evento.

Cuando se ha recortado el caudal y la precipitación es importante descontar el flujo base (la separación del hidrograma en escorrentía superficial directa y en escorrentía base es muy importante para el estudio de las características hidrológicas de una cuenca). En el caso de estudio se empleo el método de la línea recta, el cual consiste en unir con una línea recta el punto donde comienza aumentar el caudal del hidrograma, y el punto donde comienza la curva de agotamiento (punto que indica la terminación de toda escorrentía superficial). El caudal por debajo de esa línea corresponde al aporte de agua subterránea y el resto a la escorrentía superficial total.





a) Información original.

b) Evento recortado y sin caudal base.

Figura 30. Selección del evento.

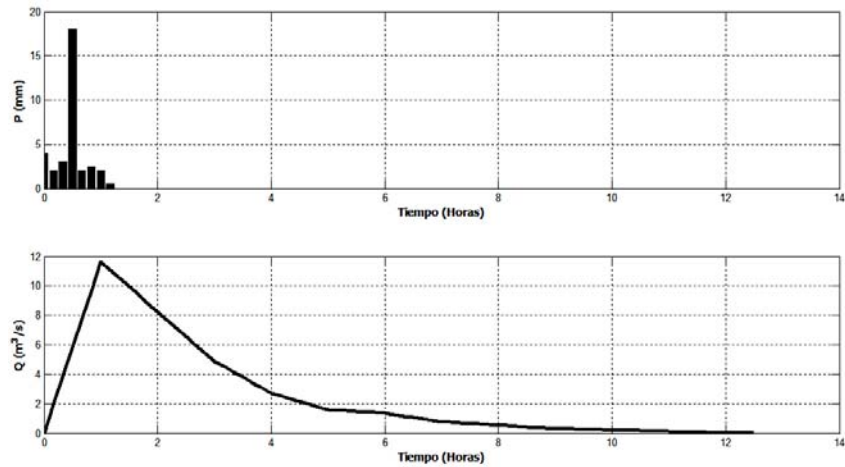
Una vez se ha descontado el flujo base se procede a realizar el cálculo del histograma de precipitación de excesos, en el presente trabajo se empleó el modelo del SCS (ver numeral 1.2). Esta precipitación de excesos se determina calculando el área bajo la curva del hidrograma de escorrentía superficial registrado y dividirla entre el área de la cuenca. Sí, a partir de estos registros de caudal se conoce la precipitación de excesos ( $P_e$ ), por medio de la ecuación [8] se puede encontrar el valor de retención máxima,  $S_{Máx}$ ; por medio de la siguiente expresión:

$$S_{Máx} = \frac{2\lambda P_t + (1 - \lambda)P_e - \sqrt{4P_t P_e \lambda + (1 - \lambda)^2 P_e^2}}{2\lambda^2} \quad [43]$$

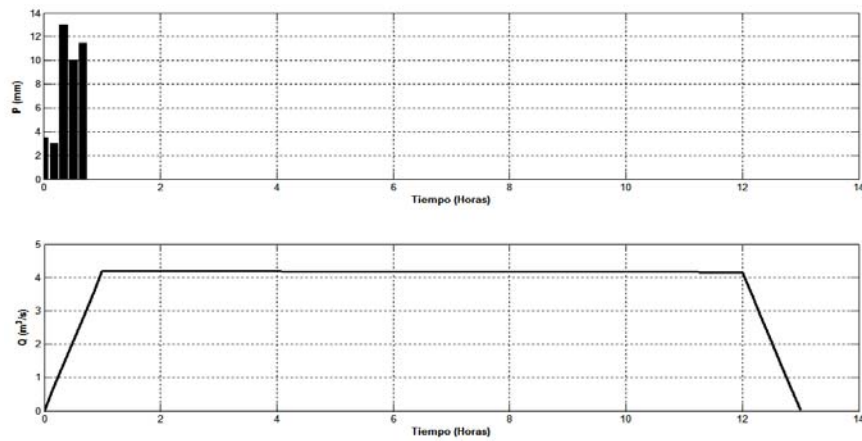
Si, se conoce el valor de retención máxima,  $S_{Máx}$ ; por medio de la ecuación [43] se puede determinar el valor del número de curva, de acuerdo con la siguiente ecuación (Chow et al. 1988):

$$CN = \left( \frac{25400}{S_{Máx} + 254} \right) \quad [44]$$

Según el comportamiento de los eventos graficados, se decide si son adecuados para continuar el análisis ó no, por ejemplo: En la Figura 31 se presentan los dos primeros eventos de la cuenca del río Yumbo (No 1 en a y No 2 en b). Se observa que el comportamiento del evento No 1 es claro, fácil de interpretar y se ajusta a la forma normal de un hidrograma de escorrentía superficial; mientras que el evento No 2 no representa claramente la forma de un hidrograma de escorrentía superficial, por lo tanto, puede afectar el respectivo análisis del método del SCS.



a) Evento de la cuenca del río Yumbo (No 1).



b) Evento de la cuenca del río Yumbo (No 2).

**Figura 31.** Comportamiento de los hidrogramas de escorrentía superficial.

Después de analizar la información de las estaciones de precipitación y de caudal con registro continuo mediante el proceso descrito anteriormente, se obtienen los eventos definitivos para realizar el estudio (ver Tablas 31, 32 y 33).

**Tabla 31.** Eventos definitivos de la cuenca del río Yumbo.

No	FECHA			Precipitación Total Acumulada (mm)	Q <sub>Máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)
	Día	Mes	Año		
1	2	4	1999	34.0	12.0
2	26	10		26.7	17.5
3	8	11	2000	30.0	1.4
4	23	3	2002	22.0	18.9
5	28	4		47.8	22.2
6	13	7	2003	28.5	5.5
7	20	11		40.6	5.9
8	8	4	2005	38.7	2.5
9	20	4	2007	59.3	4.2
10	26	1	2008	49.3	3.3

**Tabla 32.** Eventos definitivos de la cuenca del río Lili.

No	FECHA			Precipitación Total Acumulada (mm)	Q <sub>Máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)
	Día	Mes	Año		
1	21	3	1995	67.9	27.0
2	5	4	1996	41.0	18.2
3	11	5		42.5	22.0
4	14	10		47.5	34.4
5	17	1	1997	63.7	22.4
6	6	4		59.8	30.3
7	23	2	1999	50.8	24.6
8	24	2		28.5	28.6
9	28	3		56.4	17.6
10	6	5	2000	72.3	5.5
11	4	9		40.0	5.2
12	4	9		39.0	8.4
13	23	2	2001	41.0	14.3
14	4	3		69.5	7.9
15	16	3		26.3	3.3

**Tabla 33.** Eventos definitivos de la cuenca del río Meléndez.

No	FECHA			Precipitación Total Acumulada (mm)	Q <sub>Máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)
	Día	Mes	Año		
1	23	1	1997	46.1	17.8
2	28	5	1998	42.2	23.4
3	28	5		65.1	20.0
4	6	8		55.7	4.5
5	24	2	1999	62.2	62.4
6	8	5		45.7	35.3
7	13	5		51.0	39.3
8	25	3	2000	29.7	5.0
9	5	5		35.3	6.8
10	22	6		44.3	15.6
11	23	2	2001	48.0	10.5
12	6	7		80.0	5.0
13	29	5	2003	27.0	40.0
14	17	6		70.0	31.6
15	14	12		49.0	16.0
16	5	1	2004	25.5	4.3
17	7	1		27.0	5.0
18	7	4	2005	46.7	17.4

Con base en lo anterior, en la Tabla 34 se resumen los eventos iniciales para realizar el estudio y los eventos definitivos a tener en cuenta.

**Tabla 34.** Tabla resumen de los eventos considerados.

CUENCA	NUMERO TOTAL DE EVENTOS	NUMERO DE EVENTOS CONSIDERADOS
Yumbo	27	10
Lili	19	15
Meléndez	29	18

## 5.2. Condición de humedad antecedente (AMC) y tiempo de concentración ( $T_c$ )

La condición de humedad antecedente indica el grado de saturación del terreno y dependiendo de esta condición el valor del número de curva ( $CN$ ) puede ser mayor o menor, a mayor grado de saturación el número de curva aumenta y viceversa (ver numeral 1.2). Es común encontrar que los eventos máximos se presenten en condiciones de humedad alta, debido a que el terreno se encuentra saturado y se disminuyen las pérdidas de agua por infiltración, por lo tanto, en épocas de lluvia es propicio para que exista desbordamiento de los ríos afectando a la población y sus alrededores; en las cuencas de estudio se observa que la condición de humedad que predomina es AMC III (véase Tabla 2), por tal motivo, es común que esta zona del departamento del Valle del Cauca presente muchos inconvenientes con el control del agua. En las Tablas 35, 36 y 37 se observan las condiciones de humedad dadas en las cuencas de estudio.

**Tabla 35.** Condiciones de humedad antecedente en la cuenca del río Yumbo.

No	Precipitación Antecedente 5 días (mm)	AMC
1	12	I
2	21	I
3	55	III
4	50	II
5	79	III
6	43	II
7	53	II
8	66	III
9	25	I
10	No Disponible	

**Tabla 36.** Condiciones de humedad antecedente en la cuenca del río Lili.

No	Precipitación Antecedente 5 días (mm)	AMC
1	9	I
2	82	III
3	60	III
4	31	I
5	105	III
6	6	I
7	82	III
8	148	III
9	55	III
10	87	III
11	48	II
12	48	II
13	70	III
14	0	I
15	10	I

**Tabla 37.** Condiciones de humedad antecedente en la cuenca del río Meléndez.

No	Precipitación Antecedente 5 días (mm)	AMC
1	85	III
2	131	III
3	131	III
4	67	III
5	58	III
6	127	III
7	46	II
8	50	II
9	51	II
10	41	II
11	120	III
12	0	I
13	34	I
14	38	II
15	50	II
16	26	I
17	91	III
18	14	I

Un análisis de estas condiciones de humedad antecedente y los números de curva ( $CN$ ) obtenidos se presenta más adelante (véase numeral 7).

El tiempo de concentración ( $T_c$ ), se define como el tiempo que tarda una gota de agua en viajar desde el punto más distante de la cuenca hasta una sección determinada (Punto de concentración); este tiempo de concentración mide el tiempo que se necesita para que toda la cuenca contribuya con escorrentía superficial a una sección considerada. Este parámetro puede estimarse mediante tres metodologías: aplicando fórmulas empíricas, realizando mediciones directas o mediante el análisis de hidrogramas; en el presente trabajo se estimó el tiempo de concentración empleando fórmulas empíricas y mediante el análisis de hidrogramas. Un análisis de las correlaciones entre estos métodos se presentará más adelante (véase numeral 7).

Dentro de las fórmulas empíricas empleadas se encuentran los métodos de: Kirpich, Agencia Federal de Aviación, SCS (velocidad promedio), Giandotti, Témez y Guaire (Chow et al., 1988). La aplicación de estas fórmulas depende del fin para el que fueron creadas, en este caso las características de las cuencas de estudio permiten la utilización de las fórmulas para calcular el tiempo de concentración. A continuación se resumen los resultados obtenidos de tiempo de concentración para las cuencas de estudio:

**Tabla 38.** Tiempo de concentración calculado para cada cuenca.

Método de cálculo	$T_c$ (h)		
	Yumbo	Lili	Meléndez
Análisis de hidrogramas	2.81	0.90	2.69
Kirpich	0.66	1.23	1.62
Agencia Federal	1.21	1.94	2.26
SCS (velocidad Promedio)	2.12	5.20	6.61
Giandotti	1.28	2.04	2.13
Témez	1.96	3.10	4.92
Guaire	3.44	5.12	7.68

En la Figura 32 se presenta el tiempo de concentración como el tiempo que existe entre el final de la precipitación de excesos y el cambio de concavidad de la gráfica del hidrograma de escorrentía superficial, esta metodología de análisis de hidrogramas se empleó en todos los eventos de las tres cuencas (Serrano, 1997):

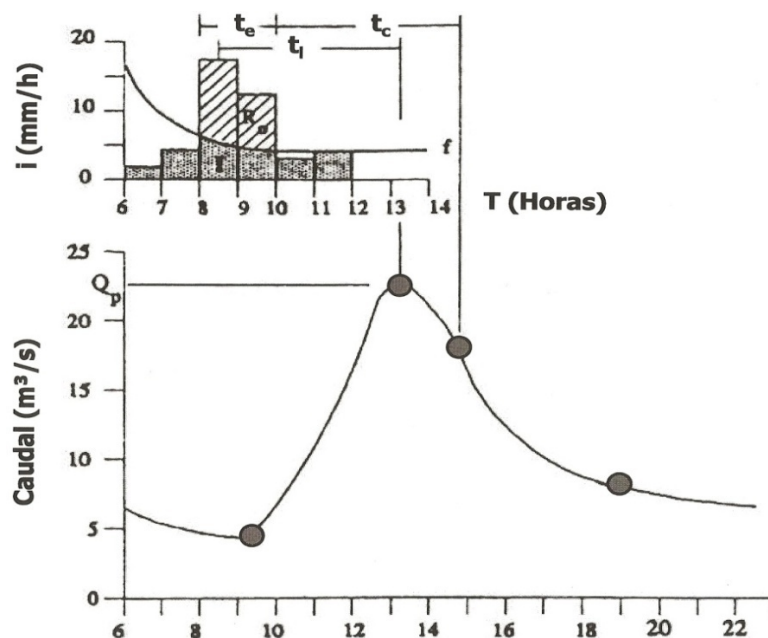


Figura 32. Relación temporal entre precipitación y caudal.

### 5.3. Combinaciones del método del SCS y los hidrogramas unitarios

Para realizar la calibración de los parámetros y el análisis de sensibilidad e incertidumbre propuesto, es necesario combinar el método del SCS con los diferentes hidrogramas unitarios seleccionados. El método del SCS maneja un parámetro denominado lambda ( $\lambda$ ), este parámetro se considera con dos posibilidades: una en la que posee un valor constante ( $\lambda=0,20$ ), y otra en el que será variable ( $\lambda=Variable$ ). Cada hidrograma unitario posee sus parámetros, lo cual indica que se combinan estos parámetros con los parámetros del método del SCS. En la Tabla 39 se observan los escenarios de cada combinación realizada para las tres cuencas.

Tabla 39. Escenarios para cada cuenca.

Combinación	Método del SCS	HU	Parámetros del HU	Parámetros considerados
1	$\lambda = 0,20$	SCS	$T_l = Variable$	$T_l$
2	$\lambda = Variable$			$CN, \lambda, T_l$
3	$\lambda = 0,20$	Snyder	$C_t = Variable$	$C_t, C_p$
4	$\lambda = Variable$		$C_p = Variable$	$C_t, C_p, CN, \lambda$
5	$\lambda = 0,20$	Clark	$T_c = Variable$	$K, T_c$
6	$\lambda = Variable$		$K = Variable$	$CN, \lambda, K, T_c$



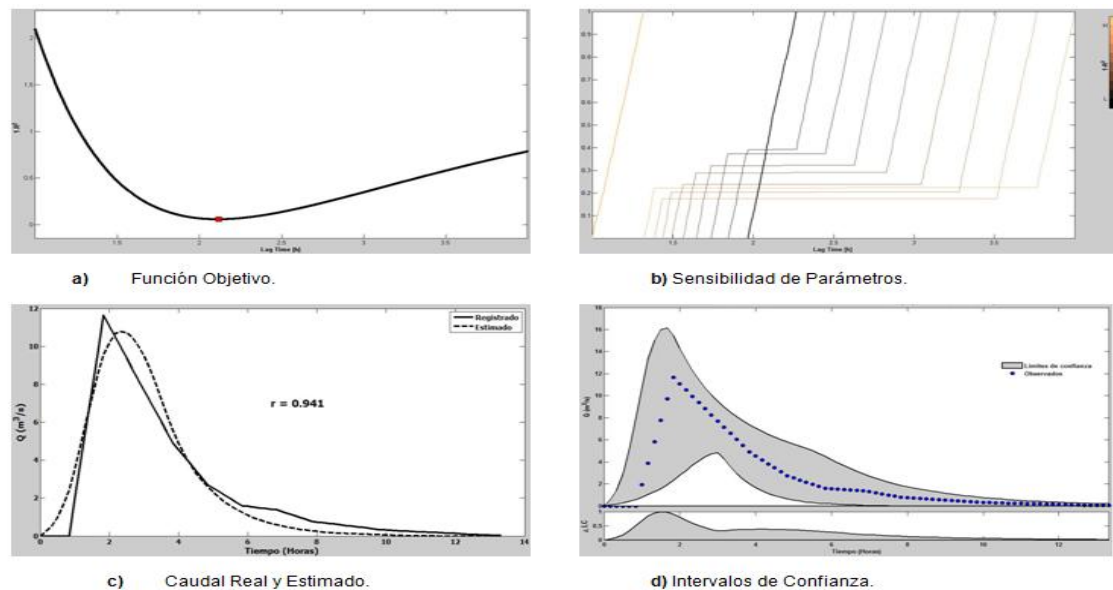
## 6. RESULTADOS OBTENIDOS

Para cada combinación (ver Tabla 39) se realizaron 10.000 simulaciones, seleccionando los mejores rangos de los parámetros (véase Tabla 53) los cuales garantizan que dentro de la banda de confianza se encuentra la mayor parte de los datos registrados y se establece el intervalo en el cual el modelo funciona óptimamente; del mismo modo, se elimina la carga computacional.

Los resultados obtenidos del comportamiento de los parámetros de los 6 tipos de combinaciones, están dados de la siguiente manera:

Para todas las combinaciones se organizó la información de tal modo que las gráficas de respuesta se encuentran enumeradas de la siguiente manera: en la gráfica a) se muestra la función objetivo del o los parámetros analizados para cada HU seleccionado, por medio de ésta se va a realizar el análisis de identificabilidad de cada parámetro; conjuntamente a este análisis de identificabilidad se relaciona el análisis de sensibilidad que presentan los parámetros durante el proceso de modelación en la gráfica b); la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado se encuentra en la gráfica c), por último, se observa la incertidumbre que presentan los modelos en la generación de la escorrentía superficial por medio de un análisis de banda de confianza GLUE en la gráfica d).

En la Figura 33 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos para la combinación 1 (este ejemplo se realiza para el primer evento de la cuenca Yumbo).



**Figura 33.** Estilo de gráfica resultante para la combinación 1.

En la Figura 33 se observa que el parámetro  $T_i$  es claramente identificable (En a), debido a que presenta un valor mínimo para el cual el modelo funciona óptimamente; cualquier variación de este parámetro modifica sustancialmente los resultados obtenidos, por lo tanto, se puede decir que este parámetro es altamente sensible (En b); la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado mediante el HU del SCS muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (En c), y se ajusta adecuadamente en la mayor parte de la gráfica del caudal observado; por lo tanto, representa adecuadamente las condiciones reales del evento dado. Adicionalmente, el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ) da un valor de 0.941 (muy cercano a uno), lo cual indica que no existe gran diferencia entre el caudal registrado y el estimado. La banda de confianza encierra la mayor parte de los datos (En d), por lo tanto, no existe gran incertidumbre en la respuesta y se garantiza que el modelo es válido para predecir este evento.

Todos los resultados obtenidos de la combinación 1, para los eventos de la cuenca Yumbo, Lili y Meléndez están disponibles en los anexos D, E y F respectivamente.

En la Figura 34 se presentan los resultados de la combinación 2 para el primer evento de la cuenca Yumbo.

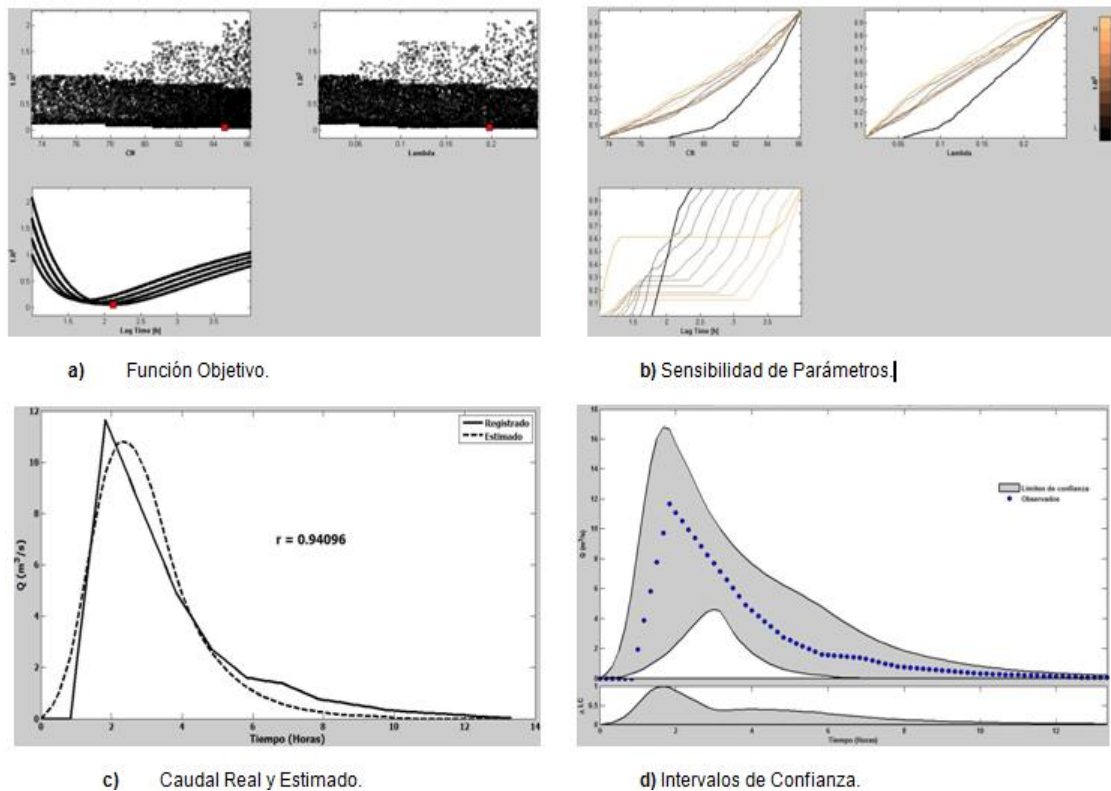


Figura 34. Estilo de gráfica resultante para la combinación 2.

En la Figura 34 se mantiene el comportamiento de identificabilidad para el parámetro  $T_i$  (En a), mientras que los parámetros  $CN$  y  $\lambda$  muestran un bajo nivel de identificabilidad; cualquier variación del parámetro  $T_i$  modifica sustancialmente los resultados obtenidos, hecho que no sucede con la variación de los parámetros  $CN$  y  $\lambda$ , por lo tanto, se puede decir que  $T_i$  es altamente sensible, y que  $CN$  y  $\lambda$  muestran un bajo nivel de sensibilidad (En b); al igual que en la combinación 1 el hidrograma registrado y el estimado muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (En c), el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ) da un valor de 0.94096, lo cual indica que no existe gran diferencia entre el caudal registrado y el estimado. La banda de confianza encierra la mayor parte de los datos (En d), por lo tanto, no existe gran incertidumbre en la respuesta y se garantiza que el modelo es válido para predecir este evento.

Los resultados obtenidos de la combinación 2, para los eventos de la cuenca Yumbo, Lili y Meléndez están disponibles en los anexos D, E y F respectivamente.

En la Figura 35 se presentan los resultados de la combinación 3 para el primer evento de la cuenca Yumbo.

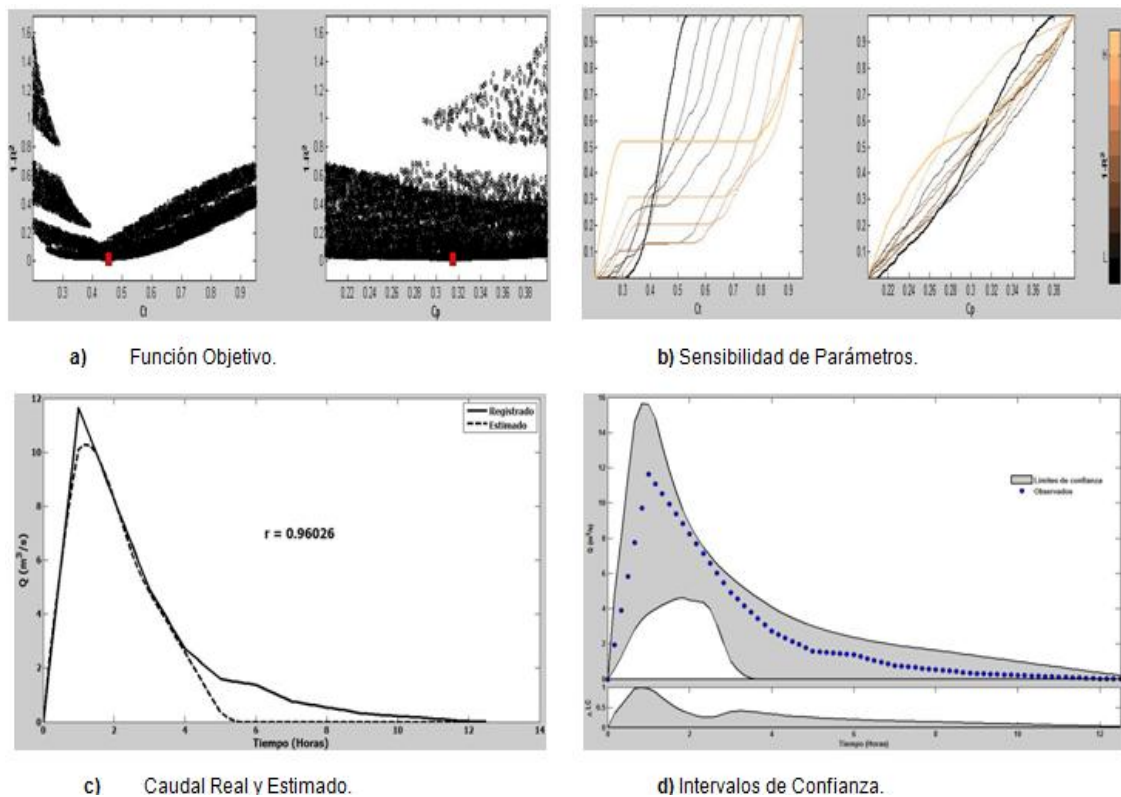


Figura 35. Estilo de gráfica resultante para la combinación 3.

En la Figura 35 se observa que el parámetro  $C_t$  es claramente identificable, mientras que  $C_p$  muestra un bajo nivel de identificabilidad (En a); el parámetro  $C_t$  muestra que es altamente sensible, mientras que  $C_p$  muestra un bajo nivel de sensibilidad (En b); la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado mediante el HU de Snyder muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (En c), y se ajusta mejor en la mayor parte de la gráfica del caudal registrado en comparación con el HU del SCS; sin embargo, es importante mencionar que la selección del evento para el HU de Snyder es diferente, debido a que para el caso del HU del SCS es necesario dejar un tiempo inicial antes de que el caudal aumente, mientras que para el HU de Snyder se puede tomar el hidrograma desde el punto exacto donde el caudal comienza a incrementarse. El coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ) da un valor de 0.96026, y la banda de confianza con el HU de Snyder es más estrecha y encierra la mayor parte de los datos (En d), por lo tanto, la incertidumbre en la respuesta disminuye en comparación con el HU del SCS.

Los resultados obtenidos de la combinación 3, para los eventos de la cuenca Yumbo, Lili y Meléndez están disponibles en los anexos D, E y F respectivamente.

En la Figura 36 se presentan los resultados de la combinación 4 para el primer evento de la cuenca Yumbo.

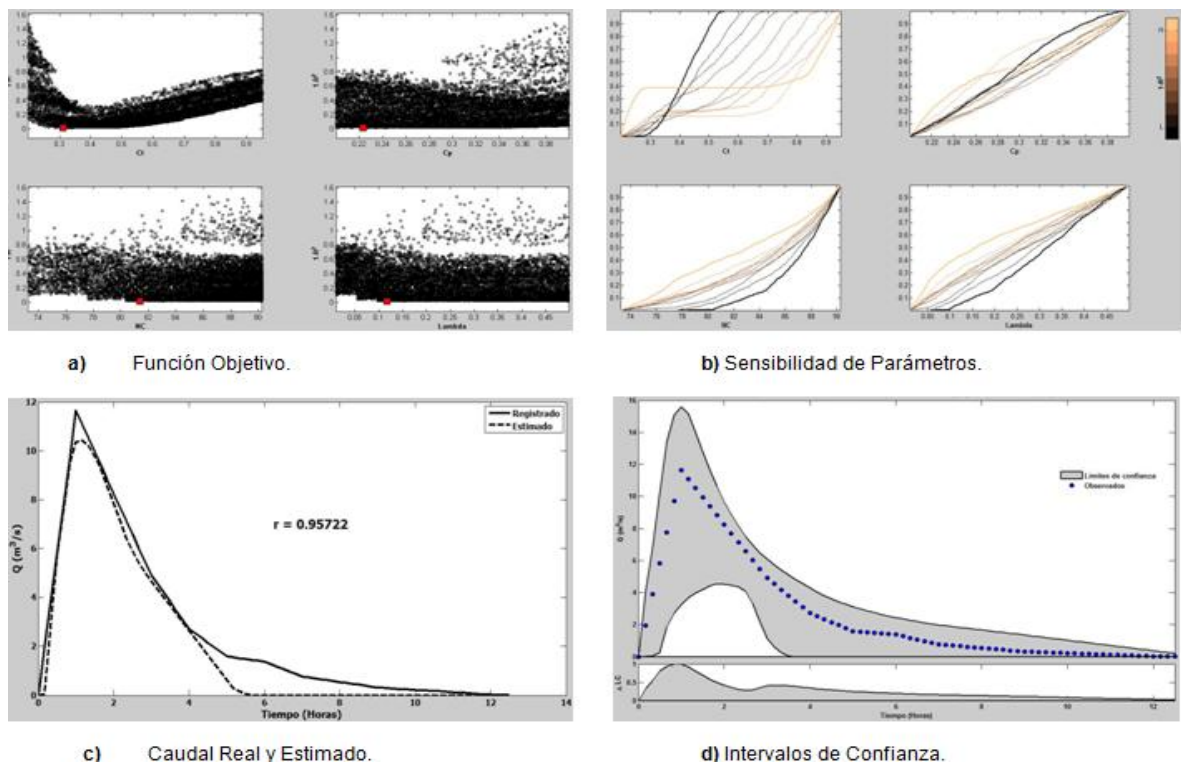


Figura 36. Estilo de gráfica resultante para la combinación 4.

En la Figura 36 se observa que se mantiene el comportamiento de identificabilidad para el parámetro  $C_t$ , pero para los parámetros  $C_p$ ,  $CN$  y  $\lambda$  se presenta un bajo nivel de identificabilidad (En a); de igual manera el parámetro  $C_t$  muestra que es altamente sensible, mientras que  $C_p$ ,  $CN$  y  $\lambda$  muestran un bajo nivel de sensibilidad (En b); la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (En c); el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ) da un valor de 0.95722 un poco menor en comparación del resultado de la combinación 3, y la banda de confianza encierra la mayor parte de los datos (En d).

Los resultados obtenidos de la combinación 4, para los eventos de la cuenca Yumbo, Lili y Meléndez están disponibles en los anexos D, E y F respectivamente.

En la Figura 37 se presentan los resultados de la combinación 5 para el primer evento de la cuenca Yumbo.

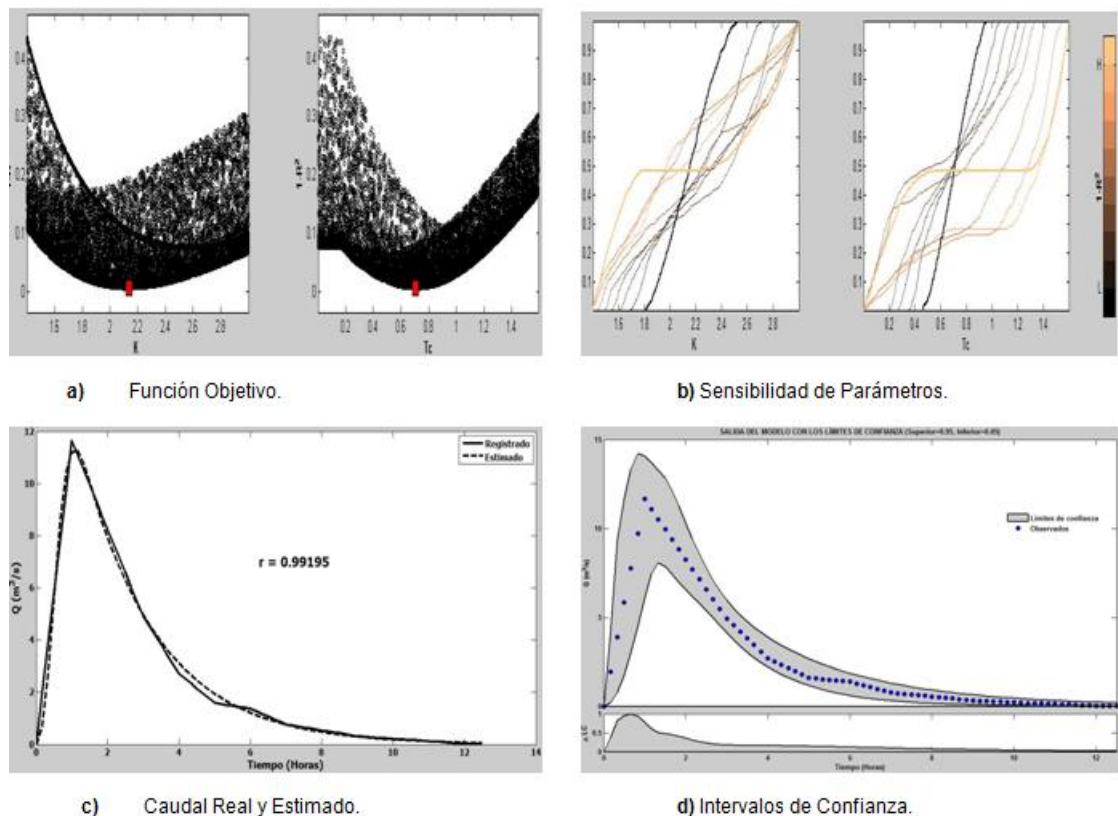


Figura 37. Estilo de gráfica resultante para la combinación 5.



En la Figura 37 se observa que los parámetros  $K$  y  $T_c$  son claramente identificables, el grado de identificabilidad es mejor en comparación con las combinaciones anteriores (En a); de igual manera estos parámetros son altamente sensibles (En b); la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado mediante el HU de Clark muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (En c), y el ajuste del caudal estimado para el HU de Clark es mejor en comparación a las combinaciones anteriores; el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ) da un valor de 0.99195 un valor muy cercano a uno, lo cual indica que no existe gran diferencia entre el hidrograma registrado y el estimado; la banda de confianza es muy estrecha y encierra la mayor parte de los datos (En d), de esto se puede concluir que la incertidumbre de este método es mínima en comparación al HU del SCS y el HU de Snyder.

Los resultados obtenidos de la combinación 5, para los eventos de la cuenca Yumbo, Lili y Meléndez están disponibles en los anexos D, E y F respectivamente.

En la Figura 38 de presentan los resultados de la combinación 6 para el primer evento de la cuenca Yumbo.

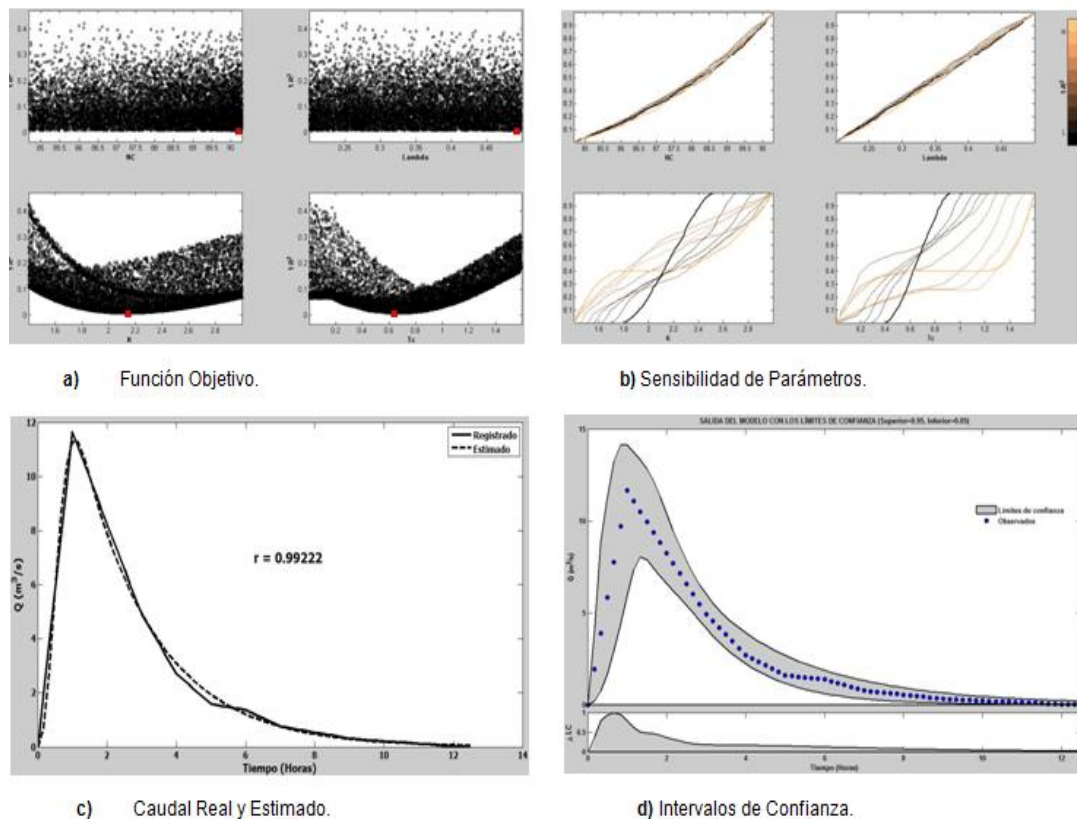


Figura 38. Estilo de gráfica resultante para la combinación 6.

En la Figura 38 se mantiene el comportamiento de identificabilidad de los parámetros  $K$  y  $T_c$ , mientras que los parámetros  $CN$  y  $\lambda$  muestran un bajo nivel de identificabilidad (En a); los parámetros  $K$  y  $T_c$  son altamente sensibles, y los parámetros  $CN$  y  $\lambda$  muestran un bajo nivel de sensibilidad (En b); el hidrograma estimado mediante el HU de Clark muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (En c), y se mantiene el ajuste del caudal estimado para el HU de Clark; el coeficiente de Nash-Sutcliffe ( $r$ ) da un valor de 0.99222, lo cual indica que no existe gran diferencia entre el hidrograma registrado y el estimado; la banda de confianza es muy estrecha y encierra la mayor parte de los datos (En d), la incertidumbre de este método es mínima en comparación del HU del SCS y HU de Snyder.

Los resultados obtenidos de la combinación 6, para los eventos de la cuenca Yumbo, Lili y Meléndez están disponibles en los anexos D, E y F respectivamente.

En las Tablas 40, 41 y 42 se presentan los resultados para la cuenca de Yumbo.

**Tabla 40.** Tabla resumen del HU del SCS para la cuenca del río Yumbo (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo D).

Datos Registrados			Combinación 1				Combinación 2				
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>i</sub> (h)	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>i</sub> (h)	CN	λ
1	11.65	8.75	0.941	10.80	2.12	84.74	0.941	10.81	2.11	84.65	0.20
2	17.22	8.13	0.954	14.47	1.40	89.09	0.957	14.84	1.37	92.84	0.48
3	1.10	0.80	0.959	1.08	1.95	71.20	0.965	1.11	1.90	87.66	0.68
4	18.67	18.92	0.905	16.86	3.00	98.89	0.905	16.85	3.00	98.79	0.11
5	21.91	10.53	0.880	20.90	1.29	77.86	0.896	19.05	1.43	83.74	0.39
6	5.23	2.60	0.942	4.87	1.39	78.67	0.945	4.79	1.41	64.64	0.06
7	5.67	4.26	0.835	5.24	2.10	73.31	0.858	5.02	2.21	79.81	0.34
8	2.40	1.93	0.945	2.59	1.78	68.96	0.948	2.57	1.80	62.33	0.13
9	3.82	3.16	0.946	3.92	2.10	59.64	0.947	3.95	2.07	29.56	0.02
10	3.01	2.76	0.906	3.88	1.55	64.33	0.930	3.75	1.46	29.36	0.01
<b>Med</b>	9.07	6.18	0.921	8.46	1.87	76.67	0.929	8.27	1.88	71.34	0.24
<b>Máx</b>	21.91	18.92	0.959	20.90	3.00	98.89	0.965	19.05	3.00	98.79	0.68
<b>Mín</b>	1.10	0.80	0.835	1.08	1.29	59.64	0.858	1.11	1.37	29.36	0.01



**Tabla 41.** Tabla resumen del HU de Snyder para la cuenca del río Yumbo (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo D).

Datos Registrados			Combinación 3					Combinación 4					
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	CN	λ
1	11.65	8.69	0.960	10.28	0.46	0.31	84.67	0.957	10.43	0.31	0.22	81.39	0.12
2	17.21	8.06	0.958	16.01	0.15	0.20	89.02	0.961	15.57	0.16	0.22	85.76	0.09
3	1.10	0.79	0.935	1.13	0.47	0.38	71.16	0.939	1.13	0.49	0.40	48.27	0.05
4	18.66	18.84	0.941	15.47	0.77	0.35	98.86	0.942	15.50	0.77	0.35	98.61	0.02
5	21.90	10.48	0.939	18.32	0.28	0.28	77.79	0.939	17.90	0.36	0.35	85.83	0.50
6	5.14	2.48	0.963	4.40	0.33	0.33	78.38	0.965	4.38	0.34	0.34	66.63	0.07
7	5.67	4.24	0.896	4.98	0.27	0.20	73.25	0.942	4.78	0.30	0.20	80.71	0.37
8	2.40	1.91	0.950	2.27	0.38	0.31	68.91	0.950	2.27	0.39	0.32	66.90	0.18
9	3.81	3.10	0.896	4.19	0.70	0.55	59.52	0.908	4.18	0.77	0.61	67.12	0.31
10	3.01	2.70	0.896	3.29	0.19	0.19	64.18	0.922	3.36	0.20	0.21	50.15	0.09
<b>Med</b>	9.06	6.13	0.934	8.03	0.40	0.31	76.58	0.943	7.95	0.41	0.32	73.14	0.18
<b>Máx</b>	21.90	18.84	0.963	18.32	0.77	0.55	98.86	0.965	17.90	0.77	0.61	98.61	0.50
<b>Mín</b>	1.10	0.79	0.896	1.13	0.15	0.19	59.52	0.908	1.13	0.16	0.20	48.27	0.02

**Tabla 42.** Tabla resumen del HU de Clark para la cuenca del río Yumbo (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo D).

Datos Registrados			Combinación 5					Combinación 6					
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)	T <sub>c</sub> (h)	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)	T <sub>c</sub> (h)	CN	λ
1	11.65	8.69	0.992	11.26	2.14	0.71	84.67	0.992	11.30	2.14	0.64	90.20	0.49
2	17.21	8.06	0.982	16.86	1.23	0.00	89.02	0.990	16.48	1.24	0.01	84.91	0.07
3	1.10	0.79	0.935	1.32	1.61	0.93	71.16	0.943	1.27	1.67	0.99	47.60	0.05
4	18.66	18.84	0.935	17.61	3.04	1.43	98.86	0.936	17.73	3.00	1.45	98.71	0.09
5	21.90	10.48	0.938	20.34	1.50	0.42	77.79	0.957	19.85	1.41	0.74	83.75	0.39
6	5.14	2.48	0.965	4.94	1.39	0.64	78.38	0.972	4.76	1.43	0.65	66.20	0.07
7	5.67	4.24	0.964	5.06	2.36	0.05	73.25	0.977	5.00	2.43	0.19	83.44	0.47
8	2.40	1.91	0.964	2.45	1.70	0.67	68.91	0.965	2.36	1.71	0.47	81.79	0.48
9	3.81	3.10	0.871	4.91	0.32	3.16	59.52	0.915	4.82	0.34	3.20	67.32	0.31
10	3.01	2.70	0.907	3.78	1.54	0.09	64.18	0.932	3.67	1.39	0.12	38.40	0.04
<b>Med</b>	9.06	6.13	0.945	8.85	1.68	0.81	76.58	0.958	8.72	1.68	0.85	74.23	0.25
<b>Máx</b>	21.90	18.84	0.992	20.34	3.04	3.16	98.86	0.992	19.85	3.00	3.20	98.71	0.49
<b>Mín</b>	1.10	0.79	0.871	1.32	0.32	0.00	59.52	0.915	1.27	0.34	0.01	38.40	0.04

En las Tablas 43, 44 y 45 se presentan los resultados para la cuenca de Lili.

**Tabla 43.** Tabla resumen del HU del SCS para la cuenca del río Lili (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo E).

Datos Registrados			Combinación 1				Combinación 2				
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>i</sub> (h)	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>i</sub> (h)	CN	λ
1	25.86	19.00	0.830	30.79	1.90	74.87	0.831	30.739	1.898	74.317	0.188
2	17.73	7.45	0.979	15.20	1.56	78.31	0.980	15.438	1.548	87.427	0.557
3	21.47	12.01	0.924	18.57	2.02	82.76	0.926	19.378	1.955	88.375	0.467
4	33.55	17.98	0.978	32.19	1.69	85.13	0.978	32.024	1.693	82.443	0.112
5	21.68	11.56	0.974	19.37	1.72	69.89	0.975	19.852	1.688	75.145	0.312
6	28.73	12.96	0.951	24.94	1.60	73.53	0.952	25.206	1.580	78.786	0.334
7	23.44	11.74	0.671	20.56	1.63	77.39	0.672	20.424	1.639	75.834	0.168
8	26.65	14.58	0.896	24.71	1.88	93.47	0.896	24.587	1.883	92.396	0.109
9	16.91	10.74	0.918	13.79	2.39	72.99	0.923	15.024	2.126	68.777	0.134
10	4.55	2.01	0.921	4.24	1.47	50.86	0.955	4.872	1.104	15.391	0.013
11	4.69	2.33	0.955	4.41	1.63	69.24	0.964	4.154	1.731	41.728	0.028
12	7.67	4.62	0.881	7.43	1.35	75.11	0.918	6.927	1.574	62.500	0.066
13	13.79	6.41	0.874	11.13	1.63	76.77	0.879	11.866	1.540	84.124	0.417
14	7.33	4.08	0.850	7.74	1.60	56.49	0.898	6.988	1.861	66.782	0.353
15	2.92	2.14	0.936	2.86	2.49	79.28	0.945	2.835	2.498	65.838	0.064
<b>Med</b>	17.13	9.31	0.902	15.86	1.77	74.41	0.913	16.021	1.755	70.657	0.221
<b>Máx</b>	33.55	19.00	0.979	32.19	2.49	93.47	0.980	32.024	2.498	92.396	0.557
<b>Mín</b>	2.92	2.01	0.671	2.86	1.35	50.86	0.672	2.835	1.104	15.391	0.013

**Tabla 44.** Tabla resumen del HU del Snyder para la cuenca del río Lili (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo E).

Datos Registrados			Combinación 3					Combinación 4					
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	CN	λ
1	25.45	18.22	0.676	23.99	0.18	0.16	74.20	0.807	24.34	0.18	0.16	83.66	0.55
2	17.73	7.45	0.966	16.50	0.60	0.71	78.31	0.967	16.69	0.59	0.71	83.42	0.35
3	21.46	11.97	0.912	19.81	0.05	0.08	82.72	0.939	18.85	0.08	0.10	71.83	0.01
4	33.55	17.98	0.974	30.08	0.61	0.60	85.13	0.975	30.32	0.60	0.60	89.67	0.47
5	21.67	11.51	0.965	18.75	0.32	0.36	69.83	0.965	18.93	0.32	0.36	71.97	0.24
6	26.90	10.31	0.933	24.53	0.37	0.58	70.56	0.960	23.94	0.50	0.74	80.22	0.46
7	23.43	11.62	0.745	18.30	0.18	0.21	77.26	0.764	19.69	0.17	0.21	83.50	0.40
8	26.64	14.45	0.793	25.30	0.01	0.04	93.38	0.945	24.27	0.06	0.09	93.45	0.21
9	16.90	10.65	0.948	13.21	0.19	0.18	72.88	0.940	13.97	0.05	0.09	61.99	0.06
10	4.52	1.97	0.800	4.81	0.09	0.18	50.76	0.883	4.51	0.27	0.40	52.61	0.22
11	3.75	1.40	0.937	3.76	0.04	0.11	66.29	0.961	3.50	0.10	0.20	48.09	0.07
12	6.21	2.91	0.802	4.87	0.09	0.50	71.46	0.940	5.60	0.19	0.47	49.47	0.04
13	13.79	6.34	0.745	12.66	0.10	0.32	76.67	0.784	12.88	0.09	0.32	57.47	0.02
14	7.00	3.47	0.845	6.93	0.03	0.08	55.32	0.949	6.59	0.06	0.10	62.90	0.30
15	2.92	2.14	0.960	2.50	0.87	0.53	79.28	0.961	2.48	0.87	0.54	66.46	0.07
<b>Med</b>	16.79	8.83	0.867	15.07	0.25	0.31	73.60	0.916	15.10	0.28	0.34	70.45	0.23
<b>Máx</b>	33.55	18.22	0.974	30.08	0.87	0.71	93.38	0.975	30.32	0.87	0.74	93.45	0.55
<b>Mín</b>	2.92	1.40	0.676	2.50	0.01	0.04	50.76	0.764	2.48	0.05	0.09	48.09	0.01

**Tabla 45.** Tabla resumen del HU del Clark para la cuenca del río Lili (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo E).

Datos Registrados			Combinación 5					Combinación 6					
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)	T <sub>c</sub> (h)	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)	T <sub>c</sub> (h)	CN	λ
1	25.45	18.22	0.651	29.59	2.13	0.27	74.20	0.817	30.10	2.19	0.12	82.42	0.48
2	17.73	7.45	0.982	15.58	1.09	1.99	78.31	0.984	16.64	1.20	1.46	58.32	0.00
3	21.46	11.97	0.843	21.09	1.88	0.08	82.72	0.921	21.30	1.80	0.22	70.31	0.00
4	33.55	17.98	0.988	30.59	1.46	1.87	85.13	0.990	31.74	1.51	1.33	76.51	0.00
5	21.67	11.51	0.986	20.22	1.52	0.74	69.83	0.987	19.92	1.46	0.89	63.06	0.11
6	26.90	10.31	0.933	28.59	0.00	2.33	70.56	0.969	26.11	0.49	2.13	73.16	0.25
7	23.43	11.62	0.824	18.72	1.98	0.18	77.26	0.828	19.52	1.93	0.29	82.08	0.34
8	26.64	14.45	0.664	25.75	1.97	0.32	93.38	0.948	26.04	1.94	0.15	93.38	0.20
9	16.90	10.65	0.984	14.90	2.06	0.35	72.88	0.985	14.94	2.06	0.14	74.71	0.24
10	4.52	1.97	0.772	5.90	1.01	0.05	50.76	0.901	5.53	0.85	0.60	23.35	0.04
11	3.75	1.40	0.900	3.90	1.09	0.23	66.29	0.992	3.50	1.14	0.31	31.88	0.02
12	6.21	2.91	0.773	6.03	0.46	0.19	71.46	0.946	5.28	0.82	0.20	50.62	0.04
13	13.79	6.34	0.637	12.61	1.17	0.31	76.67	0.835	12.64	1.28	0.18	84.05	0.42
14	7.00	3.47	0.720	6.83	1.69	0.18	55.32	0.950	6.91	1.71	0.05	62.27	0.29
15	2.92	2.14	0.976	2.65	2.27	2.69	79.28	0.978	2.66	2.26	2.69	66.32	0.07
<b>Med</b>	16.79	8.83	0.842	16.20	1.45	0.79	73.60	0.936	16.19	1.51	0.72	66.16	0.17
<b>Máx</b>	33.55	18.22	0.988	30.59	2.27	2.69	93.38	0.992	31.74	2.26	2.69	93.38	0.48
<b>Mín</b>	2.92	1.40	0.637	2.65	0.00	0.05	50.76	0.817	2.66	0.49	0.05	23.35	0.00

En las Tablas 46, 47 y 48 se presentan los resultados para la cuenca de Meléndez.

**Tabla 46.** Tabla resumen del HU del SCS para la cuenca del río Meléndez (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo F).

Datos Registrados			Combinación 1				Combinación 2				
No	Q <sub>Máx</sub> Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q <sub>Máx</sub> Estimado (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>l</sub> (h)	CN	r	Q <sub>Máx</sub> Estimado (m <sup>3</sup> /s)	T <sub>l</sub> (h)	CN	λ
1	15.65	7.42	0.856	20.71	2.88	74.93	0.866	20.74	2.87	59.44	0.04
2	20.83	7.67	0.748	28.88	2.03	77.82	0.816	27.34	2.18	82.99	0.35
3	16.84	7.46	0.787	22.84	2.49	64.04	0.813	22.51	2.55	71.97	0.34
4	4.03	1.77	0.870	5.15	2.72	58.01	0.900	5.00	2.81	60.63	0.23
5	56.99	19.02	0.703	71.32	1.67	77.87	0.725	67.60	1.80	65.65	0.01
6	32.33	3.47	0.978	29.28	0.77	68.25	0.978	29.30	0.77	68.55	0.20
7	33.80	3.45	0.952	32.86	0.32	64.93	0.966	30.84	0.38	51.89	0.09
8	2.00	0.42	0.970	2.24	1.21	69.21	0.974	2.14	1.38	82.34	0.45
9	3.37	1.39	0.704	3.96	2.67	69.60	0.706	3.92	2.70	67.43	0.18
10	14.13	1.38	0.968	14.53	0.56	63.39	0.974	13.74	0.59	47.76	0.09
11	7.90	0.84	0.980	7.18	0.47	58.94	0.986	7.17	0.64	80.26	0.65
12	4.56	0.60	0.901	4.82	0.85	43.62	0.916	4.44	0.89	28.44	0.09
13	37.19	3.84	0.970	33.72	0.76	82.66	0.970	33.73	0.76	77.26	0.11
14	29.31	2.87	0.955	31.58	0.52	53.85	0.962	30.64	0.53	44.85	0.12
15	14.38	2.77	0.976	15.82	1.25	64.54	0.981	14.92	1.31	47.10	0.07
16	2.84	0.62	0.768	2.40	1.92	74.07	0.770	2.17	2.19	86.21	0.50
17	3.10	0.78	0.973	3.45	1.67	73.66	0.973	3.45	1.67	72.46	0.19
18	15.11	3.03	0.950	18.03	1.15	66.59	0.968	16.90	1.22	42.27	0.04
<b>Med</b>	17.46	3.82	0.889	19.38	1.44	67.00	0.902	18.70	1.51	63.19	0.21
<b>Máx</b>	56.99	19.02	0.980	71.32	2.88	82.66	0.986	67.60	2.87	86.21	0.65
<b>Mín</b>	2.00	0.42	0.703	2.24	0.32	43.62	0.706	2.14	0.38	28.44	0.01

**Tabla 47.** Tabla resumen del HU del Snyder para la cuenca del río Meléndez (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo F).

Datos Registrados			Combinación 3					Combinación 4					
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	C <sub>t</sub>	C <sub>p</sub>	CN	λ
1	15.64	7.33	0.908	16.19	0.37	0.29	74.79	0.913	16.87	0.38	0.30	74.66	0.19
2	20.83	7.65	0.731	25.94	0.11	0.16	77.79	0.788	26.40	0.21	0.29	84.78	0.42
3	16.83	7.44	0.820	18.59	0.16	0.17	64.00	0.857	17.82	0.29	0.27	72.36	0.35
4	4.03	1.75	0.890	4.14	0.33	0.29	57.96	0.893	4.15	0.39	0.34	62.28	0.25
5	56.95	18.62	0.813	62.64	0.02	0.09	77.53	0.829	60.56	0.02	0.09	68.34	0.04
6	32.31	3.46	0.936	30.83	0.08	0.36	68.23	0.945	29.54	0.08	0.35	61.16	0.13
7	33.80	3.45	0.841	25.42	0.03	0.30	64.93	0.874	26.47	0.03	0.30	78.44	0.48
8	1.98	0.41	0.666	2.44	0.02	0.11	69.15	0.892	2.07	0.05	0.29	35.63	0.03
9	3.36	1.34	0.930	3.05	0.20	0.18	69.43	0.918	3.12	0.20	0.19	72.32	0.24
10	14.13	1.38	0.873	10.37	0.08	0.33	63.39	0.882	10.80	0.08	0.33	72.04	0.32
11	8.38	1.03	0.967	7.48	0.23	0.95	59.74	0.970	7.70	0.28	1.14	41.31	0.08
12	4.51	0.58	0.644	4.23	0.01	0.09	43.53	0.842	3.93	0.04	0.17	44.66	0.21
13	37.19	3.84	0.977	36.11	0.17	0.68	82.66	0.977	35.86	0.17	0.67	86.09	0.30
14	29.31	2.87	0.955	27.65	0.10	0.47	53.85	0.957	27.35	0.12	0.51	48.06	0.15
15	14.38	2.75	0.858	14.41	0.07	0.19	64.50	0.943	14.99	0.12	0.31	30.92	0.01
16	2.83	0.55	0.815	2.65	0.01	0.05	73.70	0.912	2.50	0.01	0.05	45.15	0.04
17	3.02	0.75	0.946	3.15	0.26	0.42	73.47	0.946	3.14	0.26	0.42	84.19	0.43
18	15.11	3.02	0.882	14.94	0.11	0.26	66.57	0.884	14.78	0.11	0.26	61.77	0.15
<b>Med</b>	17.48	3.79	0.858	17.24	0.13	0.30	66.96	0.901	17.11	0.16	0.35	62.45	0.21
<b>Máx</b>	56.95	18.62	0.977	62.64	0.37	0.95	82.66	0.977	60.56	0.39	1.14	86.09	0.48
<b>Mín</b>	1.98	0.41	0.644	2.44	0.01	0.05	43.53	0.788	2.07	0.01	0.05	30.92	0.01

**Tabla 48.** Tabla resumen del HU del Clark para la cuenca del río Meléndez (Todas las gráficas se encuentran en el Anexo F).

Datos Registrados			Combinación 5					Combinación 6					
No	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	P <sub>e</sub> (mm)	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)	T <sub>c</sub> (h)	CN	r	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	K (h)	T <sub>c</sub> (h)	CN	λ
1	15.64	7.33	0.889	19.24	3.63	0.89	74.79	0.894	19.22	3.59	0.88	62.86	0.06
2	20.83	7.65	0.701	28.41	2.31	0.10	77.79	0.764	26.49	2.66	0.09	87.16	0.56
3	16.83	7.44	0.861	20.78	3.08	0.23	64.00	0.856	20.01	3.25	0.05	64.84	0.21
4	4.03	1.75	0.857	4.89	3.26	0.74	57.96	0.869	4.80	3.20	1.13	62.14	0.25
5	56.95	18.62	0.711	59.88	1.96	0.11	77.53	0.800	59.85	1.93	0.24	65.68	0.02
6	32.31	3.46	0.937	34.69	0.67	0.35	68.23	0.953	34.03	0.64	0.39	61.10	0.13
7	33.80	3.45	0.955	35.08	0.28	0.29	64.93	0.971	31.64	0.31	0.47	48.54	0.07
8	1.98	0.41	0.569	2.82	0.84	0.22	69.15	0.891	2.43	0.40	0.19	35.61	0.03
9	3.36	1.34	0.977	3.45	3.50	0.38	69.43	0.977	3.49	3.49	0.30	70.99	0.22
10	14.13	1.38	0.971	14.22	0.48	0.58	63.39	0.977	13.91	0.44	0.80	35.79	0.04
11	8.38	1.03	0.968	7.55	0.51	1.09	59.74	0.971	7.89	0.55	0.87	73.44	0.41
12	4.56	0.60	0.927	4.36	0.90	0.81	43.62	0.933	4.51	0.91	0.07	22.20	0.06
13	37.19	3.84	0.979	37.25	0.50	1.00	82.66	0.979	36.91	0.51	0.99	85.87	0.29
14	29.31	2.87	0.957	30.77	0.46	0.53	53.85	0.960	30.39	0.44	0.65	44.40	0.12
15	14.38	2.75	0.824	18.22	1.23	0.32	64.50	0.944	16.62	1.17	0.29	32.23	0.02
16	2.83	0.55	0.665	2.69	1.82	0.32	73.70	0.926	2.77	1.83	0.23	83.79	0.41
17	3.02	0.75	0.959	3.48	1.61	1.19	73.47	0.959	3.50	1.60	1.20	82.11	0.36
18	15.11	3.02	0.895	18.20	1.15	0.48	66.57	0.921	17.68	1.09	0.77	42.73	0.04
<b>Med</b>	17.48	3.79	0.867	19.22	1.57	0.53	66.96	0.919	18.67	1.56	0.53	58.97	0.18
<b>Máx</b>	56.95	18.62	0.979	59.88	3.63	1.19	82.66	0.979	59.85	3.59	1.20	87.16	0.56
<b>Mín</b>	1.98	0.41	0.569	2.69	0.28	0.10	43.62	0.764	2.43	0.31	0.05	22.20	0.02



## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1. Ajuste de los modelos

En los anexos D, E y F se presenta la comparación entre los hidrogramas estimados y los registrados. En general, todos los modelos representan adecuadamente la forma del hidrograma de escorrentía superficial.

En las Tablas 49, 50 y 51 se resumen los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos y se indican con celdas sombreadas el mejor ajuste para cada evento. Como puede observarse, el HU de Clark en la mayoría de los eventos analizados presenta el valor mayor de este coeficiente, por lo tanto, el comportamiento de este HU en la estimación de la escorrentía superficial es el más adecuado y sus resultados representan confiablemente un hidrograma de escorrentía similar al hidrograma registrado.

**Tabla 49.** Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Yumbo.

No	Coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $r$ )					
	Combinación 1	Combinación 2	Combinación 3	Combinación 4	Combinación 5	Combinación 6
1	0.941	0.941	0.960	0.957	0.992	0.992
2	0.954	0.957	0.958	0.961	0.982	0.990
3	0.959	0.965	0.935	0.939	0.935	0.943
4	0.905	0.905	0.941	0.942	0.935	0.936
5	0.880	0.896	0.939	0.939	0.938	0.957
6	0.942	0.945	0.963	0.965	0.965	0.972
7	0.835	0.858	0.896	0.942	0.964	0.977
8	0.945	0.948	0.950	0.950	0.964	0.965
9	0.946	0.947	0.896	0.908	0.871	0.915
10	0.906	0.930	0.896	0.922	0.907	0.932

<b>Med</b>	0.921	0.929	0.934	0.943	0.945	0.958
<b>Máx</b>	0.959	0.965	0.963	0.965	0.992	0.992
<b>Mín</b>	0.835	0.858	0.896	0.908	0.871	0.915

**Tabla 50.** Relación del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Lili.

No	Coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $r$ )					
	Combinación 1	Combinación 2	Combinación 3	Combinación 4	Combinación 5	Combinación 6
1	0.830	0.831	0.676	0.807	0.651	0.817
2	0.979	0.980	0.966	0.967	0.982	0.984
3	0.924	0.926	0.912	0.939	0.843	0.921
4	0.978	0.978	0.974	0.975	0.988	0.990
5	0.974	0.975	0.965	0.965	0.986	0.987
6	0.951	0.952	0.933	0.960	0.933	0.969
7	0.671	0.672	0.745	0.764	0.824	0.828
8	0.896	0.896	0.793	0.945	0.664	0.948
9	0.918	0.923	0.948	0.940	0.984	0.985
10	0.921	0.955	0.800	0.883	0.772	0.901
11	0.955	0.964	0.937	0.961	0.900	0.992
12	0.881	0.918	0.802	0.940	0.773	0.946
13	0.874	0.879	0.745	0.784	0.637	0.835
14	0.850	0.898	0.845	0.949	0.720	0.950
15	0.936	0.945	0.960	0.961	0.976	0.978
<b>Med</b>	0.902	0.913	0.867	0.916	0.842	0.936
<b>Máx</b>	0.979	0.980	0.974	0.975	0.988	0.992
<b>Mín</b>	0.671	0.672	0.676	0.764	0.637	0.817

**Tabla 51.** Relación del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Meléndez.

No	Coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $r$ )					
	Combinación 1	Combinación 2	Combinación 3	Combinación 4	Combinación 5	Combinación 6
1	0.856	0.866	0.908	0.913	0.889	0.894
2	0.748	0.816	0.731	0.788	0.701	0.764
3	0.787	0.813	0.820	0.857	0.861	0.856
4	0.870	0.900	0.890	0.893	0.857	0.869
5	0.703	0.725	0.813	0.829	0.711	0.800
6	0.978	0.978	0.936	0.945	0.937	0.953
7	0.952	0.966	0.841	0.874	0.955	0.971
8	0.970	0.974	0.666	0.892	0.569	0.891
9	0.704	0.706	0.930	0.918	0.977	0.977
10	0.968	0.974	0.873	0.882	0.971	0.977
11	0.980	0.986	0.967	0.970	0.968	0.971
12	0.901	0.916	0.644	0.842	0.927	0.933
13	0.970	0.970	0.977	0.977	0.979	0.979
14	0.955	0.962	0.955	0.957	0.957	0.960
15	0.976	0.981	0.858	0.943	0.824	0.944
16	0.768	0.770	0.815	0.912	0.665	0.926
17	0.973	0.973	0.946	0.946	0.959	0.959
18	0.950	0.968	0.882	0.884	0.895	0.921
<b>Med</b>	0.889	0.902	0.858	0.901	0.867	0.919
<b>Máx</b>	0.980	0.986	0.977	0.977	0.979	0.979
<b>Mín</b>	0.703	0.706	0.644	0.788	0.569	0.764

De acuerdo con la información disponible en las anteriores Tablas 49, 50 y 51 se observa que el HU de Clark es el que mejor resultados proporciona en las cuencas de Yumbo y Lili, sin embargo, para la cuenca de Meléndez el HU del SCS y HU de Clark son los que mejor representan los eventos.

Con base en lo anterior se puede decir que el HU de Clark, es el que mejor se ajusta al modelo de abstracciones del SCS en la estimación de la escorrentía superficial para las cuencas analizadas, en ese orden le sigue el HU del SCS y por último el HU de Snyder.

Generalmente en todas las combinaciones para las tres cuencas consideradas en el presente estudio puede notarse que no existe gran diferencia entre los ( $r$ ) obtenidos cuando  $\lambda$  es constante o variable. Sin embargo, en los eventos 1, 3, 8, 10, 12, 13 y 14 de la cuenca de Lili, y 8, 12 y 16 de la cuenca de Meléndez se observa una mejora sustancial en el ajuste del modelo cuando  $\lambda$  es diferente de 0,20 (variable).

En las Figuras 39, 40 y 41 se presentan los diagramas de dispersión entre los  $Q_{Máx}$  estimados por cada modelo y el  $Q_{Máx}$  registrado cuando  $\lambda$  es constante e igual 0,20.

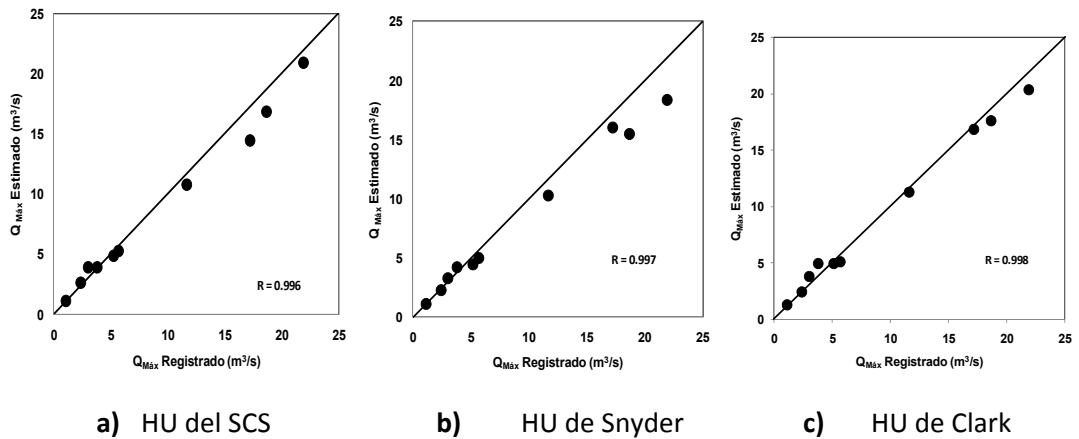


Figura 39. Comparación del caudal máximo para la cuenca Yumbo.

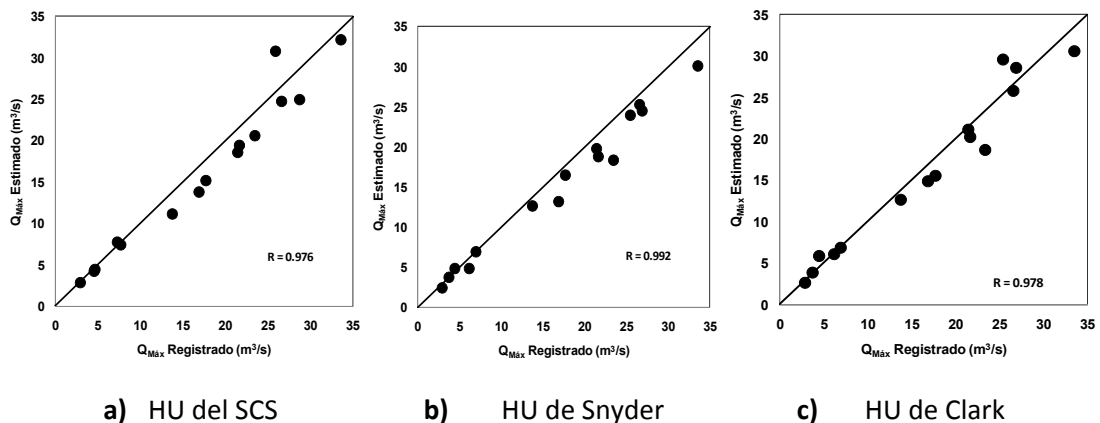


Figura 40. Comparación del caudal máximo para la cuenca Lili.

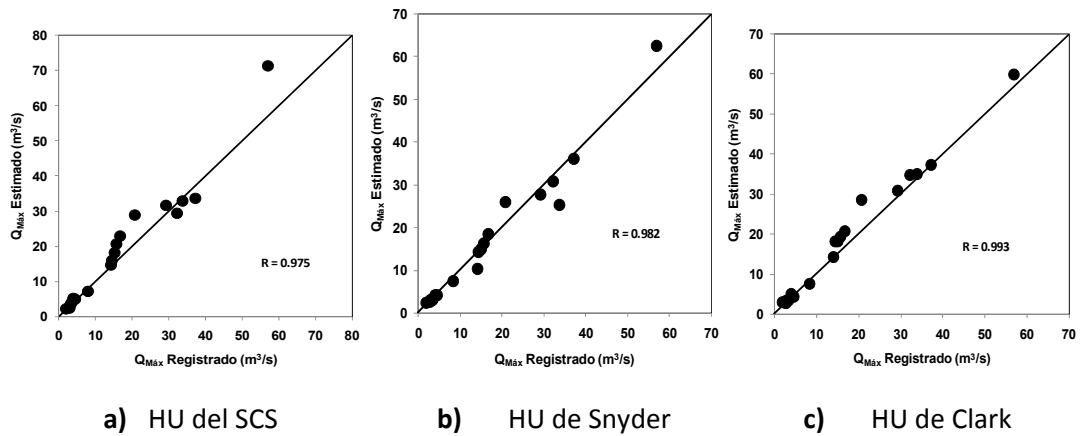


Figura 41. Comparación del caudal máximo para la cuenca Meléndez.

En las Figuras 42, 43 y 44 se presentan los diagramas de dispersión entre los  $Q_{Máx}$  estimados por cada modelo y el  $Q_{Máx}$  registrado cuando  $\lambda$  es variable.

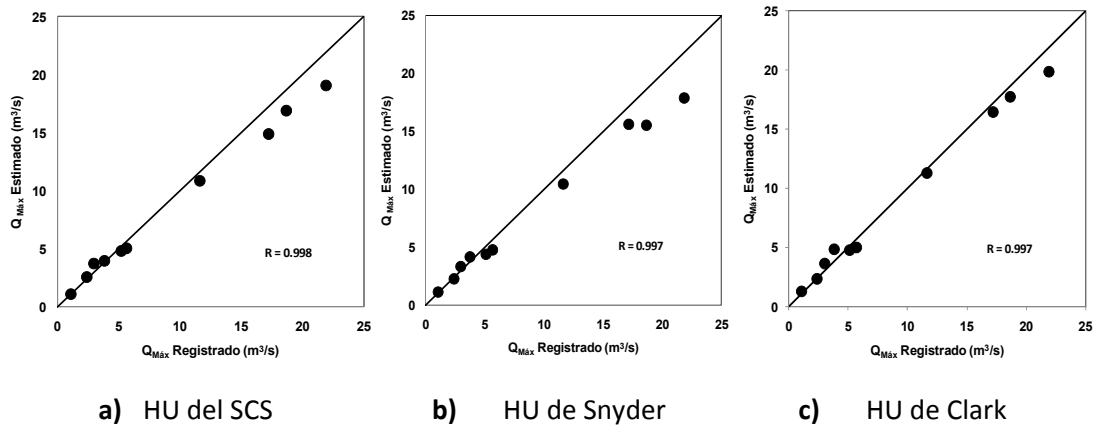


Figura 42. Comparación del caudal máximo para la cuenca Yumbo.

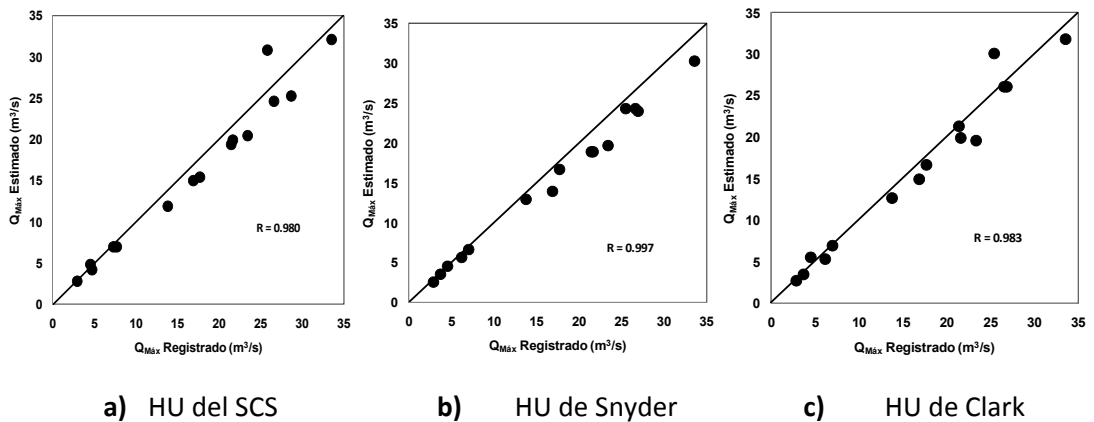
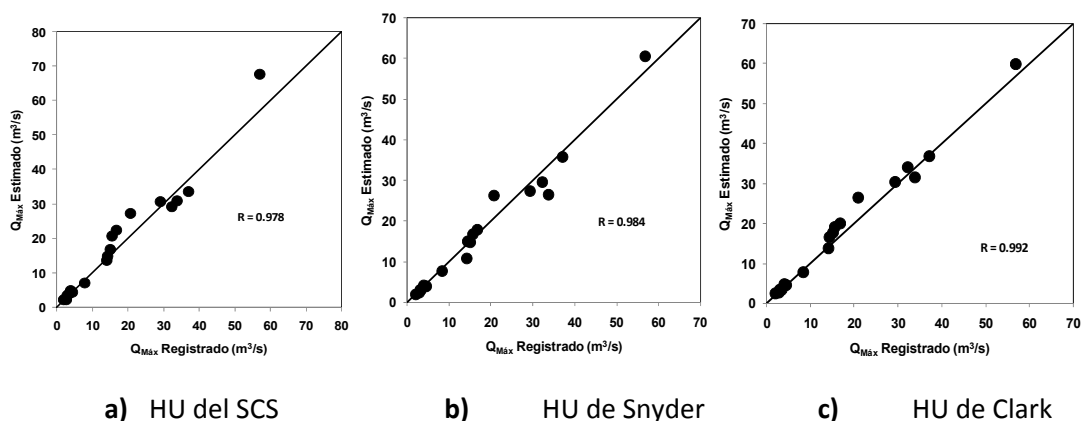


Figura 43. Comparación del caudal máximo para la cuenca Lili.



**Figura 44.** Comparación del caudal máximo para la cuenca Meléndez.

Con base en las Figuras 39 a 44 se observa que el método que mejor estima el caudal pico para los diferentes eventos analizados de todas las cuencas, es el HU de Clark, el cual presenta un valor del coeficiente de correlación  $R$  mayor en comparación de los otros modelos. El método que le sigue en la estimación del caudal pico es el HU de Snyder, por último el HU del SCS.

Los rangos obtenidos y el valor de cada parámetro se presentan en la Tabla 53 para las tres cuencas consideradas. A pesar de encontrar los mejores coeficientes de ajuste cuando  $\lambda$  es variable, se obtienen valores del número de curva que no representan su comportamiento normal, por lo tanto, se recomienda emplear  $\lambda = 0,20$  y esforzarse en los parámetros del HU para las combinaciones 1, 3 y 5. Adicionalmente, se puede observar que los valores de los parámetros de los HU's no cambian sustancialmente cuando  $\lambda$  es constante o variable. Con base en lo anterior, para el análisis de resultados solo se van a tener en cuenta las combinaciones 1, 3 y 5.

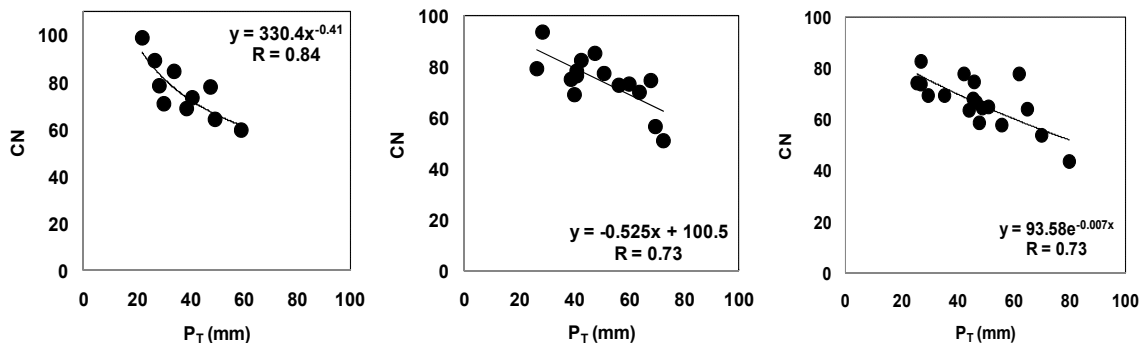
En la combinación 1 se encontró que el parámetro  $T_i$  varía entre 1.29 y 3.00 para Yumbo; entre 1.35 y 2.49 para Lili; y entre 0.32 y 2.88 para Meléndez.

Para la combinación 3 se encontró que el parámetro  $C_t$  y  $C_p$  varía entre 0.15-0.77 y 0.19-0.55 para Yumbo, respectivamente; entre 0.01-0.87 y 0.04-0.71 para Lili; y entre 0.01-0.37 y 0.05-0.95 para Meléndez.

Para la combinación 5 se encontró que el parámetro  $K$  y  $T_c$  varía entre 0.32-3.04 y 0.00-3.16 para Yumbo, respectivamente; entre 0.00-2.27 y 0.05-2.69 para Lili; y entre 0.28-3.63 y 0.10-1.19 para Meléndez.

De los rangos presentados anteriormente, puede observarse que a pesar de que las áreas de drenaje son diferentes los rangos de los parámetros de los HU no varían demasiado.

Con base en los resultados de cada cuenca, se encontró una relación entre el número de curva y la precipitación total de la siguiente manera:



a) Cuenca Yumbo.      b) Cuenca Lili.      c) Cuenca Meléndez.

**Figura 45.** Relación del número de curva y la precipitación total.

Las ecuaciones anteriores se emplearon para determinar el número de curva en el análisis de los diagramas de dispersión de la precipitación de excesos y el análisis de los hidrogramas obtenidos del procedimiento de modelación. Adicionalmente, el número de curva recomendado por la literatura se obtuvo con base en la Tabla 3, teniendo en cuenta el tipo y uso del suelo, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

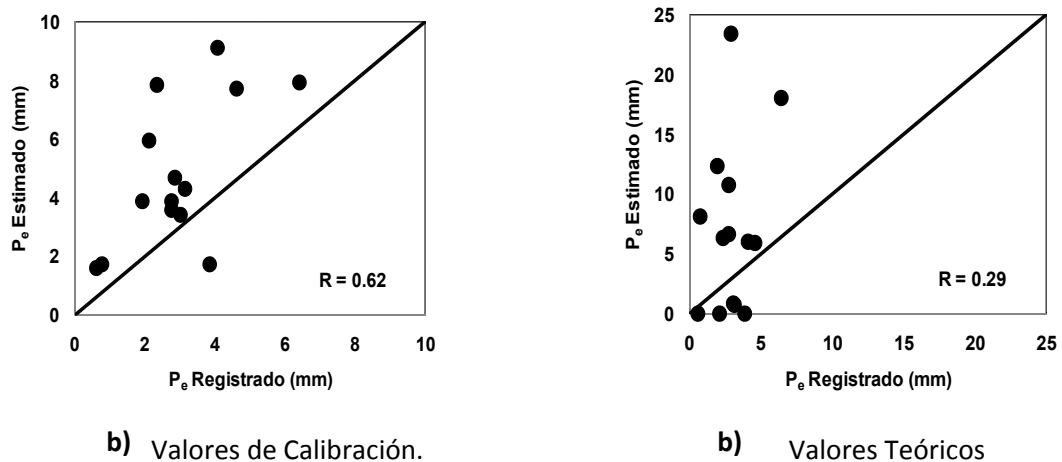
**Tabla 52.** Relación del número de curva recomendado por la literatura.

Cuenca	Descripción del uso de la tierra	CN
Yumbo	Bosque (Cubierta Buena)	70.00
	Cultivo (Con tratamiento)	71.00
	Pasto Natural (condiciones buenas)	74.00
	<b>Promedio</b>	<b>71.67</b>
Lili y Meléndez	Bosque (Cubierta Buena)	70.00
	Cultivo (Sin tratamiento)	88.00
	Pasto Natural (condiciones buenas)	74.00
	<b>Promedio</b>	<b>77.33</b>

Para realizar el análisis de precipitación de excesos y de los hidrogramas de escorrentía superficial, se estudio el 30% de los eventos de cada cuenca, en los cuales se determinó los valores recomendados por éste estudio, los valores recomendados por la literatura y compararlos con los valores registrados.

Los valores de los parámetros recomendados para los diferentes HU, surgen del promedio de los resultados obtenidos, y de las ecuaciones obtenidas del número de curva (ver Figura 45), los valores recomendados por la literatura, igualmente, surgen del promedio de estos, y el número de curva se obtuvo según la metodología propuesta para el método del SCS.

En la Figura 46 se presentan los diagramas de dispersión entre la  $P_e$  estimada por el método del SCS y  $P_e$  registrada, adicionalmente se realiza un análisis comparativo de los resultados de la  $P_e$  estimada cuando se emplean los valores recomendados por la literatura, y los resultados obtenidos después del proceso de calibración; cuando  $\lambda$  tiene un valor igual a 0,20.



**Figura 46.** Análisis del ajuste de la precipitación efectiva con el método del SCS.

En la Figura 46 se observa que el ajuste de la precipitación de excesos obtenida con el modelo del SCS es buena cuando se emplean los valores obtenidos después del proceso de calibración (En a), mostrando un coeficiente de correlación de 0,62; mientras que el ajuste del modelo del SCS cuando se emplean los valores recomendados por la literatura no es bueno (En b), mostrando un coeficiente de correlación de 0,29.

Adicionalmente, la  $P_e$  estimada por medio del modelo del SCS es mayor a la  $P_e$  registrada, pero cuando se realiza la calibración de los parámetros la diferencia entre los valores de la  $P_e$  estimada y  $P_e$  registrada disminuye notoriamente, por lo tanto, la calibración de parámetros garantiza mayor confiabilidad en los resultados obtenidos de la precipitación efectiva.

Con base en lo anterior, se puede decir que el método del SCS presenta un buen ajuste en la estimación de la precipitación de excesos cuando se emplean los valores obtenidos después de realizar un proceso de calibración de parámetros.



**Tabla 53.** Rangos obtenidos para cada parámetro en cada combinación.

Combinación	Parámetro	Yumbo	Lili	Meléndez	
1	T <sub>i</sub> (h)	Máx	3.00	2.49	2.88
		Med	1.87	1.77	1.44
		Mín	1.29	1.35	0.32
	CN	Máx	98.89	93.47	82.66
		Med	76.67	74.41	67.00
		Mín	59.64	50.86	43.62
2	CN	Máx	98.79	92.40	86.21
		Med	71.34	70.66	63.19
		Mín	29.36	15.39	28.44
	λ	Máx	0.68	0.56	0.65
		Med	0.24	0.22	0.21
		Mín	0.01	0.01	0.01
	T <sub>i</sub> (h)	Máx	3.00	2.50	2.87
		Med	1.88	1.75	1.51
		Mín	1.37	1.10	0.38
3	C <sub>t</sub>	Máx	0.77	0.87	0.37
		Med	0.40	0.25	0.13
		Mín	0.15	0.01	0.01
	C <sub>p</sub>	Máx	0.55	0.71	0.95
		Med	0.31	0.31	0.30
		Mín	0.19	0.04	0.05
	CN	Máx	98.86	93.38	82.66
		Med	76.58	73.60	66.96
		Mín	59.52	50.76	43.53
4	C <sub>t</sub>	Máx	0.77	0.87	0.39
		Med	0.41	0.28	0.16
		Mín	0.16	0.05	0.01
	C <sub>p</sub>	Máx	0.61	0.74	1.14
		Med	0.32	0.34	0.35
		Mín	0.20	0.09	0.05
	CN	Máx	98.61	93.45	86.09
		Med	73.14	70.45	62.45
		Mín	48.27	48.09	30.92
	λ	Máx	0.50	0.55	0.48
		Med	0.18	0.23	0.21
		Mín	0.02	0.01	0.01
5	K (h)	Máx	3.04	2.27	3.63
		Med	1.68	1.45	1.57
		Mín	0.32	0.00	0.28
	T <sub>c</sub> (h)	Máx	3.16	2.69	1.19
		Med	0.81	0.79	0.53
		Mín	0.00	0.05	0.10
	CN	Máx	98.86	93.38	82.66
		Med	76.58	73.60	66.96
		Mín	59.52	50.76	43.62
6	CN	Máx	98.71	93.38	87.16
		Med	74.23	66.16	58.97
		Mín	38.40	23.35	22.20
	λ	Máx	0.49	0.48	0.56
		Med	0.25	0.17	0.18
		Mín	0.04	0.00	0.02
	K (h)	Máx	3.00	2.26	3.59
		Med	1.68	1.51	1.56
		Mín	0.34	0.49	0.31
	T <sub>c</sub> (h)	Máx	3.20	2.69	1.20
		Med	0.85	0.72	0.53
		Mín	0.01	0.05	0.05

En las Tablas 54, 55 y 56 se resumen los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos y se indican con celdas sombreadas el mejor ajuste para cada evento. Como puede observarse, el HU de Clark en la mayoría de los eventos analizados presenta el valor mayor de este coeficiente, por lo tanto, el comportamiento de este HU en la estimación de la escorrentía superficial es el más adecuado y sus resultados representan confiablemente un hidrograma de escorrentía similar al hidrograma registrado.

**Tabla 54.** Resumen del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Yumbo.

No	Coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $r$ )		
	Combinación 1	Combinación 3	Combinación 5
1	0.941	0.960	0.992
2	0.954	0.958	0.982
3	0.959	0.935	0.935
4	0.905	0.941	0.935
5	0.880	0.939	0.938
6	0.942	0.963	0.965
7	0.835	0.896	0.964
8	0.945	0.950	0.964
9	0.946	0.896	0.871
10	0.906	0.896	0.907

<b>Med</b>	0.921	0.934	0.945
<b>Máx</b>	0.959	0.963	0.992
<b>Mín</b>	0.835	0.896	0.871

**Tabla 55.** Relación del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Lili.

No	Coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $r$ )		
	Combinación 1	Combinación 3	Combinación 5
1	0.830	0.676	0.651
2	0.979	0.966	0.982
3	0.924	0.912	0.843
4	0.978	0.974	0.988
5	0.974	0.965	0.986
6	0.951	0.933	0.933
7	0.671	0.745	0.824
8	0.896	0.793	0.664
9	0.918	0.948	0.984
10	0.921	0.800	0.772
11	0.955	0.937	0.900
12	0.881	0.802	0.773
13	0.874	0.745	0.637
14	0.850	0.845	0.720
15	0.936	0.960	0.976

<b>Med</b>	0.902	0.867	0.842
<b>Máx</b>	0.979	0.974	0.988
<b>Mín</b>	0.671	0.676	0.637

**Tabla 56.** Relación del coeficiente de Nash-Sutcliffe para la cuenca del río Meléndez.

No	Coeficientes de Nash-Sutcliffe ( $r$ )		
	Combinación 1	Combinación 3	Combinación 5
1	0.856	0.908	0.889
2	0.748	0.731	0.701
3	0.787	0.820	0.861
4	0.870	0.890	0.857
5	0.703	0.813	0.711
6	0.978	0.936	0.937
7	0.952	0.841	0.955
8	0.970	0.666	0.569
9	0.704	0.930	0.977
10	0.968	0.873	0.971
11	0.980	0.967	0.968
12	0.901	0.644	0.927
13	0.970	0.977	0.979
14	0.955	0.955	0.957
15	0.976	0.858	0.824
16	0.768	0.815	0.665
17	0.973	0.946	0.959
18	0.950	0.882	0.895

<b>Med</b>	0.889	0.858	0.867
<b>Máx</b>	0.980	0.977	0.979
<b>Mín</b>	0.703	0.644	0.569

De acuerdo con la información disponible en las anteriores Tablas 54, 55 y 56 se observa que el HU de Clark es el que mejor resultados proporciona en la cuenca de Yumbo, sin embargo, para las cuencas de Lili y Meléndez el HU del SCS y HU de Clark son los que mejor representan los eventos.

Con base en lo anterior se puede decir que el HU de Clark, es el que mejor se ajusta al modelo de abstracciones del SCS en la estimación de la escorrentía superficial para las cuencas analizadas, en ese orden le sigue el HU del SCS y por último el HU de Snyder.

En las Figuras 47 a 49, se presenta un análisis comparativo de los hidrogramas de escorrentía calculados mediante los modelos ajustados, con respecto a los que se obtendrían utilizando los parámetros sugeridos por la literatura; este análisis se realiza para el evento 15 de la cuenca Meléndez.

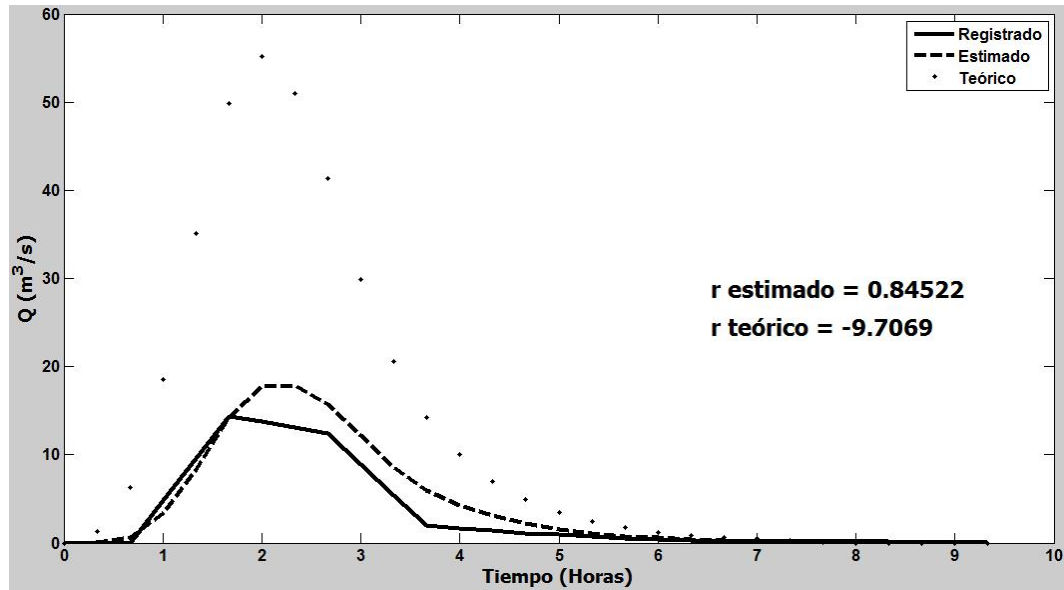


Figura 47. Comparación del ajuste para el HU del SCS.

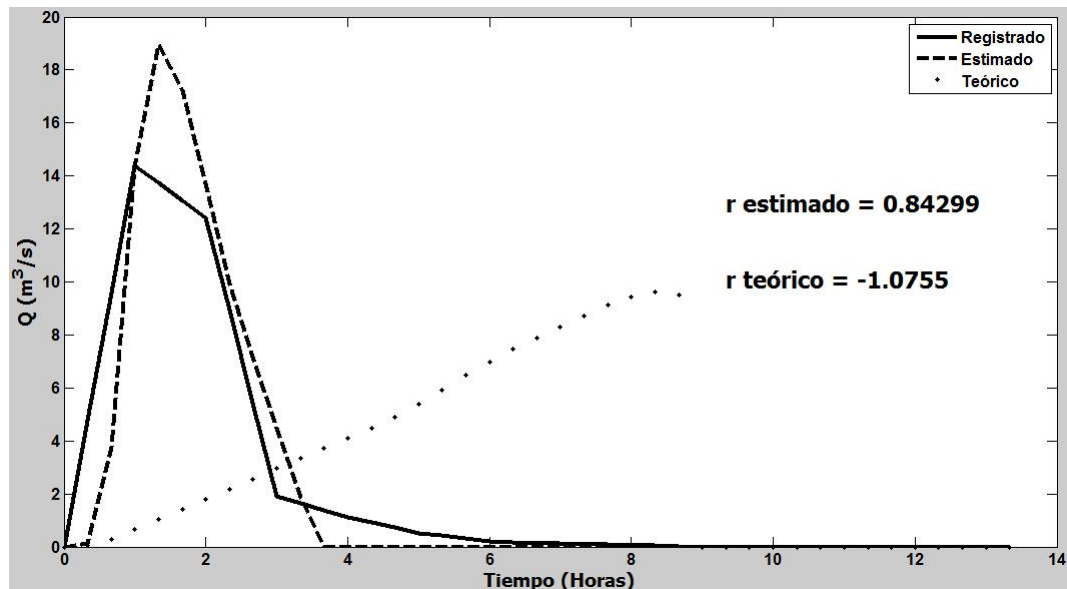
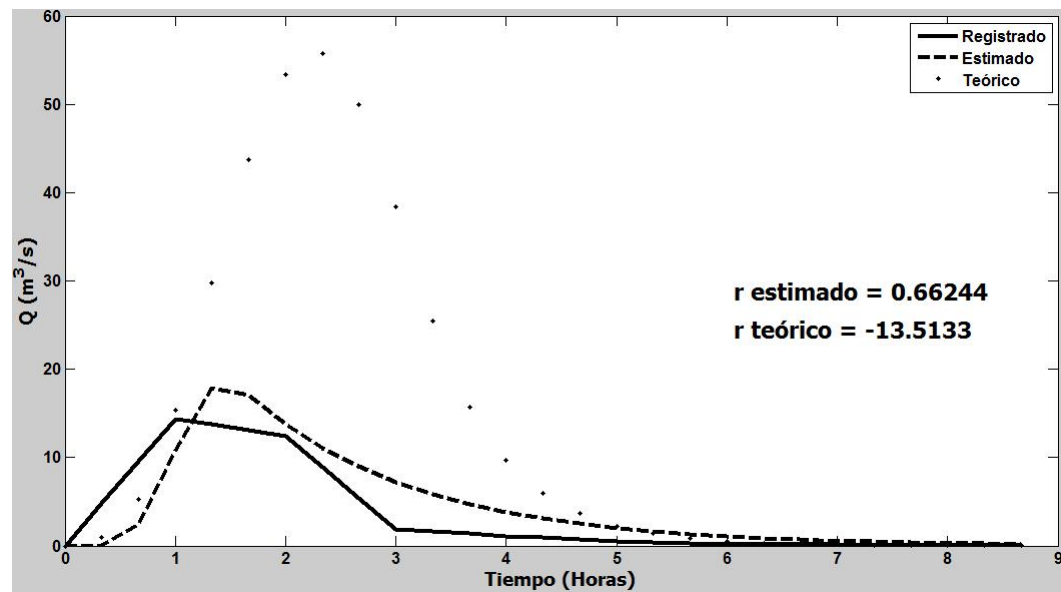


Figura 48. Comparación del ajuste para el HU de Snyder.



**Figura 49.** Comparación del ajuste para el HU de Clark.

Con base en las Figuras 47 a 49, se puede observar la importancia que tiene el proceso de calibración en la estimación de la escorrentía superficial, donde se muestra claramente que los valores recomendados por la literatura no representan hidrogramas que se ajusten adecuadamente al comportamiento observado en las cuencas consideradas; mientras que los hidrogramas obtenidos del proceso de modelación se ajustan adecuadamente al hidrograma registrado.

En el caso de los hidrogramas del SCS y de Clark se observa claramente que las estimaciones de caudal máximo son mayores que el caudal máximo registrado, pero cuando se realiza un proceso de calibración la diferencia entre el caudal máximo registrado y el estimado disminuye notoriamente.

En el caso del HU de Snyder se observa que la forma del hidrograma estimado cuando se emplean los valores recomendados por la literatura no representa el comportamiento de los hidrogramas estimados, mientras que emplear los valores obtenidos después del proceso de calibración mejora notoriamente el comportamiento del hidrograma estimado.

Todas las gráficas de análisis comparativo de los hidrogramas de escorrentía calculados mediante los modelos ajustados, con respecto a los que se obtendrían utilizando los parámetros sugeridos por la literatura se encuentran en el anexo C.

## 7.2. Identificabilidad y sensibilidad de los parámetros

De acuerdo con los resultados observados en los anexos D, E y F; para el HU del SCS se manejan 3 parámetros que son:  $T_t$ ,  $\lambda$  y  $CN$ . De estos parámetros el que domina la certeza del método es el parámetro  $T_t$ , por medio de las gráficas de función objetivo se demuestra que este parámetro es claramente identificable y que tiene una misma tendencia durante todos los eventos; presentando adicionalmente un alto nivel de sensibilidad. Por otro lado los parámetros de  $CN$  y  $\lambda$ , presentan un bajo nivel de sensibilidad y de identificabilidad, lo cual indica que la variación de estos parámetros no afecta sustancialmente el hidrograma de escorrentía superficial generado, sin embargo, en los hidrogramas calibrados el parámetro  $\lambda$  se encontró entre 0.01 y 0.68 valores bastante diferentes al valor típico empleado en la práctica de 0,20; debido a que este parámetro se encuentra directamente relacionado con el número de curva  $CN$ , cualquier variación importante de  $\lambda$ , implica un cambio sustancial en el  $CN$ .

Para el HU de Snyder se manejan 4 parámetros que son:  $C_t$ ,  $C_p$ ,  $CN$  y  $\lambda$ . Los parámetros de  $C_t$  y  $C_p$  dominan la certeza del método, pero el parámetro que muestra un nivel de identificabilidad y sensibilidad mayor entre los dos es  $C_t$ , lo cual indica que la variación de este parámetro modifica sustancialmente el resultado del método; al igual que el HU del SCS el comportamiento de los parámetros de  $CN$  y  $\lambda$  muestran un bajo nivel de identificabilidad y sensibilidad, por lo tanto se mantiene el concepto que un cambio en el valor de estos últimos parámetros no modifica radicalmente el hidrograma de escorrentía.

De acuerdo con los intervalos teóricos que se tienen para los parámetros de  $C_t$  y  $C_p$  que son 1,35-2,65 y 0,56-0,69 respectivamente, en los resultados obtenidos se encontró que el valor de  $C_t$  cambia sustancialmente para el territorio colombiano y siendo el parámetro más sensible modifica la aplicación de este método en el país; para el parámetro  $C_p$  el intervalo disminuye, lo cual indica que en el territorio colombiano este parámetro toma valores menores a los teóricos, pero como este parámetro no presenta un nivel alto de sensibilidad, los resultados del hidrograma de escorrentía no cambian drásticamente.

Para el HU de Clark se manejan 4 parámetros que son:  $CN$ ,  $\lambda$ ,  $K$  y  $T_c$ . Los parámetros que dominan la certeza del método son  $K$  y  $T_c$ , ambos se muestran altamente identificables y tienen un nivel alto de sensibilidad, lo cual indica que cualquier modificación de estos parámetros cambia sustancialmente los resultados del método.

### **7.3. Incertidumbre de las estimaciones**

De acuerdo con los resultados observados en los anexos D, E y F, el hidrograma de escorrentía estimado con el HU del SCS se ajusta adecuadamente al hidrograma registrado en la mayoría de los eventos, es importante tener en cuenta que en la selección del evento para el HU del SCS es necesario dejar un tiempo inicial antes de que el caudal aumente (aproximadamente 0,67 horas de tiempo inicial), con el fin de que los resultados que se obtengan se ajusten adecuadamente al hidrograma registrado. En la estimación de estos hidrogramas se encuentra que la banda de confianza encierra la mayoría de los datos, por lo tanto, el modelo es confiable.

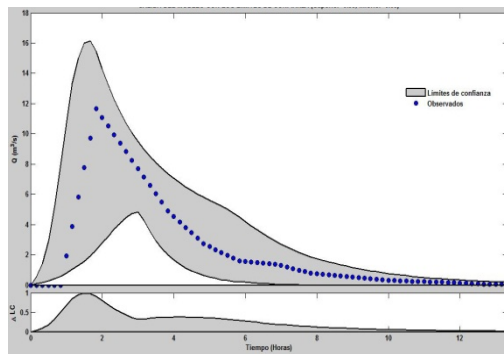
El ancho de la banda de confianza en la estimación del hidrograma de escorrentía con el HU de Snyder disminuye en comparación con la presentada en el HU del SCS, lo cual indica que disminuye la incertidumbre en la estimación.

El hidrograma de escorrentía estimado por el HU de Clark es el que mejor representa las condiciones observadas de la cuenca, en comparación con los anteriores HU del SCS y HU de Snyder, el HU de Clark da valores de caudal pico más cercanos, su forma del hidrograma se ajusta adecuadamente al hidrograma registrado y es el que menor incertidumbre presenta en los resultados, debido a que la banda de confianza es la más estrecha en comparación con los otros métodos.

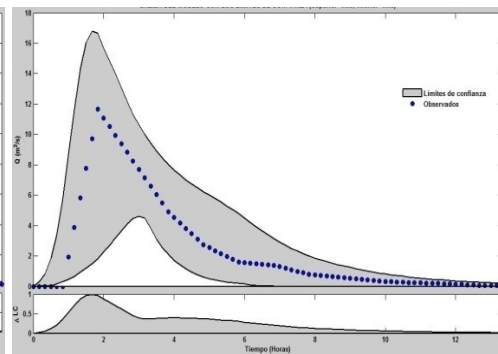
Con el HU de Clark en la comparación de los hidrogramas de escorrentía estimados con los hidrogramas registrados se mejora el comportamiento y predicción del caudal pico, debido a que la incertidumbre disminuye y los datos estimados se ajustan mejor a los registrados; en la cuenca de Lili y Meléndez no existe una gran diferencia en el comportamiento del HU del SCS en comparación con el de Clark, por lo tanto, se puede decir que para cuencas con áreas grandes el HU del SCS puede servir como método de solución.

En la Figura 50 se presenta claramente el análisis de cómo disminuye la incertidumbre dependiendo la combinación realizada (evento 1 cuenca Yumbo).

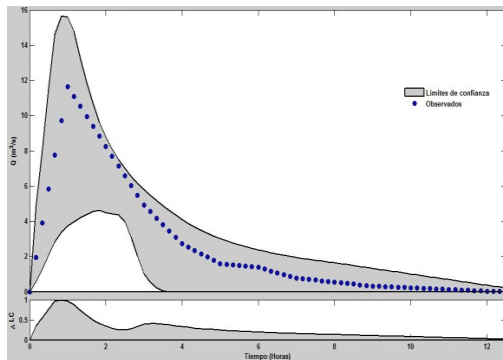




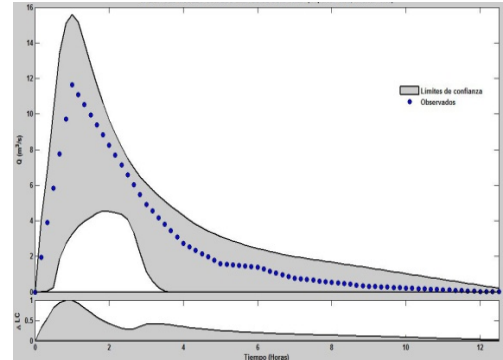
a) Combinación 1.



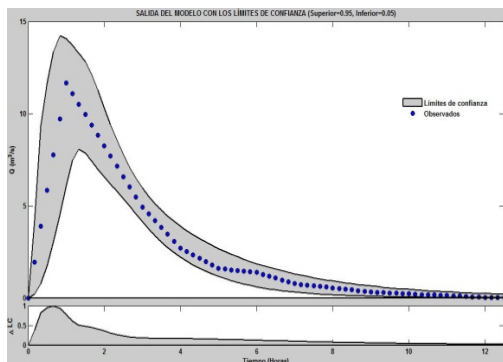
b) Combinación 2.



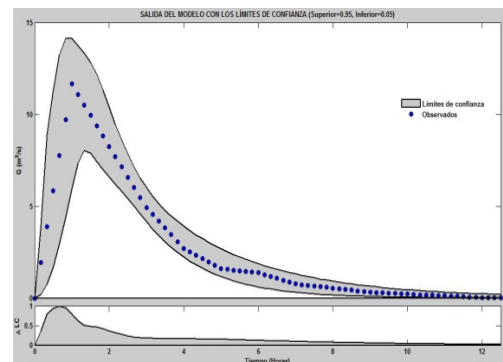
c) Combinación 3.



d) Combinación 4.



e) Combinación 5.



f) Combinación 6.

**Figura 50.** Análisis de Incertidumbre para las diferentes combinaciones.

Es importante mencionar que el HU de Clark es el que menor incertidumbre presenta en las estimaciones.

## 7.4. Valores típicos en el diseño hidrológico

### 7.4.1. Relación de $T_c$ empírico con $T_c$ medido

En la Tabla 38 se presentan varios  $T_c$  calculados por medio de fórmulas teóricas, las cuales relacionan características morfométricas de la cuenca; donde el  $T_c$  SCS (velocidad Promedio) es el que más se aproxima al  $T_c$  registrado para la cuenca de Yumbo, el método de Kirpich para la cuenca Lili y el método de Agencia Federal para la cuenca de Meléndez; por lo tanto, no hay un solo método empírico para obtener con certeza el  $T_c$  registrado en una cuenca.

Un gran inconveniente que existe con la aplicación de fórmulas empíricas para obtener el tiempo de concentración, es que para una cuenca solo es posible encontrar un solo valor de tiempo de concentración, pero en la realidad para cada evento que se presenta en una cuenca existe un tiempo de concentración diferente. En el análisis de los eventos para las cuencas consideradas, se encontró que el tiempo de concentración para la cuenca de Yumbo varía entre 0,33-11,67; para Lili entre 0,33-7,67; y para Meléndez entre 0,33-10,33. Por lo tanto, el análisis comparativo del  $T_c$  registrado con el  $T_c$  empírico, se realizó con el promedio de los tiempos de concentración obtenidos de los diferentes eventos de cada cuenca.

### 7.4.2. Relación de tiempo de rezago con tiempo de concentración

En la Figura 51 se encuentra un análisis del tiempo de concentración con el tiempo de rezago para las cuencas consideradas.

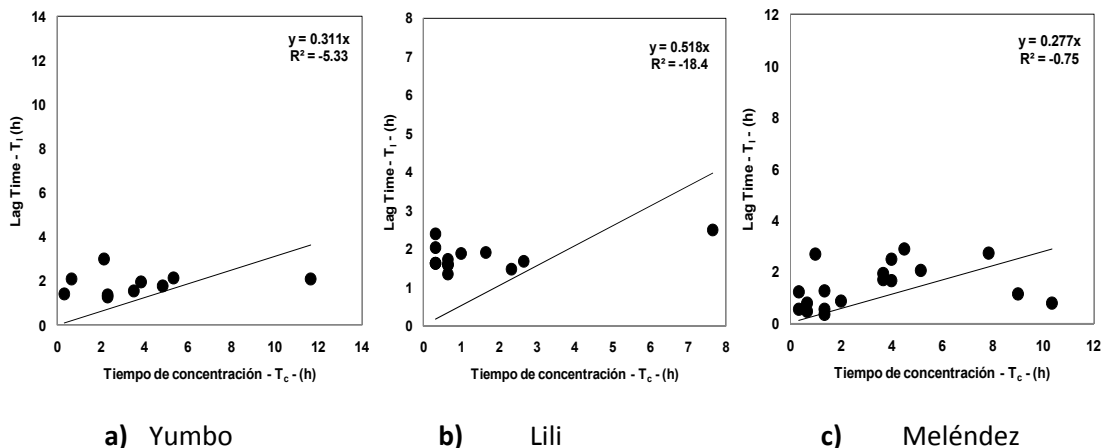


Figura 51. Comparación del  $T_c$  y  $T_l$ .

Una de las metodologías más utilizadas para realizar el cálculo del tiempo de rezago Lag Time es la siguiente (Hoggan, 1997):

$$T_l = 0,60T_c \quad [45]$$

En la Figura 51 se observa que para los resultados obtenidos en las diferentes cuencas esta condición no se cumple, a pesar de que los valores de  $R^2$  son muy malos; de acuerdo con lo anterior, para las diferentes cuencas se tienen las siguientes ecuaciones:

Yumbo:

$$T_l = 0,31T_c \quad [46]$$

Lili:

$$T_l = 0,52T_c \quad [47]$$

Meléndez:

$$T_l = 0,28T_c \quad [48]$$

Adicionalmente, en la Figura 51 es fácil de identificar que el rango de variación de los valores de  $T_c$  es bastante amplio, mientras que el rango de variación de los valores de  $T_l$  es menor.

### 7.4.3. Evaluación de la fórmula del tiempo de rezago del SCS

En la Figura 52 se relaciona el tiempo de rezago calibrado por medio del HU del SCS y el tiempo de rezago obtenido por medio de la ecuación [18].

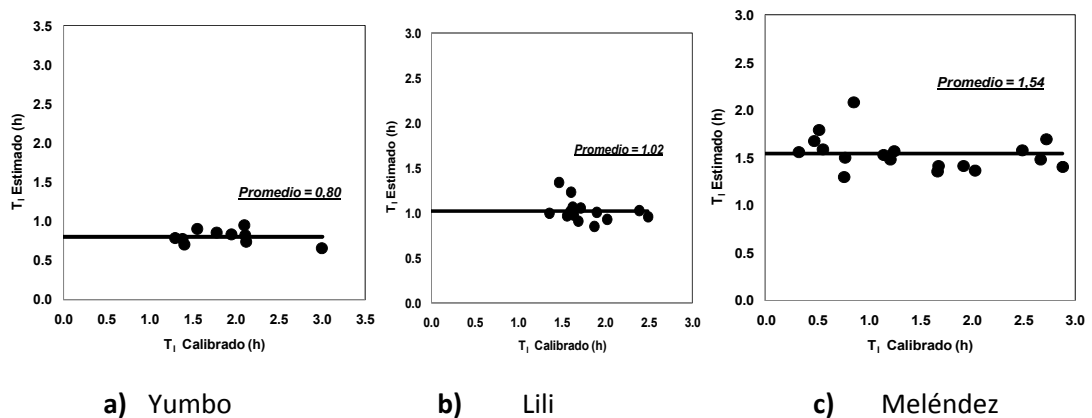
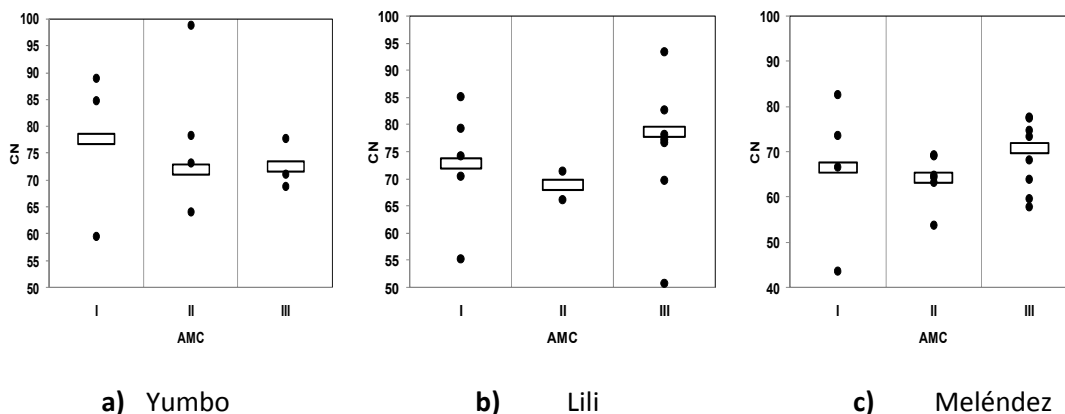


Figura 52. Comparación de  $T_l$  calibrado y  $T_l$  estimado por fórmula.

En la Figura 52 se observa que el rango de variación del tiempo calibrado es mucho mayor que el rango del tiempo obtenido mediante la fórmula, adicionalmente, el Lag Time calibrado en la mayoría de los casos se encuentra con un valor mayor al calculado por medio de la fórmula del HU del SCS.

#### 7.4.4. Condición de humedad antecedente

En la Figura 53 se encuentra un análisis del número de curva y como se relacionan los valores obtenidos con el tipo de humedad antecedente de cada evento para las cuencas consideradas, cuando  $\lambda$  es constante e igual a 0,20.



**Figura 53.** Relación de  $CN$  con la humedad antecedente para el HU de Clark.

En la Figura 53 se observa que los valores de número de curva no presentan la tendencia esperada dependiendo las condiciones de humedad antecedente para la cuenca de Yumbo, si las condiciones de humedad antecedente son de suelo saturado (AMC III) se esperaría que los valores de número de curva sean mayores que para una condición de suelo seco (AMC I), pero esta condición no se cumple; sin embargo, para la cuenca de Lili y Meléndez si se cumple que para condiciones de humedad antecedente de suelo saturado (AMC III) se presentan los valores más altos del numero de curva. El valor promedio de  $CN$  para la cuenca de Yumbo teniendo en cuenta las tres condiciones de humedad antecedente AMC I, II y III es 77.7, 71.9 y 72.6 respectivamente; para Lili 72.9, 68.9 y 78.7; para Meléndez 66.6, 64.3 y 70.8. De acuerdo con lo anterior se puede decir que no se cumple el comportamiento de  $CN$  esperado para AMC I; pero si se cumple para AMC II y AMC III.

Para el análisis del número de curva, el valor promedio no tiene en cuenta los números de curva muy altos (cercanos a 100) y valores bajos (cercanos e inferiores a 50), debido a que no son representativos de condiciones verdaderas del terreno.

#### 7.4.5. Análisis de precipitación antecedente y caudal pico

En la Tabla 57 se presenta los valores de precipitación antecedente y caudal pico obtenido por cada HU para la cuenca de Yumbo, cuando  $\lambda$  es igual a 0,20.

**Tabla 57.** Relación de la precipitación antecedente y caudal pico.

HU		SCS	Snyder	Clark	
No	Precipitación Ant. 5 días (mm)	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)
1	12	11.7	10.8	10.3	11.3
2	21	17.2	14.5	16.0	16.9
3	55	1.1	1.1	1.1	1.3
4	50	18.7	16.9	15.5	17.6
5	79	21.9	20.9	18.3	20.3
6	43	5.1	4.9	4.4	4.9
7	53	5.7	5.2	5.0	5.1
8	66	2.4	2.6	2.3	2.4
9	25	3.8	3.9	4.2	4.9
10	No disponible	3.0	3.9	3.3	3.8
<b>Med</b>	44.9	9.1	8.5	8.0	8.9
<b>Máx</b>	79.0	21.9	20.9	18.3	20.3
<b>Mín</b>	12.0	1.1	1.1	1.1	1.3

En la Tabla 58 se presenta los valores de precipitación antecedente y caudal pico obtenido por cada HU para la cuenca de Lili, cuando  $\lambda$  es igual a 0,20.

**Tabla 58.** Relación de la precipitación antecedente y caudal pico.

HU			SCS	Snyder	Clark
No	Precipitación Ant. 5 días (mm)	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)
1	9	25.5	30.8	24.0	29.6
2	82	17.7	15.2	16.5	15.6
3	60	21.5	18.6	19.8	21.1
4	31	33.5	32.2	30.1	30.6
5	105	21.7	19.4	18.7	20.2
6	6	26.9	24.9	24.5	28.6
7	82	23.4	20.6	18.3	18.7
8	148	26.6	24.7	25.3	25.8
9	55	16.9	13.8	13.2	14.9
10	87	4.5	4.2	4.8	5.9
11	48	3.7	4.4	3.8	3.9
12	48	6.2	7.4	4.9	6.0
13	70	13.8	11.1	12.7	12.6
14	0	7.0	7.7	6.9	6.8
15	10	2.9	2.9	2.5	2.6
<b>Med</b>	56	16.8	15.9	15.1	16.2
<b>Máx</b>	148	33.5	32.2	30.1	30.6
<b>Mín</b>	0	2.9	2.9	2.5	2.6

En la Tabla 59 se presenta los valores de precipitación antecedente y caudal pico obtenido por cada HU para la cuenca de Meléndez, cuando  $\lambda$  es igual a 0,20.

**Tabla 59.** Relación de la precipitación antecedente y caudal pico.

HU		SCS	Snyder	Clark	
No	Precipitación Ant. 5 días (mm)	Q Máx Registrado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)	Q Máx Estimado (m <sup>3</sup> /s)
1	85	15.6	20.7	16.2	19.2
2	131	20.8	28.9	25.9	28.4
3	131	16.8	22.8	18.6	20.8
4	67	4.0	5.2	4.1	4.9
5	58	57.0	71.3	62.6	59.9
6	127	32.3	29.3	30.8	34.7
7	46	33.8	32.9	25.4	35.1
8	50	2.0	2.2	2.4	2.8
9	51	3.4	4.0	3.0	3.5
10	41	14.1	14.5	10.4	14.2
11	120	8.4	7.2	7.5	7.6
12	0	4.6	4.8	4.2	4.4
13	34	37.2	33.7	36.1	37.3
14	38	29.3	31.6	27.6	30.8
15	50	14.4	15.8	14.4	18.2
16	26	2.8	2.4	2.6	2.7
17	91	3.0	3.4	3.2	3.5
18	14	15.1	18.0	14.9	18.2
<b>Med</b>	64	17.5	19.4	17.2	19.2
<b>Máx</b>	131	57.0	71.3	62.6	59.9
<b>Mín</b>	0	2.0	2.2	2.4	2.7

En las Tablas 58 y 59 se observa que cuando se presenta el valor de caudal pico mayor, no coincide con el valor de precipitación antecedente mayor, y viceversa; mientras que en la Tabla 57 si coincide solamente el valor de caudal pico mayor. Adicionalmente, no se puede establecer un comportamiento típico entre la precipitación antecedente y el valor del caudal pico, debido a que no necesariamente un valor alto de precipitación antecedente indica que se genera un valor del caudal pico alto, pero sí se favorece el incremento del caudal cuando las condiciones antecedentes son de humedad; por lo tanto, el valor del caudal pico se ve más afectado por la cantidad e intensidad de la precipitación del evento.

El HU de Clark es el que mejor estima los valores de caudal pico, le sigue el HU de Snyder y por último el HU del SCS.

**7.4.6. Variación de los parámetros con  $\lambda$  constante y variable**

En las Figuras 54 a 59 se presenta la influencia del parámetro lambda con los parámetros de los HU considerados para la cuenca del río Yumbo.

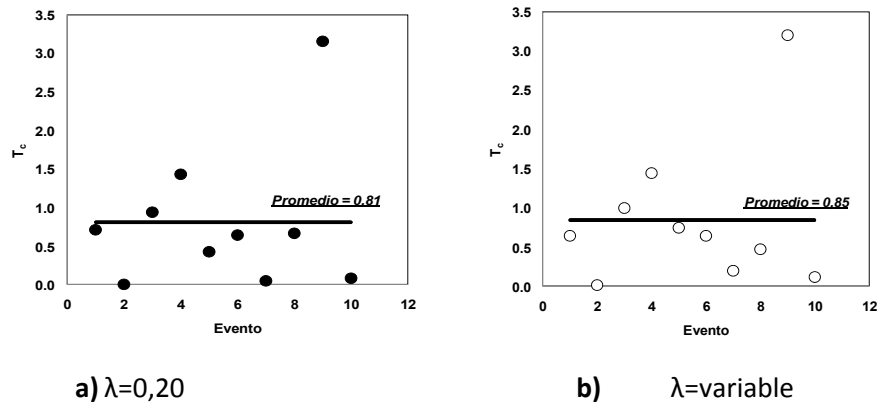


Figura 54. Relación de  $\lambda$  con  $T_c$ .

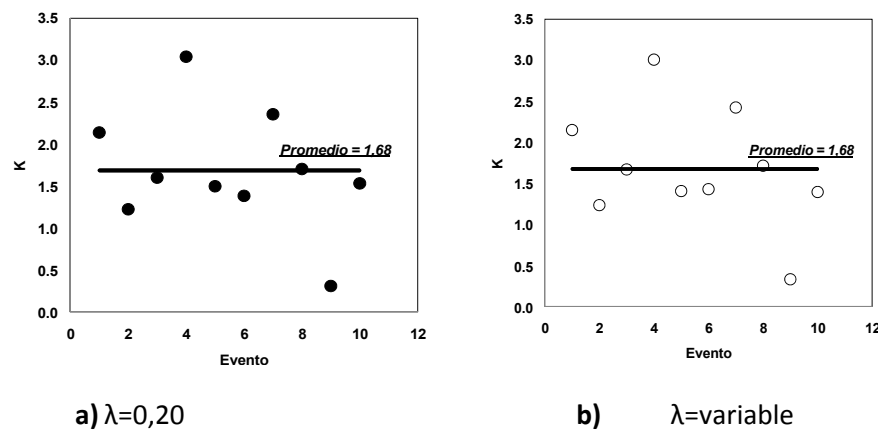


Figura 55. Relación de  $\lambda$  con  $K$ .



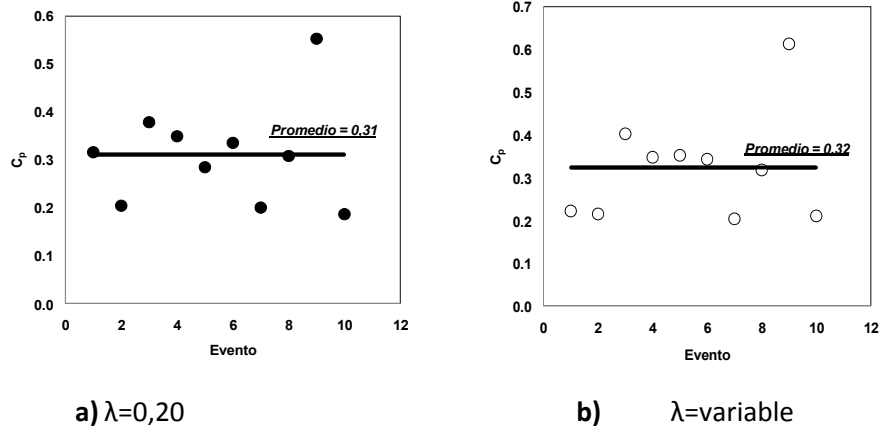


Figura 56. Relación de  $\lambda$  con  $C_p$ .

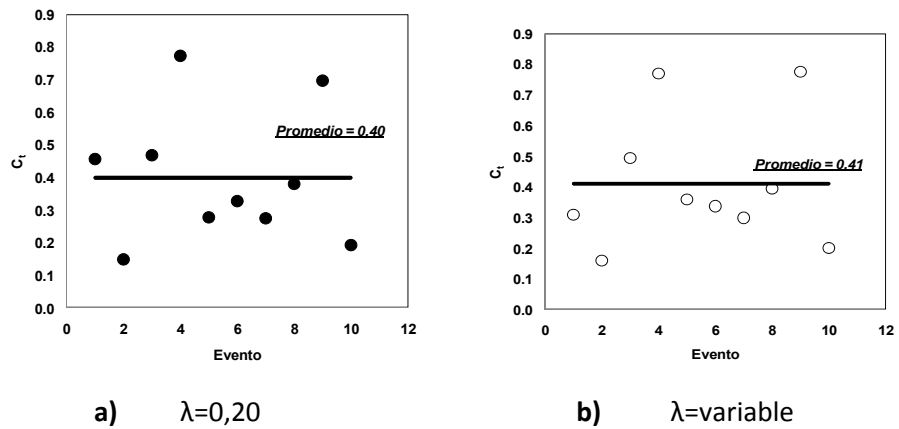


Figura 57. Relación de  $\lambda$  con  $C_t$ .

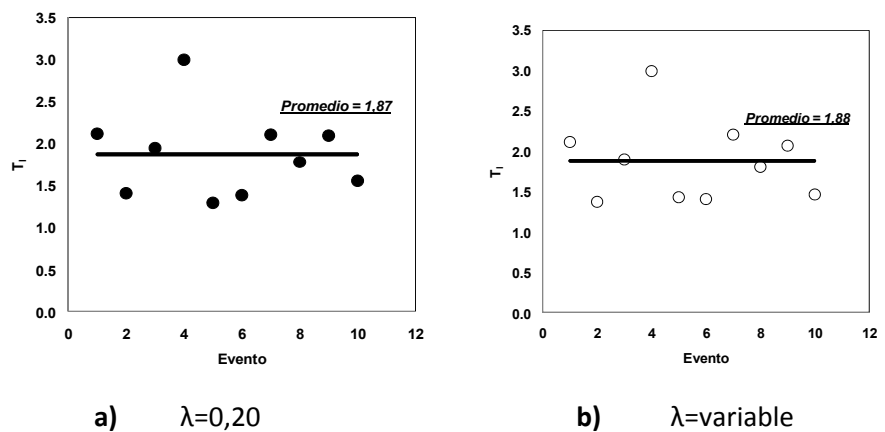


Figura 58. Relación de  $\lambda$  con  $T_t$ .

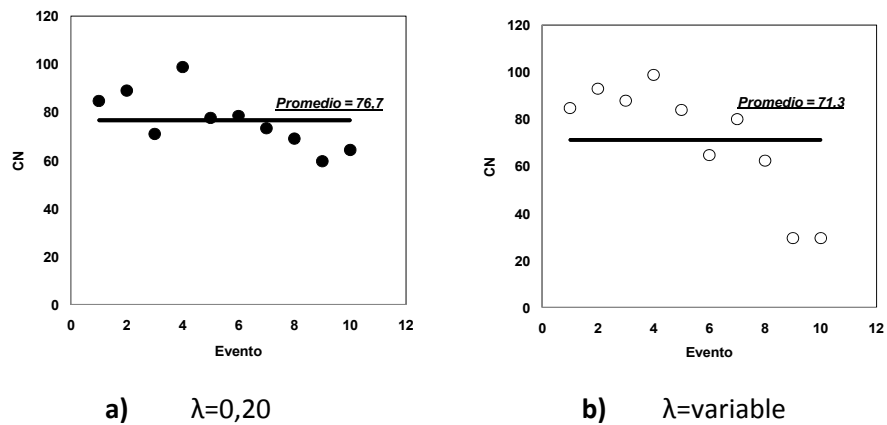


Figura 59. Relación de  $\lambda$  con CN.

En las Figuras 60 a 65 se presenta la influencia del parámetro lambda con los parámetros de los HU considerados para la cuenca del río Lili.

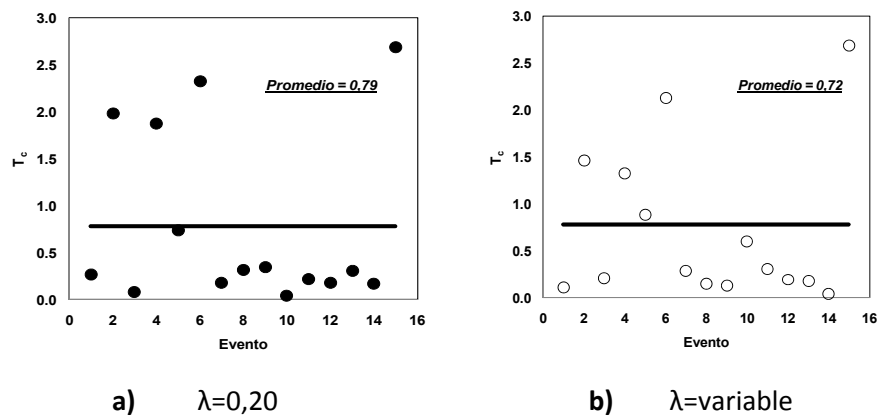


Figura 60. Relación de  $\lambda$  con  $T_c$ .

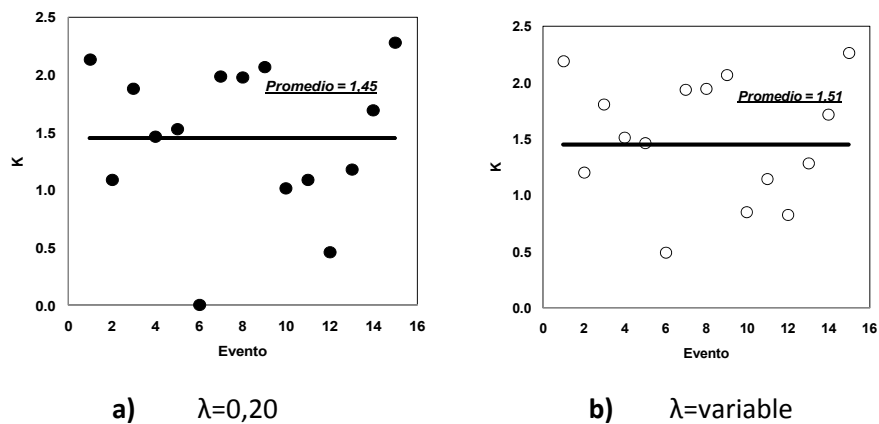


Figura 61. Relación de  $\lambda$  con K.

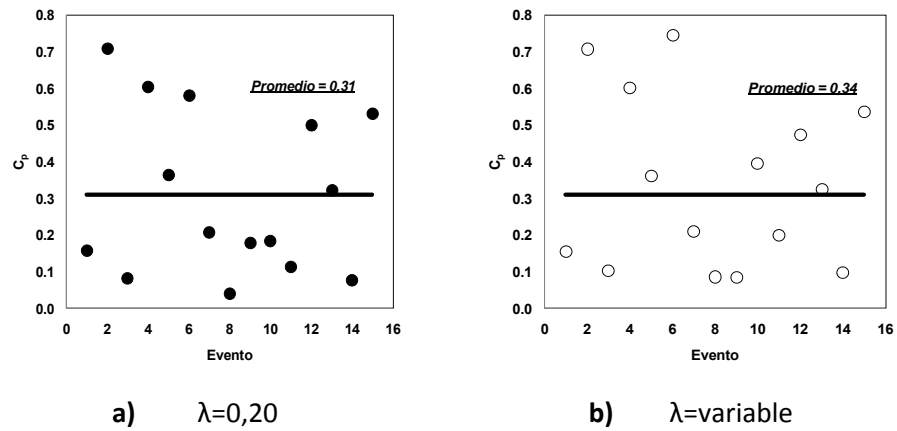


Figura 62. Relación de  $\lambda$  con  $C_p$ .

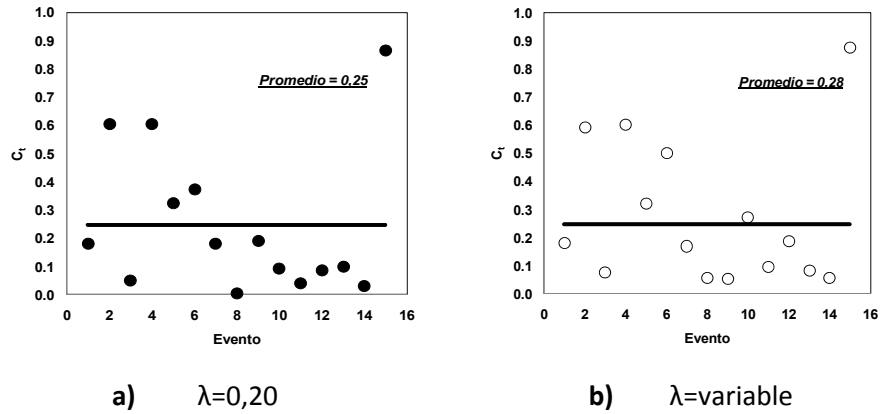


Figura 63. Relación de  $\lambda$  con  $C_t$ .

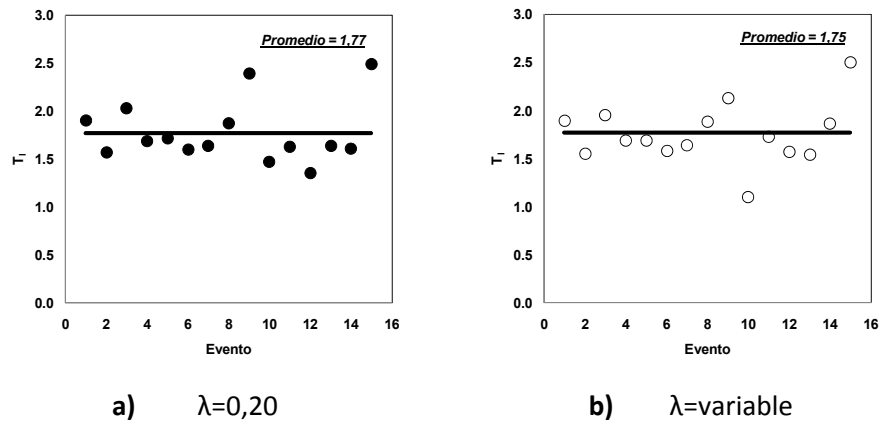


Figura 64. Relación de  $\lambda$  con  $T_t$ .

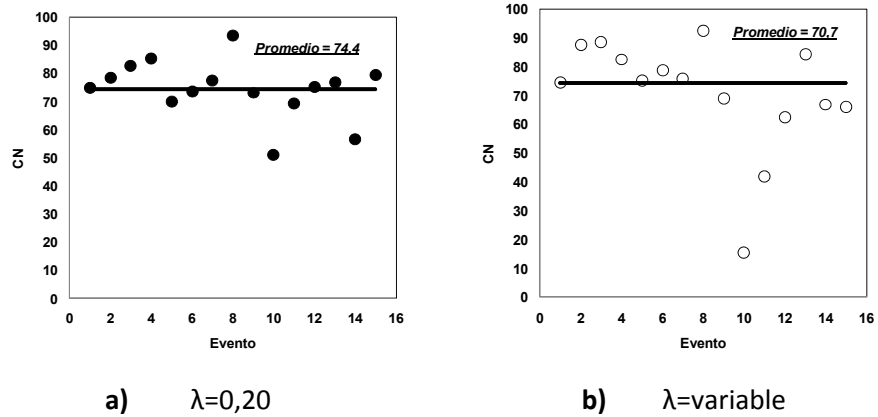


Figura 65. Relación de  $\lambda$  con CN.

En las Figuras 66 a 71 se presenta la influencia del parámetro lambda con los parámetros de los HU considerados para la cuenca del río Meléndez.

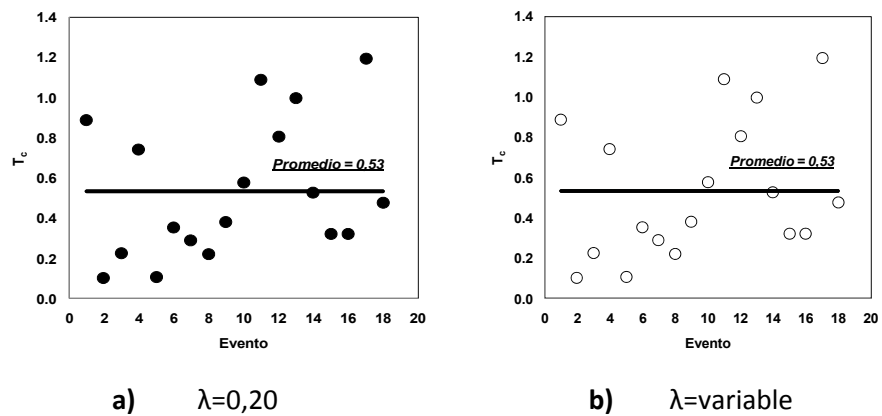


Figura 66. Relación de  $\lambda$  con  $T_c$ .

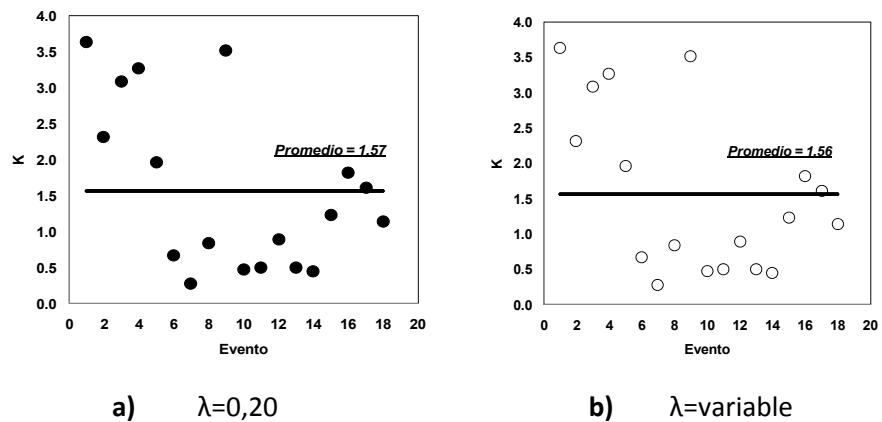


Figura 67. Relación de  $\lambda$  con K.

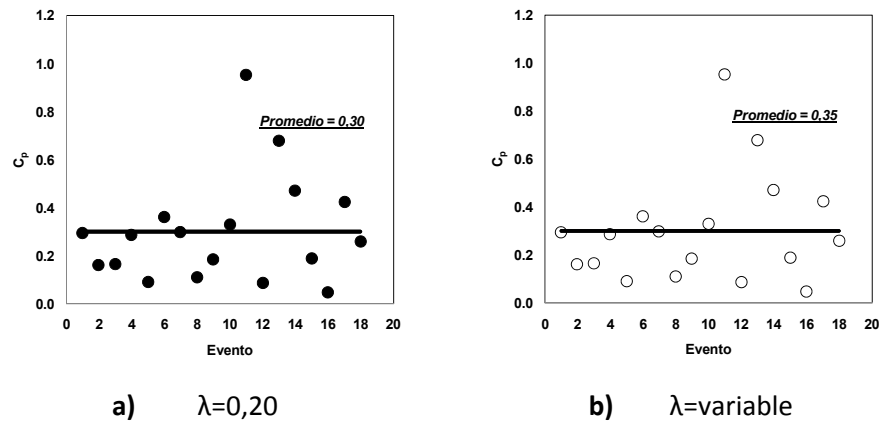


Figura 68. Relación de  $\lambda$  con  $C_p$ .

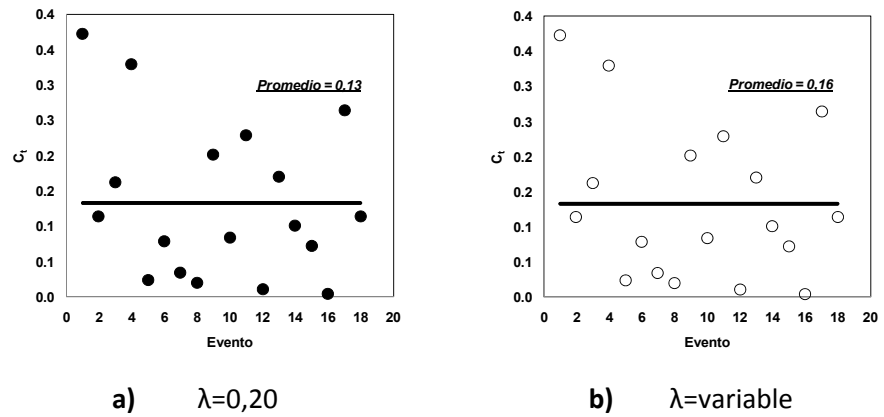


Figura 69. Relación de  $\lambda$  con  $C_t$ .

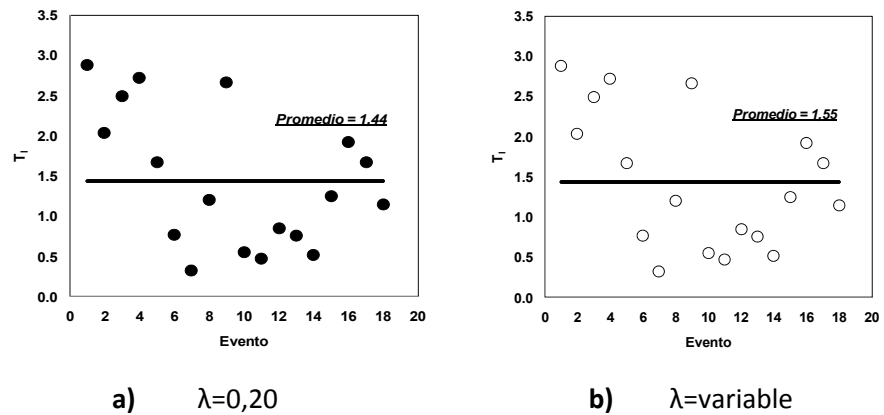


Figura 70. Relación de  $\lambda$  con  $T_t$ .

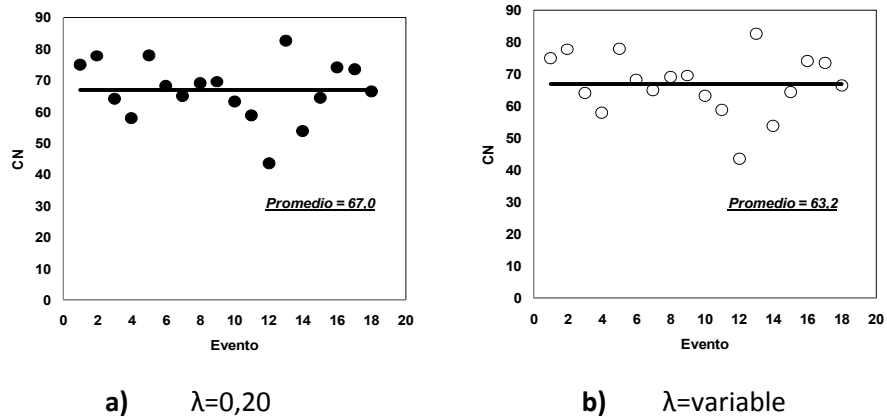


Figura 71. Relación de  $\lambda$  con  $CN$ .

En las Figuras 54 a 71 se observan los resultados obtenidos de cada parámetro con  $\lambda$  constante y variable, en general no se presentan cambios sustanciales cuando se varía  $\lambda$ .

Para el parámetro  $T_c$ , cuando  $\lambda$  es variable presenta un valor mayor para la cuenca Yumbo, un valor menor para la cuenca Lili y un valor idéntico para la cuenca Meléndez.

Para el parámetro  $K$ , cuando  $\lambda$  es variable presenta un valor idéntico para la cuenca Yumbo, un valor mayor para la cuenca Lili y un valor menor para la cuenca Meléndez.

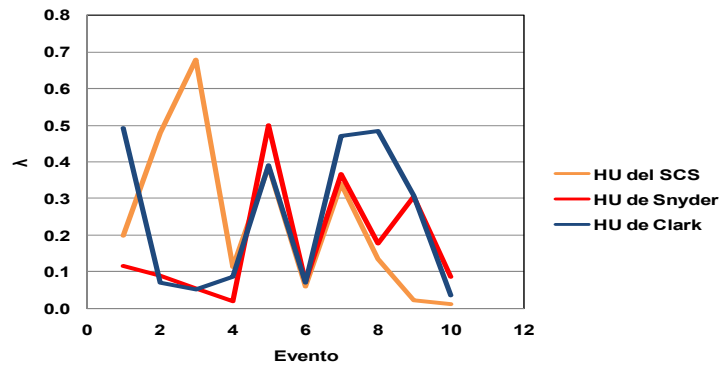
Para los parámetros  $C_p$  y  $C_t$ , cuando  $\lambda$  es variable se observa un valor mayor en las tres cuencas consideradas.

Para el parámetro  $T_t$ , cuando  $\lambda$  es variable presenta un valor mayor para la cuenca Yumbo y Meléndez, y un valor menor para la cuenca Lili.

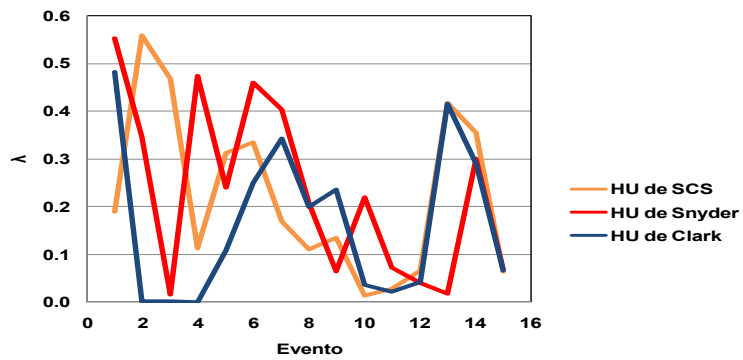
Para el parámetro  $CN$ , cuando  $\lambda$  es variable se observa un valor menor en las tres cuencas consideradas.

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que los resultados obtenidos en el proceso de calibración para los parámetros cuando  $\lambda$  es constante ó variable no presentan cambios sustanciales en la mayoría de los casos; sin embargo, el parámetro  $CN$  es el único que cambia sustancialmente cuando  $\lambda$  es variable.

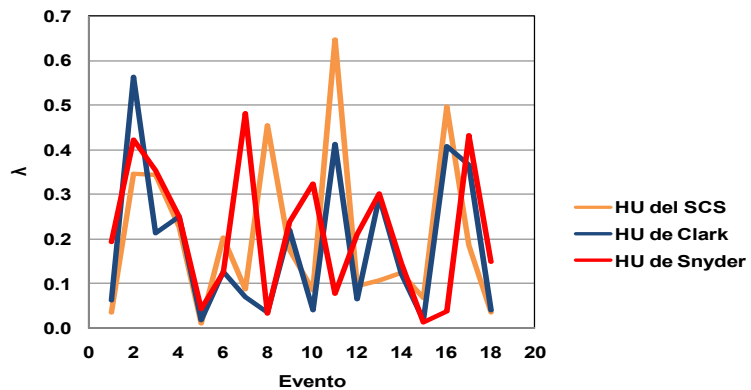
En la Figura 72 se presenta la influencia de los diferentes HU en la magnitud del parámetro lambda.



a) Yumbo



b) Lili



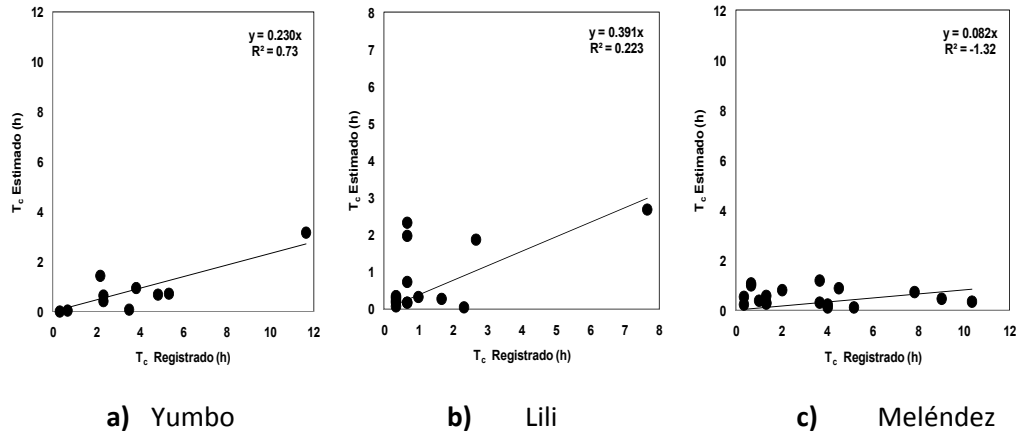
c) Meléndez

Figura 72. Influencia del HU en la magnitud del parámetro  $\lambda$ .

Con base en lo presentado en la Figura 72, se observan las diferentes variaciones del parámetro  $\lambda$  dependiendo de los hidrogramas unitarios analizados, en este análisis se muestra que el HU del SCS es el más sensible, adicionalmente se

observa que los hidrogramas unitarios de Clark y Snyder tienen un comportamiento similar para el parámetro  $\lambda$ .

**7.4.7. Comparación de  $T_c$  registrado con  $T_c$  calibrado por el método de Clark**



**Figura 73.** Comparación de  $T_c$  calibrado con el HU de Clark con  $T_c$  Registrado.

En la Figura 73 se observa que el  $T_c$  calibrado por medio del HU de Clark, es menor al tiempo de concentración registrado para cada cuenca, puede ser que la variable del tiempo de concentración  $T_c$  en el modelo no refleje el sentido físico de este parámetro.



## 8. CONCLUSIONES

Con base en el comportamiento observado de los hidrogramas estimados en comparación con los hidrogramas registrados, se puede concluir que los HU del SCS, Clark y Snyder, en general, representan adecuadamente la forma de los hidrogramas registrados, así mismo se observa que no existe gran diferencia entre los coeficientes de Nash-Sutcliffe obtenidos cuando  $\lambda$  es constante o variable.

La variación del parámetro  $\lambda$  del modelo de abstracciones del SCS mejora ligeramente el ajuste del modelo con el hidrograma registrado, pero al mismo tiempo genera una alta interdependencia paramétrica dificultando la identificabilidad de los otros parámetros, por lo tanto se encontró que las mejores combinaciones son aquellas en las que éste parámetro se considera igual a 0,20.

En la estimación de escorrentía superficial el HU de Clark es el que mejor se ajusta al comportamiento de los hidrogramas registrados, a la estimación del caudal pico, y el que presenta la menor incertidumbre aproximadamente el 30% del caudal pico.

A pesar de que las áreas de drenaje son diferentes, los rangos de los parámetros de los HU no cambian sustancialmente.

Los parámetros que dominan la certeza de las diferentes combinaciones son:  $T_t$ ,  $C_t$ ,  $C_p$ ,  $K$  y  $T_c$ ; los cuales muestran un alto nivel de identificabilidad y sensibilidad, mientras que los parámetros  $\lambda$  y  $CN$  muestran un bajo nivel de identificabilidad y sensibilidad para las tres cuencas consideradas. Adicionalmente, se encontró que el valor de  $C_t$  y  $C_p$  cambia demasiado en comparación con los valores teóricos.

No existe un solo método empírico para obtener con certeza el tiempo de concentración, los métodos empíricos determinan un solo valor de tiempo de concentración para una cuenca, pero en la realidad para cada evento que se presenta en una cuenca existe un tiempo de concentración diferente y los rangos de variación son muy amplios.

No se cumple la condición de la fórmula propuesta para calcular el Lag Time ( $T_t = 0,60T_c$ ), este valor es muy alto en comparación de los que se obtuvieron para las cuencas consideradas. Por lo tanto, esta fórmula no es un buen método para estimar el tiempo de rezago.

El tiempo de concentración  $T_c$  calibrado por medio del HU de Clark, es menor al  $T_c$  registrado para las cuencas consideradas, puede ser que la variable del tiempo de concentración en el modelo no refleje el sentido físico de este parámetro.

El método del SCS presenta un buen ajuste en la estimación de la precipitación de excesos cuando se emplean los resultados de los parámetros calibrados, el valor de la

precipitación de excesos con éste modelo da mayor al valor registrado para los dos casos analizados con los parámetros recomendados por la literatura y con los resultados de éste estudio, sin embargo, cuando se emplean los resultados de los parámetros calibrados la diferencia entre el valor de la precipitación de excesos estimada y la registrada disminuye notoriamente.

En el análisis comparativo de los hidrogramas de escorrentía calculados mediante los modelos ajustados, con respecto a los que se obtendrían utilizando los parámetros sugeridos por la literatura; es clara la importancia que tiene el proceso de calibración en la estimación de la escorrentía superficial, donde se muestra que los valores recomendados por la literatura no representan hidrogramas que se ajusten adecuadamente al comportamiento observado en las cuencas consideradas; mientras que los hidrogramas obtenidos del proceso de modelación se ajustan adecuadamente al hidrograma registrado y generalmente da valores de caudal pico mayores a los registrados.

## **9. RECOMENDACIONES**

Si se desea utilizar los valores de los parámetros calibrados de las cuencas del río Yumbo, Lili y Meléndez; es importante tener en cuenta que la cuenca a estudiar sea de características similares a las cuencas anteriormente mencionadas; debido a que los valores teóricos de estos parámetros son diferentes a los que se calibraron.

Se recomienda adoptar el valor de  $\lambda = 0,20$ , por medio del cual se puede obtener valores de número de curva *CN* diferentes a los que se recomienda en la literatura (Tablas ó ecuaciones) para las cuencas de Colombia.

A las autoridades ambientales o empresas consultoras, en relación con la incertidumbre y sensibilidad del método en condiciones de ausencia de información hidrológica es bastante alta, por lo tanto, se recomienda tratar de calibrar los parámetros para los diferentes estudios a realizar.

En el caso de predicción de crecientes y alertas hidrológicas, el análisis de sensibilidad de los parámetros conduce a validar el método para este tipo de aplicaciones.

Se recomienda realizar un proceso de calibración de los parámetros para más cuencas, con el fin de obtener una regionalización de parámetros a nivel nacional.

## 10. REFERENCIAS

- Beven, K.J., 2004. *Rainfall-runoff modelling*, John Wiley and Sons.
- Bras, R.L., 1989. *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*, Addison-Wesley.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology* International ed., McGraw Hill Higher Education.
- Gooseff, M.N. et al., 2005. Sensitivity analysis of conservative and reactive stream transient storage models applied to field data from multiple-reach experiments. *Advances in Water Resources*, 28(5), 479–492.
- Hoggan, D.H., 1997. *Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics*, McGraw-Hill.
- Lees, M.J. and Wagener, T. 2005. The Monte Carlo Analysis Toolbox - user manual. Dep.Civil Env. Eng., Imperial College of Science, Technology and Medicine, unpublished.
- Letcher, R.A., Croke, B.F.W. & Jakeman, A.J., 2007. Integrated assessment modelling for water resource allocation and management: A generalised conceptual framework. *Environmental Modelling & Software*, 22(5), 733–742.
- McIntyre, N.R. & Wheeler, H.S., 2004. A tool for risk-based management of surface water quality. *Environmental Modelling & Software*, 19(12), 1131–1140.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290.
- Pizarro T, R. et al., 2005. Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. *Bosque (Valdivia)*, 26(2). Available at: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071792002005000200015&script=sci\\_artt](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071792002005000200015&script=sci_artt) ext [Accedido Junio 4, 2010].
- Saenz, G.M., 1999. *Hidrología en la ingeniería*, Alfaomega.
- Serrano, S.E., 1997. *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals: An Integrated Treatment of Surface, Subsurface, and Contaminant Hydrology*, Hydroscience Inc.
- Sieber, A. & Uhlenbrook, S., 2005. Sensitivity analyses of a distributed catchment model to verify the model structure. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 216–235.
- Singh, V.P., 1995. *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications.

Singh, V.P. & Frevert, D.K., 2002. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*, Water Resources Publication.

Viessman, W. & Lewis, G.L., 1996. *Introduction to hydrology*, HarperCollins.

Wagener, T. et al., 2004. A hydroarchive for the free exchange of hydrological software. *Hydrological Processes*, 18(2), 389–392.

Wagener, T., Lees, M.J. & Wheater, H.S., 2002. A toolkit for the development and application of parsimonious hydrological models. *Mathematical models of large watershed hydrology*, 1, 87–136.

Wagener, T. & Wheater, H.S., 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of hydrology*, 320(1-2), 132–154.

Wagener, T. & Kollat, J., 2007. Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox. *Environmental Modelling & Software*, 22(7), 1021-1033.

Wagener, T., Wheater, H.S. & Gupta, H.V., 2004. *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*, Imperial College Press.

Woolhiser, 2003. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*.