

**ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN EN LAS
CORRIENTES: AGUAS CLARAS, ARRAYANALES, CARNICERÍA, EL VADO,
PICHAGUA Y RÍO LAS PIEDRAS EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN**



LUIS FERNANDO CHAVES BARRIOS

YEISON ARMANDO ORDOÑEZ CARLOSAMA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA
POPAYÁN
2017**

**ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN EN LAS
CORRIENTES: AGUAS CLARAS, ARRAYANALES, CARNICERÍA, EL VADO,
PICHAGUA Y RÍO LAS PIEDRAS EN EL MUNICIPIO DE POPAYÁN**



LUIS FERNANDO CHAVES BARRIOS

YEISON ARMANDO ORDOÑEZ CARLOSAMA

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero
Civil

Director:
Ing. CARLOS ARMANDO GALLARDO BARRERA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA
POPAYÁN
2017**

Nota de Aceptación:

Firma de los jurados:

Firma del Jurado.

Firma del Jurado.

Agradecimientos a:

Agradecemos a Dios por permitirnos realizar esta investigación y superar todos los obstáculos presentados. A nuestras familias, que siempre nos dieron su apoyo incondicional en el transcurso de la carrera y la investigación. Al Departamento de Hidráulica de la Universidad del Cauca, a nuestro director de trabajo de grado Ing. Carlos Gallardo, a los jurados Ing Luis Jorge Gonzales e Ing. Alberto José Caldas. Al personal de la división ambiental del Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. Dra Liliana Recamán, Jose Libardo Ahumada e Ing. Alirio Rosero. A la comunidad de cabildos de la zona de estudio y a su gobernadora Alba Ligia Hurtado, a las organizaciones: ASOCAMPO y ASOPROQUINTANA. A las personas que nos sirvieron de guías en los recorridos Albeiro Gaón y Santos Lame.

	CONTENIDO	Pág.
1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	JUSTIFICACIÓN	10
3.	OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	11
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	11
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
4.	MARCO TEÓRICO.....	12
4.1	MÉTODO DE CLARK.....	12
4.2	MÉTODO DE KIRPICH	13
4.3	MÉTODO DE TÉMEZ Y D.N.C	14
4.4	MÉTODO DE PILGRIM Y MCDERMOTT	14
4.5	MÉTODO DE BRANSBY – WILLIAMS.....	15
4.6	MÉTODO DE GEORGE RIVERO	15
4.7	MÉTODO DE KERBY – HATHAWAY.....	15
4.8	MÉTODO DE DOOGE	16
4.9	MÉTODO DE VEN TE CHOW	16
4.10	MÉTODO DEL CUERPO DE INGENIEROS DE EEUU	17
4.11	MÉTODO DE PASSINI.....	17
4.12	MÉTODO DE CALIFORNIA CURVERTS PRACTICE (CHPW)	17
4.13	MÉTODO DE LA ECUACIÓN DE RETARDO DEL SCS.....	18
4.14	MÉTODO DE VENTURA	18
4.15	MÉTODO DE GIANDOTTI.....	18
4.16	APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LA ONDA CINEMÁTICA EN EL CÁLCULO DE TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN.....	19
4.17	APLICACIONES DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	21
4.17.1	Fórmula Racional o Americana.....	22
4.17.2	Método de la Curva Número o del S.C.S. de los Estados Unidos	23
5	ESTADO DEL ARTE	24
6	MARCO CONCEPTUAL	26
7	METODOLOGÍA.....	32

7.1	UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	32
7.2	CLIMA.....	33
7.2.1	Precipitación.....	33
7.3	HIDROGRAFÍA.....	34
7.4	COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO	36
7.5	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS	39
8	RESULTADOS	42
8.1	TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN MEDIDOS EN CAMPO.....	42
8.2	TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN DETERMINADOS CON FÓRMULAS EMPÍRICAS.....	43
8.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
8.3.3	Quebrada Carnicería	45
8.3.4	Quebrada El Vado.....	46
8.3.5	Quebrada Pichagua.....	46
8.3.6	Río Las Piedras desde nacimiento hasta Estación limnimétrica Puente Carretera	46
8.3.7	Análisis general	47
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
10	BIBLIOGRAFÍA.....	50
11	ANEXOS.....	52
	ANEXO A. RÍO LAS PIEDRAS	53
	ANEXO B. QUEBRADA AGUAS CLARAS	58
	ANEXO C. QUEBRADA ARRAYANALES	63
	ANEXO D. QUEBRADA CARNICERÍA	67
	ANEXO E QUEBRADA EL VADO.....	73
	ANEXO F. QUEBRADA PICHAGUA	77
	ANEXO G. GENERAL.....	81

LISTA DE FIGURAS		Pág.
Ilustración 1	Figura 4.1. Esquema de una cuenca simple.....	20
Ilustración 2	Figura 6.1. Índice del factor de forma.	28
Ilustración 3	Figura 6.2. Influencia de la forma de la cuenca.	29
Ilustración 4	Figura 6.4. Método de Taylor - Schwarz.....	30
Ilustración 5	Figura 6.5. Pendiente del cauce por compensación de áreas.	31
Ilustración 6	Figura 7.1. Ubicación geográfica de la subcuenca del río Las Piedras.	33
Ilustración 7	Figura 7.2. Microcuencas de análisis.....	34
Ilustración 8	Figura 7.3. Áreas delimitadas.	36
Ilustración 9	Figura 7.4. Mapa de cobertura del suelo de la subcuenca.	39
Ilustración 10	Figura 8.1. Gráfica de la relación entre la sinuosidad y T_c	47

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tabla 7.1. Cuantificación por área, cobertura vegetal de la subcuenca del río Las Piedras.	38
Tabla 2 Tabla 7.2. Clasificación de las cuencas de análisis	40
Tabla 3 Tabla 7.3. Datos de campo de las corrientes de estudio.	41
Tabla 4 Tabla 8.1. Tiempos obtenidos con el método de los flotadores.	42
Tabla 5 Tabla 8.2. Tc obtenidos a partir de fórmulas empíricas.	44

1. INTRODUCCIÓN

La definición que normalmente se atribuye al tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de agua caída, en ir desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe. La presente monografía es el estudio de la relación existente en las diferentes fórmulas de trabajo de estimación del tiempo de concentración para una cuenca con área menor o igual a 15km^2 , las cuales están entre las más usadas en nuestro ámbito profesional nacional. Siempre han existido diferencias en sus valores que generan incertidumbre de los resultados y por ende cambios significativos en los diseños de estructuras hidráulicas para ríos, quebradas, riachuelos y cualquier otro tipo de cuerpo acuífero.

El proyecto pretende darle respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Existen diferencias en el tiempo de concentración medido directamente sobre la corriente hídrica y las ecuaciones empíricas de que se dispone actualmente?

Además, se plantea la hipótesis concerniente a: "El tiempo de concentración medido directamente sobre la corriente es diferente al estimado por las diferentes fórmulas empíricas, para algunas corrientes de montaña representativas del sistema fluvial del municipio de Popayán".

En contexto, existen muchas fórmulas para la determinación del tiempo de concentración (T_c), pero éstas dan resultados muy diversos. Esto anterior, conlleva a que los caudales calculados tengan un alto grado de incertidumbre, lo cual afecta directamente el tamaño de las estructuras diseñadas y por ende el factor económico de los proyectos. El tiempo de concentración es importante porque al cabo del mismo, desde el momento en que se ha iniciado una lluvia que produzca escorrentía, se presenta el caudal máximo a la salida de la cuenca.

2. JUSTIFICACIÓN

Para el cálculo del caudal máximo que se produce en cuencas hidrográficas totales o parciales (áreas aferentes) se utilizan diferentes métodos entre los que se cuentan el método Racional o fórmula Americana y el de Chow. Para la aplicación de estos métodos se necesita conocer el tiempo de concentración. A su vez, la determinación de los caudales máximos es requerida para el diseño de diferentes obras hidráulicas tales como aquellas de drenaje longitudinal o transversal en vías (p.e. cunetas, alcantarillas, pontones, etc). Es de anotar que las fórmulas existentes fueron obtenidas para condiciones específicas de cada región, lo cual puede cambiar al considerar que en su determinación se involucran muchas variables como pendiente y longitud entre la divisoria y el inicio del cauce en estudio, lo mismo que tipo de suelo, relación lluvia - infiltración, capacidad de almacenamiento, cobertura vegetal y uso del suelo en este trayecto. Otras variables son: pendiente, rugosidad y longitud del cauce principal.

3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el tiempo de concentración directamente sobre algunas corrientes de la meseta de Popayán y proponer la fórmula empírica de mejor ajuste.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar en campo el tiempo de concentración para seis corrientes representativas de los cauces de montaña de la meseta de Popayán.
- Determinar el tiempo de concentración en cuencas hidrográficas, a partir de fórmulas empíricas.
- Encontrar la fórmula empírica de mejor ajuste para las condiciones de la región.

4. MARCO TEÓRICO

El tiempo de concentración es un parámetro básico para el conocimiento de una cuenca hidrográfica en busca de la gestión de sus recursos como agua y suelos, con fines de una mejor gestión y manejo. Su cálculo normalmente se realiza mediante la aplicación de algunas gráficas o ecuaciones empíricas adaptadas desde diferentes zonas de desarrollo o investigación, que cuentan con condiciones climáticas, topográficas diferentes a los escenarios nacionales solicitados.

El tiempo de concentración de la cuenca es utilizado en los modelos lluvia – escorrentía; allí, la duración de la lluvia se asume igual al tiempo de concentración, puesto que en ese lapso de tiempo la totalidad de la cuenca está aportando agua a la salida de la cuenca, por lo cual se espera que se presenten los caudales máximos. Las diversas metodologías existentes para determinar el tiempo de concentración de una cuenca con base en sus parámetros morfométricos, son determinadas a partir de ajustes empíricos de registros hidrológicos.

Teniendo en cuenta las diferentes fórmulas que se emplearon para este trabajo, se detalla cómo fue formulada cada una.

4.1 MÉTODO DE CLARK

Este método de cálculo de hidrogramas unitarios, tiempo de concentración y coeficiente de retorno fue desarrollado para cuencas rurales en Illinois USA con áreas entre (0.02 mi² - 2.3 mi²), (500 Ha – 6000 Ha). Las ecuaciones proporcionaron información estatal y local a investigadores con métodos más precisos para estimar el TC y R para su uso en la simulación de hidrogramas de descarga en pequeñas cuencas rurales cuando se diseñan instalaciones de manejo de aguas pluviales y otras estructuras hidráulicas, determinando la llanura inundable, Fronteras y la evaluación de la seguridad de los ríos¹.

El *TC* para el hidrograma de la unidad Clark es sutilmente diferente como el de la definición típica del manejo de aguas pluviales, en la definición típica, el tiempo de concentración (*tc*) es el tiempo de viaje para la primera gota de precipitación efectiva en la Punto hidráulicamente más distante de la cuenca para alcanzar la cuenca de salida. Por lo tanto, *TC* de Clark es el tiempo de viaje requerido para la última gota de precipitación efectiva a nivel del punto hidráulicamente más distante de la cuenca para alcanzar el canal. Desde una teoría del sistema lineal y el

¹ Straub T. D., Melching C. S. and Kocher K. E., Equations for Estimating Clark Unit - Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. U.S. Department of interior. U.S. Geological Survey. Urbana Illinois. 2000

modelo conceptual del flujo translacional puro, las dos definiciones de tiempo de concentración son equivalentes².

Sin embargo las diferencias leves, entre la definición de tiempo de concentración en el método Racional y en el método del hidrograma unitario de Clark implica el tiempo de ecuaciones de estimación de la concentración comúnmente aplicadas en el método Racional, puede no ser apropiado para aplicación al método hidrográfico unitario de Clark. La fórmula de trabajo es la siguiente:

$$T_c = 0,335 \cdot \left[\frac{A}{S^{1,5}} \right]^{0,573} \quad (4.1)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración en horas (h)

A: Área de la cuenca (Km²)

S: Pendiente promedio del cauce (m/m)

Para obtener resultados más precisos, se recomienda hacer uso de la ecuación para las cuencas hidrográficas de menos de 0,5 mi² (1300 Ha. Aproximadamente) y la precisión de la ecuación probablemente disminuye a medida que se aproxima el límite superior del área. Se recomienda no estimar TC (Tiempo de concentración) y R (Coeficiente de Retorno) para las cuencas hidrográficas que contengan humedales, alcantarillas de tamaño insuficiente que causan aguas arriba de la alcantarilla, o laderas muy planas (menos 10 ft / mi).

4.2 MÉTODO DE KIRPICH

Desarrollada a partir de información del Soil Conservation Service (S.C.S.) en cuencas rurales de Tennessee y Pensilvania, con canales bien definidos y con pendientes muy pronunciadas (3 - 10%). Algunos investigadores sugieren que esta fórmula debe ser usada en cuencas con áreas no mayores a 100 Ha. Para evitar errores de ajuste³. La fórmula es:

$$t_t = 3.9 * (L/S^{0.5})^{0.7} \quad (4.2)$$

Donde:

² Straub T. D., Melching C. S. and Kocher K. E., Equations for Estimating Clark Unit - Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. U.S. Department of interior. U.S. Geological Survey. Urbana Illinois. 2000

³ KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Eng. 10 (6),362. 1940

tc: Tiempo de concentración (minutos)
L: Longitud del canal principal (Km)
S: Pendiente en el canal (m/m)

4.3 MÉTODO DE TÉMEZ Y D.N.C

Esta ecuación es el resultado de una modificación del profesor J.R. Témez a la ecuación del método racional, la elabora para la Dirección General de Carreteras, tras experimentarla en varias cuencas aforadas.

De acuerdo a algunos decretos se modifica la obtención de la Precipitación Máxima Diaria, aplicándole un factor reductor de Lluvia, debido a la variabilidad espacial de las precipitaciones en cuencas de tamaño mayores a 1 Km² (150 Ha). El límite de aplicación de este método está impuesto por el Tiempo de Concentración y la Superficie de la cuenca a estudio⁴.

Su aplicación se ve limitada por el rango adecuado de uso que está entre 1 Km² – 3000 Km². Según los registros de sus usuarios y de la aplicación de la misma no hay limitaciones por el tipo de terreno o su morfología. La fórmula es la siguiente:

$$T_c = 0,3 \cdot \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76} \quad (4.3)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h)
L: Longitud del cauce (Km)
S: Pendiente del cauce (m/m)

4.4 MÉTODO DE PILGRIM Y MCDERMOTT

Recomiendan que su uso esté entre cuencas con áreas menores a 250 Km². La ecuación es:

$$T_c = 0,76 \cdot A^{0,38} \quad (4.4)$$

Donde:

⁴ http://lab-hidrologia.uca.es/metodo_temez_modificado/

Tc: Tiempo de concentración en horas (h)
A: Área de la cuenca de drenaje (Km²)

4.5 MÉTODO DE BRANSBY – WILLIAMS

Formulada por el cuerpo de ingenieros de U.S.A. especialmente se recomienda para cuencas rurales menores de 75 Km².

$$t_c = 1.6 \frac{L}{A^{0.1} S^{0.2}} \quad (4.5)$$

Donde:

tc: Tiempo de concentración (min)
L: Longitud del cauce principal (Km)
S: Pendiente media del cauce principal (m/m)
A: Área de la superficie de la cuenca (Km²).

4.6 MÉTODO DE GEORGE RIVERO

Se dice que ha sido utilizada en cuencas rurales en los Estados Unidos y también en cuencas rurales en la India ($A < 19000 \text{ Km}^2$) y ($0,03 < S < 0,1$).

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{\left[(0,05 - 0,2 \cdot p) \cdot (100 \cdot S)^{0,04} \right]} \quad (4.6)$$

Donde:

tc: Tiempo de concentración (min)
L: Longitud del Cauce (Km)
p: Relación entre la cuenca cubierta de vegetación y el área total de la misma, valor adimensional.
S: Pendiente del cauce principal (m/m)

4.7 MÉTODO DE KERBY – HATHAWAY

La ecuación se recomienda para cualquier tipo de cuenca, siempre y cuando no supere un área de 200 Ha.

$$t_c = \left[\frac{0,67 \cdot n \cdot L_p}{\sqrt{S}} \right]^{0,467} \quad (4.7)$$

Donde:

tc: Tiempo de concentración (min)

Lp: Longitud del cauce principal (pies)

S: Pendiente del cauce (m/m)

n: Coeficiente de rugosidad de Manning del cauce.

4.8 MÉTODO DE DOOGE

Fórmula usada en Irlanda para cuencas con áreas menores de 950 km². Este método se ajusta mejor a cuencas con parámetros reflejan el comportamiento de cuencas de tamaño medio, así como los flujos predominantes en los canales.

$$T = 0.3 \quad A^{0.4} \quad S^{-0.1} \quad (4.8)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración en horas (h)

A: Área de la cuenca (Km²)

S: Pendiente promedio del cauce (m/m)

4.9 MÉTODO DE VEN TE CHOW

Utilizada en cuencas rurales de los Estados Unidos con áreas entre 0,01 Km² - 18,5 Km² y pendientes entre 0,51% < S < 9 %.

$$T = 0.1 \quad L^{0.6} \quad S^{-0.3} \quad (4.9)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce (Km)

S: Pendiente promedio del cauce (m/m)

4.10 MÉTODO DEL CUERPO DE INGENIEROS DE EEUU

Utilizada para cuencas rurales por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, con áreas menores a 12000 Km².

$$T = 0.1 L^{0.7} S^{-0.1} \quad (4.10)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce (Km)

S: Pendiente promedio del cauce (m/m).

4.11 MÉTODO DE PASSINI

Se recomienda aplicar a cuencas que presentan una pendiente suave. Luino et al. (2009) han usado tal ecuación en estudios de inundaciones y afirman que fue publicado en el trabajo de Passini (1914).

$$T = 0.1 A^{0.3} L^{0.5} S^{-0.5} \quad (4.11)$$

Donde:

A: Área de la cuenca (Km²)

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce (Km)

S: Pendiente promedio del cauce (m/m)

4.12 MÉTODO DE CALIFORNIA CURVERTS PRACTICE (CHPW)

Es una modificación de la ecuación de Kirpich aplicada a cuencas pequeñas y de alta montaña en California.

$$T = 0.9 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.3} \quad (4.12)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración en horas (h)

L: Longitud del cauce (Km)

H: Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m)

4.13 MÉTODO DE LA ECUACIÓN DE RETARDO DEL SCS

Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola, ha sido utilizada en cuencas con menos de 800 Ha de área. Se recomienda para áreas mixtas (rural-urbana).

$$t_t = \frac{1.48 L^{0.8} ((1.48 / C) - 0.5)^{0.7}}{S_o^{0.5}} \quad (4.13)$$

Donde:

tc: Tiempo de concentración (min)

Lp: Longitud del cauce (pies)

So: Pendiente promedio del cauce (%)

CN: Parámetro de número de curva del método SCS, adimensional

4.14 MÉTODO DE VENTURA

Utilizada en cuencas rurales de Italia, con pendientes no muy pronunciadas.

$$T = 4 A^{0.5} L^{0.5} H^{-0.5} \quad (4.14)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce (Km)

H: Diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m)

A: Área de la cuenca (Km²)

4.15 MÉTODO DE GIANDOTTI

Se utiliza mucho en Europa, sobre todo en Italia en la zona del centro y el norte. Su uso es recomendado para cuencas rurales montañosas con áreas entre 170 Km² – 70000 Km².

$$T = \frac{4 \bar{A} + \frac{3L}{2}}{0.8 H} \quad (4.15)$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce (Km)

Hm: Altitud media de la cuenca (m)
A: Área de la cuenca (Km²)

4.16 APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE LA ONDA CINEMÁTICA EN EL CÁLCULO DE TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN

El flujo de agua superficial se compone de dos tipos básicos: flujo superficial y flujo en canal. El flujo superficial es el primer mecanismo de flujo en las cuencas naturales y tiene la forma de una capa delgada de agua que escurre a lo largo de una superficie ancha. El flujo continúa en esta condición durante una corta distancia, hasta que las irregularidades del terreno concentran el flujo en pequeños canales. Gradualmente, los flujos de estos pequeños canales se combinan hasta confluir en canales claramente definidos (Chow, 1994).⁵ El flujo de agua superficial está gobernado por los principios de continuidad y cantidad de movimiento.

Para calcular los TC en laderas y canales mediante velocidad de flujo y/o celeridad de la onda, entonces la teoría de la onda cinemática recomienda utilizar la celeridad de la onda para dicho cálculo, ya que muestra que para las laderas y canales (a excepción de los artificiales), el TC es mayor si se calcula con la velocidad de flujo que con la celeridad⁶. Por tanto al obtener TC mayores los caudales de diseño serán menores lo que conlleva a respectivas implicaciones en el diseño de estructuras hidráulicas.

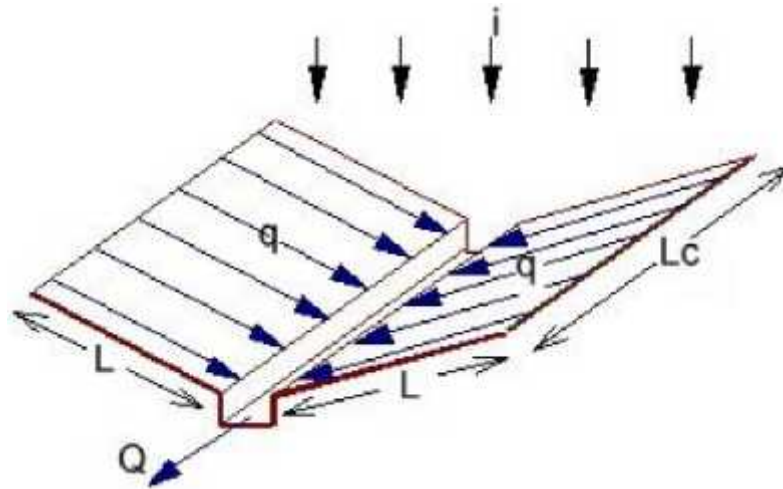
La teoría de la onda cinemática es una sensible aproximación para representar el flujo superficial en muchas situaciones reales. El nombre “cinemática” se refiere al movimiento sin tener en cuenta la influencia de la masa y la fuerza. El modelo utiliza dos tipos de soluciones: geométrica y de procesos. La primera radica en aproximar la complejidad geométrica del flujo de agua superficial sobre una cuenca por medio de una cascada de fracciones simples, tales como planos de escurrimiento (flujo superficial) y segmentos de canal (flujo en canal), que en conjunto describen las características del drenaje. La segunda, consiste en despreciar los términos de inercia y de presión en la ecuación dinámica. Una cuenca simple puede ser aproximada, como uno o más planos de escurrimiento que aportan lateralmente a un segmento de canal⁷. Como lo muestra la Figura 4.1.

⁵ Amancio P. R., Efectos de Escala sobre la Simulación del Flujo de Agua Superficial en Áreas Urbanas Usando Modelos Basados en la Onda Cinemática. Tesis doctoral. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2007.

⁶ UPEGUI, J. J.V. & GUTIÉRREZ, A.B. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. Dyna, v. 78, n. 165, p. 58-71, 2011

⁷ Amancio P. R., Efectos de Escala sobre la Simulación del Flujo de Agua Superficial en Áreas Urbanas Usando Modelos Basados en la Onda Cinemática. Tesis doctoral. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba. 2007.

Figura 4.1. Esquema de una cuenca simple.



Fuente: Amancio (2007).

En la Figura 4.1:

- i: Intensidad de lluvia en exceso
- L: Longitud del flujo sobre el plano
- Lc: Longitud del canal receptor
- q: Caudal lateral específico (para un ancho unitario del plano)
- Q: Caudal a la salida de la cuenca.

Para efectos prácticos con la aplicación de la teoría de la onda cinemática, fue desarrollada una ecuación (Ecuación 4.16) en la que se tiene en cuenta su efecto para el cálculo del TC.

$$T = 7.3 \ n^{0.6} \ i^{-0.6} \ L^{0.6} \ S^{-0.2} \quad (4.16)$$

Donde:

- Tc = Tiempo de concentración en horas (h)
- n = Coeficiente de Manning según la superficie del cauce
- i = Intensidad de precipitación (mm/h)
- L = Longitud del cauce (Km)
- S = Pendiente del cauce (m/m)

Según Sharifi & Hosseini (2011) la ecuación se basa en la teoría de la onda cinemática, considerando la superficie de flujo como un canal considerablemente grande y tomando en cuenta las hipótesis de flujo turbulento y la intensidad de lluvia constante⁸. Cabe resaltar que el fin del desarrollo de la teoría de la onda cinemática fue para conseguir que los modelos hidrológico-matemáticos tuvieran la mejor relación para describir el comportamiento de una determinada cuenca, sin utilizar fórmulas desarrolladas para otras cuencas.

4.17 APLICACIONES DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

En teoría para analizar y estimar los tiempos de concentración de una cuenca se debe contar con la información de las lluvias y los caudales, siendo así una cuenca conocida para proceder a realizar los hidrogramas unitarios y de allí ya plantear hipótesis y generar resultados necesarios para los diseños de estructuras hidráulicas.

Normalmente se comete el error al interpretar que el método Racional se sustenta en la hipótesis de que la duración del aguacero de cálculo coincide con el valor del tiempo de concentración en la cuenca estudiada. Sin embargo es necesario resaltar que la confusión radica en que existe una fase del aguacero que es la determinante sustancial del máximo caudal, y esta fase parcial tiene una duración igual al tiempo de concentración, pero no la totalidad del aguacero, cuya duración es independiente del tamaño de la cuenca estudiada y sólo en función de parámetros climáticos⁹.

Se dice que al comparar los TC para máximos caudales históricos, los resultados entre el método racional utilizando una y otra fórmula varían de manera significativa. También al comparar los mismos resultados con los obtenidos mediante el uso de cualquier versión del hidrograma unitario: *Dirección general de Carreteras, Bureau of Reclamation, Soil conservation service*, etc. Se podrá comprobar que los resultados de las versiones diferentes del Hidrograma unitario, coinciden sensiblemente con los del método racional de la dirección general de carreteras, mientras las del método racional de *Kirpch* varían significativamente¹⁰.

⁸ De ALMEIDA I. K., ALMEIDA A. K., ANACHE J. A. A., STEFFEN J. L. ESTIMATION ON TIME OF CONCENTRATION OF OVERLAND FLOW IN WATERSHEDS. *Geociências*. UNESP. São Paulo

⁹ CLARK, C.O. Storage and the Unit Hydrograph. *Proc. Amer. Soc. Engs.* Vol 69. P13331360. 1945.

¹⁰ TÉMEZ, J.R. Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales. *Rev. Obras Púb.* N°3.430, 4751. 2003.

4.17.1 Fórmula Racional o Americana

La mayor utilidad de conocer el tiempo de concentración es para el cálculo de caudales máximos; tal es el caso del método Racional:

$$Q = C I A \quad (4.17)$$

Donde:

Q: Caudal máximo para una lluvia determinada que produzca escorrentía

C: Es el coeficiente de escorrentía, adimensional

A: El área de la cuenca

I: Intensidad de diseño

Para determinar la intensidad de diseño (I) se necesita conocer la duración de la lluvia de diseño, la cual corresponde al tiempo de concentración. Este tiempo de concentración se ubica en las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (I-D-F) conjuntamente con el período de retorno de la lluvia.

Los expertos del Departamento de Transporte de Texas (TxDOT) sugieren un área de drenaje de máximo 200 acres (81 Ha) para la aplicación del método racional. Mientras que muchos analistas consideran esto es un límite "rígido", en realidad el límite realmente depende de la complejidad de la cuenca. Para una cuenca hidrográfica compleja (tal como una cuenca urbanizada), este límite probablemente debería ser mucho menor; Para una cuenca hidrográfica rural, el límite podría ser mucho mayor. Por lo tanto, es responsabilidad del diseñador determinar si el método es aplicable o no y justificar la aplicación del método racional basado en el juicio profesional.¹¹

Cuando se utiliza la fórmula Racional, se supone que el caudal máximo es producido por una lluvia que produzca escorrentía y que haya tenido una duración igual o mayor al tiempo de concentración (T_c). La aplicación del método racional se basa en una fórmula simple que relaciona el escurrimiento potencial productivo de la cuenca, la intensidad media de las precipitaciones para un la duración del tiempo (el tiempo de concentración) y el área de drenaje de la cuenca¹².

El coeficiente de escorrentía "C" varía entre 0 y 1.0 y se define como la relación entre el volumen de agua escurrido superficialmente y el volumen de agua precipitado. Este coeficiente depende claramente de las características de drenaje de la hoya estudiada.

¹¹ THOMPSON D.B. The Rational Method. Civil Engineering Dept. Texas Tech University. 2006

¹² Viessman, Jr., W. and Lewis, G. L., 1995, Introduction to hydrology, Fourth Edition, Harper Collins, pp 311ff.

4.17.2 Método de la Curva Número o del S.C.S. de los Estados Unidos

El método del número de curva (CN) (Ven Te Chow, 1984) fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU. (Natural Resources Conservation Service – NRCS), anteriormente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service - SCS) para calcular la precipitación efectiva o escorrentía como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad. Se usa ampliamente para estimar el caudal de una cuenca no instrumentada con estaciones de aforo. Se adapta bien a cuencas con áreas menores a 400 millas cuadradas.

La representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe), permitió obtener una familia de curvas que fueron estandarizadas a partir de un número adimensional de curva CN, que varía de 1 a 100, según sea el grado del escurrimiento directo. Así un número de la curva CN = 100, indica que toda la lluvia escurre y un CN = 1, indica que toda la lluvia se infiltra¹³. El método se basa en la siguiente relación:

$$Q = \frac{(P-0.2 S)^2}{(P+0.8 S)} \quad (4.17)$$

Donde:

Q: Escurrimiento (mm).

P: Precipitación por evento (mm).

S: Retención potencial máxima (mm).

Al hacer referencia a la precipitación por evento, se debe tener en cuenta que el parámetro variable para la presente aplicación, es la precipitación generadora de la escorrentía, de esta manera, aquellas generadas por las precipitaciones máximas, que son iguales al tiempo de concentración (Tc) asociadas a diferentes períodos de retorno.

El potencial máximo de retención de agua del suelo (S) se calcula con base al valor del CN (Ecuación 4.19) el cual a su vez depende de las condiciones del suelo, vegetación y manejo del cultivo.

¹³ Lavao P. S., Corredor R. J., Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. Caso de estudio: cuenca del río Murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica. Trabajo investigativo. Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada. 2014

$$S = \frac{1}{c} - 1 \quad (4.18)$$

Donde:

S: Potencial de retención máximo (mm).

CN: Curva Número (adimensional)

Una de las utilidades del método del S.C.S es determinar los caudales máximos a partir de los registros de lluvias máximas de 24 horas, las cuales se deberían considerar para duraciones iguales al Tc.

5 ESTADO DEL ARTE

En diversas aplicaciones se han tenido en cuenta los tiempos de concentración de una cuenca, con propósitos de diseño de diferentes estructuras hidráulicas, planeación de gestión de manejo o administración del recurso hídrico de la cuenca de estudio.

El Tc siempre ha sido catalogado como una variable interdependiente del terreno y el clima propio de la zona de la cuenca, pero esta situación ha sido contrastada con la aplicación de ecuaciones de cálculo del Tc desarrolladas para determinadas cuencas, que posteriormente son aplicadas en cuencas normalmente similares o diferentes. Sin embargo la amplia oferta de métodos para calcular el Tc ha llevado hoy a no desviarse mucho de los resultados esperados, ya que se hacen estudios aplicados para cuencas que cumplan con al menos los parámetros topográficos de cada ecuación, siendo varias las ecuaciones que evalúan el Tc de la cuenca.

Se han encontrado estudios similares con la estimación del Tc, en el país y en el exterior. Teniendo en cuenta que la finalidad de este trabajo es basarse en lograr una mínima o nula incertidumbre en los resultados de cálculo, a continuación se mostrara algunas investigaciones similares.

- **Popayán – Colombia:**

Metodologías para la determinación de caudales máximos en cuencas hidrográficas con y sin registros de caudal, por: Fabián López y César Mavisoy.

Resumen: El objetivo de esta investigación, fue estimar el valor de caudales máximos, para lo cual transformaron el valor de lámina de escorrentía a un valor de caudal, Q (m³/s), multiplicando por el área de la cuenca (m²) y dividiendo entre el tiempo de duración de la lluvia generadora. Como en la cuenca de estudio no se encontraron registros pluviográficos

para determinar la duración de esta lluvia se asumió que la duración de ésta es igual al tiempo de concentración de la cuenca, es decir es el tiempo en el cual toda el área de la cuenca está aportando escorrentía.

De las metodologías utilizadas para calcular el T_c , se promediaron solo aquellas a partir de las cuales se obtuvieron los caudales máximos más ajustados a los determinados a partir de los registros de la estación Puente Carretera sobre el río Las Piedras. Así, se seleccionaron los métodos de Témez, Pilgrim, D.G.C., Clark y Rivero. El promedio de estos cinco métodos fue de 4.54 h. Este tiempo de concentración se utilizó en el cálculo de los caudales máximos.

- **Manizales – Colombia:**

“Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales”. Por: Jorge Julián Vélez Upegui y Adriana Botero Gutiérrez¹⁴.

Resumen: La quebrada San Luis tiene una cuenca experimental pequeña, ubicada en la zona urbana de la ciudad de Manizales, típica de media montaña de la zona andina colombiana, que se encuentra muy bien instrumentada pues cuenta con cuatro estaciones pluviográficas y una de aforo dentro de ella para un área aproximada de 1,0 km². La información temporal se unificó para tenerla disponible a intervalos de 5 minutos. En el trabajo se estimaron los tiempos de concentración y de rezago de la cuenca a partir de la información disponible en los hidrogramas y hietogramas registrados, para compararlos con los valores estimados mediante las ecuaciones empíricas disponibles en la literatura.

Las principales conclusiones destacan que el tiempo de concentración que muestra un mejor ajuste a los observados en la cuenca experimental es el valor de la mediana de las ecuaciones: ASC modificada, Bransby –Williams, CHPW, Clark, George Rivero, Ecuación de Retardo del SCS, FAA, Giandotti, Henderson y Wooding, Izzard, Johnstone Cross, Kerby – Hathaway, Kirpich, Método Racional generalizado, Morgali y Linsley, Passini, Pérez, Pilgrim y McDermott, Snyder, Témez, Valencia y Zuluaga, Ventura - Heras. De otra parte, las ecuaciones de Kirpich, Passini, California y Ventura - Heras fueron las que mostraron valores más conservadores para el diseño hidrológico, ya que presentaron respuestas más rápidas a las observadas.

¹⁴ UPEGUI, J. J.V. & GUTIÉRREZ, A.B. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. Dyna, v. 78, n. 165, p. 58-71, 2011

- **São Paulo – Brasil:**

“Estimación del tiempo de concentración del flujo exterior en orillas”. Autores: Isabel Kaufmann de Almeida; Aleska Kaufmann Almeida; Jamil Alexandre Ayach Anache; Jorge Luiz Steffen y Teodorico Alves Sobrinho¹⁵.

El tiempo de concentración es un parámetro fundamental en muchos modelos hidrológicos. Hoy en día no existe una definición universalmente aceptada para dicho parámetro. Sin embargo, muchas definiciones y procedimientos de estimación se pueden encontrar en la literatura técnica.

Después de una extensa revisión bibliográfica, el estudio puso de manifiesto la variabilidad de las metodologías empíricas utilizadas en sus estimaciones. Se listaron treinta metodologías empíricas y se realizaron estimaciones del tiempo de concentración aplicando estas metodologías utilizando datos de una cuenca hidrográfica rural. El análisis de agrupamiento jerárquico (Cluster) se aplicó para evaluar el grado de similitud entre las metodologías seleccionadas. Entre todas las metodologías, las de Passini y Ventura son las que presentan mayor similitud entre sí, mientras que Passini y Arizona DOT muestran disimilitudes más fuertes entre sí.

6 MARCO CONCEPTUAL

Las principales definiciones que tienen que ver con la determinación de los tiempos de concentración son:

- **Cuenca hidrográfica:** es una unidad morfológica integral. Es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua llamado cauce principal. Se delimita con la línea divisoria de aguas.
- **Subcuenca:** También llamadas cuencas tributarias, son toda área que desarrolla su drenaje directamente al curso principal de la cuenca. Varias subcuencas pueden conformar una cuenca.
- **Microcuenca:** Es toda área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una subcuenca. Varias microcuencas pueden conformar una subcuenca.

¹⁵ De Almeida I. K., Almeida A. K., Anache J. A. A., Steffen J. L. Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds. Geociências. UNESP. São Paulo. 2014.

- **Divisoria de Aguas o Parteaguas:** Es la línea imaginaria que delimita la cuenca y generalmente coincide con la línea topográfica que se traza por los puntos más altos alrededor de la misma.
- **Tamaño de una cuenca hidrográfica:** Cuanto mayor es el tamaño de la cuenca mayor es el valor del TC. Entre las muchas clasificaciones por tamaño, el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos citado por Aguirre (2007), clasifican las cuencas así:
 - Sistema hidrográfico (más de 300.000 Ha)
 - Cuencas (60.000 - 300.000 Ha)
 - Subcuencas (10.000 - 60.000 Ha)
 - Microcuenca (< 10.000 Ha).
- **Topografía de la cuenca hidrográfica:** Una topografía empinada generará escorrentías más rápidas y un Tc menor que una topografía ondulada o plana.
- **Parámetros morfométricos:** De cada cuenca hidrográfica, los parámetros morfométricos relacionados con el tiempo de concentración se relacionan a continuación:

Tc: Tiempo de concentración (h)

L: Longitud del cauce principal, se denomina a la ruta que recorre desde el punto de desembocadura hasta el más alejado que corte el perímetro. (Km).

A: Área de la cuenca (Km²)

Ff: Factor de forma de cada cuenca, adimensional

S: Pendiente del Cauce principal (m/m)

So: Pendiente promedio del cauce, %

i: Intensidad de precipitación (mm/h)

Hm: Altura media de la cuenca (m)

tc: Tiempo de concentración (min)

Lp: Longitud del cauce principal (pies, m)

Sin: Sinuosidad, adimensional.

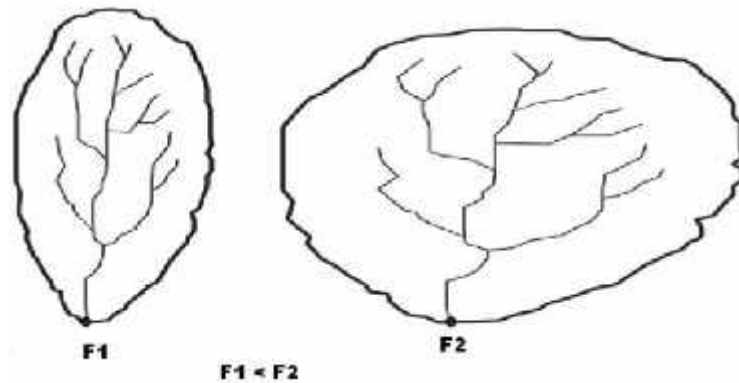
p: Relación entre la cuenca cubierta de vegetación y el área total de la misma, valor adimensional. (Es el cociente de la relación entre el área de la cuenca cubierta de cualquier tipo de vegetación, sobre el área total de la cuenca).

Entre los anteriores parámetros, a continuación se describen los más relevantes:

1) Forma de la cuenca: Expresa la relación, entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud. En la Figura 6.1 se aprecia que ambas cuencas tienen un

tipo de drenaje simétrico, pero la distancia máxima al punto de salida es mayor en una que en otra. El T_c será, por lo tanto, mayor; la intensidad correspondiente menor y el máximo caudal de escorrentía menor. Esto explica que en igualdad de las restantes circunstancias las cuencas largas y delgadas tiendan a presentar inundaciones o avenidas menos bruscas que las cuencas aproximadamente redondas o cuadradas. Una estima aproximada del tiempo de concentración puede obtenerse a partir únicamente del área de la cuenca¹⁶.

Figura 6.1. Índice del factor de forma en los tipos de cuencas.

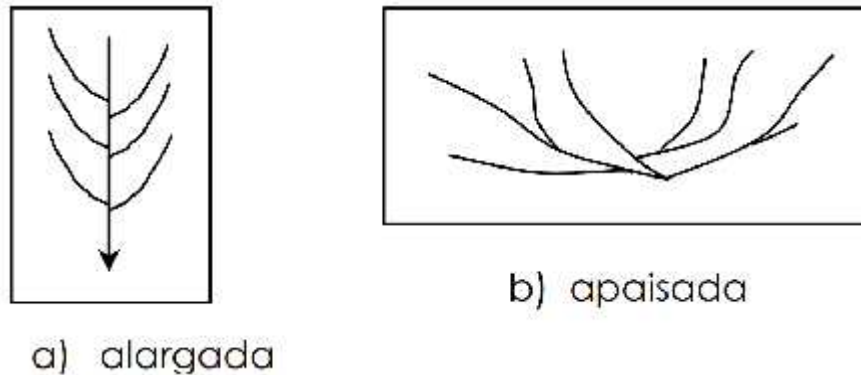


Fuente: Villón (2002).

2) Pendiente del cauce principal: El conocimiento de la pendiente del cauce principal de una cuenca, es un parámetro importante, en el estudio del comportamiento del recurso hídrico, como por ejemplo, para la determinación del tiempo de concentración (T_c) será menor en cuanto mayor sea la pendiente. La fuerte influencia en la forma de la pendiente también generará cambios en el valor del tiempo de concentración para la misma (Figura 6.2). Cuando una cuenca tiene forma alargada el valor del T_c será menor que cuando es una cuenca apaisada.

¹⁶ Hudson N. Conservación del Suelo. Editorial Reverté. Madrid. 1982

Figura 6.2. Influencia de la forma de la cuenca.



Fuente: Velásquez (2006).

Existen varios métodos para obtener la pendiente de un cauce, entre los que se pueden mencionar¹⁷:

a) Pendiente uniforme: En este método se considera la pendiente del cauce, como el cociente entre el desnivel que hay entre los extremos del cauce y la proyección horizontal de su longitud, se recomienda utilizar este método en tramos cortos, Ecuación 6.1.

$$S = \frac{H}{L} \quad (6.1)$$

Donde:

S: Pendiente del cauce (m/m)

H: Diferencia de cotas entre los extremos del cauce (Km)

L: Longitud del cauce (Km)

b) Taylor y Schwarz: En este método se considera que un cauce está conformado por n tramos (Figura 6.5), cada tramo con pendiente uniforme. La ecuación 6.2 de Taylor y Schwarz, para n tramos de igual longitud es:

$$S = \left[\frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (6.2)$$

¹⁷ VILLON B. M. Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos en Cuencas Hidrográficas. Curso de Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas. CATIE. Costa Rica. 2002.

Donde:

n: Número de tramos iguales en los que se divide el perfil

S_i : Pendiente de cada tramo, " $S_i = H_i/L_i$ "

S: Pendiente del cauce

La aproximación de la Ecuación (6.2) es mejor en cuanto mayor sea el número de tramos, en los cuales se divide el perfil longitudinal del cauce de estudio. Normalmente, se encuentra en la práctica, que los tramos tienen diferente longitud, para este tipo de situaciones Taylor y Swarchz recomiendan hacer uso de la Ecuación 6.3.

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n L_i S_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \right]^2 \quad (6.3)$$

Donde:

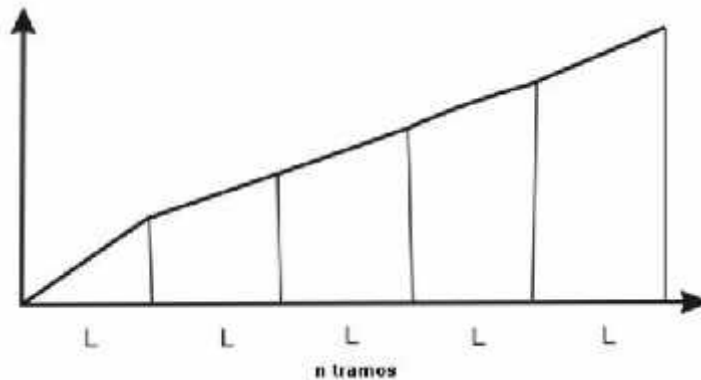
S = Pendiente media del cauce

L_i = Longitud del tramo i

S_i = Pendiente del tramo i

La esquematización del método de Taylor Swarz se muestra en la Figura 6.4.

Figura 6.4. Método de Taylor – Schwarz: "n" tramos que comprenden la longitud del cauce.



Fuente: Villón (2002).

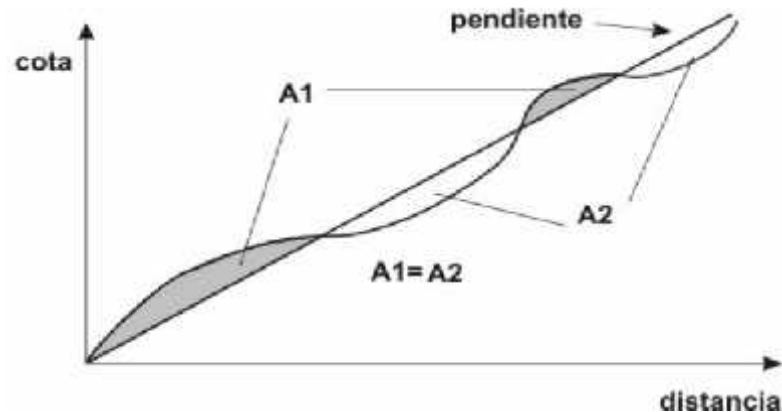
c) **Método de la Compensación de Áreas:** Para evaluar de manera más precisa la pendiente de un cauce, se puede realizar compensando su

recorrido, o sea escoger la pendiente de una línea que se apoya en el extremo final del tramo por estudiar, y que tiene la propiedad de contener la misma área (abajo y arriba), respecto al perfil del cauce¹⁸ (Figura 6.5).

El procedimiento de cálculo es¹⁹:

1. Trazar el perfil longitudinal del cauce.
2. Trazar una línea apoyada en el extremo final, y que divida el perfil longitudinal en áreas por encima y por debajo de ella.
3. Calcular con un planímetro las áreas por encima (A1) y por debajo de la línea (A2).
4. Si estas áreas son aproximadamente iguales, es decir $A1 = A2$, la línea trazada representa la pendiente del cauce, sino repetir los paso 2 y 3 (Figura 6.5).

Figura 6.5. Pendiente del cauce por compensación de áreas.



Fuente: Villón (2002).

Cuando se determina el tiempo de concentración hay que tener en cuenta que las corrientes donde éste se mide pueden clasificarse como:

- **Efímera:** aquella que solo lleva agua cuando llueve e inmediatamente después ya no existe.

¹⁸ VILLON B. M. Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos en Cuencas Hidrográficas. Curso de Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas. CATIE. Costa Rica.

¹⁹ VILLON B. M. Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos en Cuencas Hidrográficas. Curso de Especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas. CATIE. Costa Rica.

- **Intermitente:** lleva agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en época de lluvias; su aporte cesa cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce.
- **Perenne:** contiene agua todo el tiempo, ya que aún en época de sequía es abastecida continuamente, pues el nivel freático siempre permanece por arriba del fondo del cauce.

7 METODOLOGÍA

La búsqueda de este trabajo se fundamenta en analizar la gran incertidumbre de los resultados dados por las diferentes fórmulas empíricas utilizadas para determinar el Tc, teniendo en cuenta que las variables que intervienen en todas las ecuaciones son de tipo topográfico, como la pendiente y la longitud del cauce principal, con poca consideración, por ejemplo, de las características topográficas de las laderas vertientes²⁰.

7.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

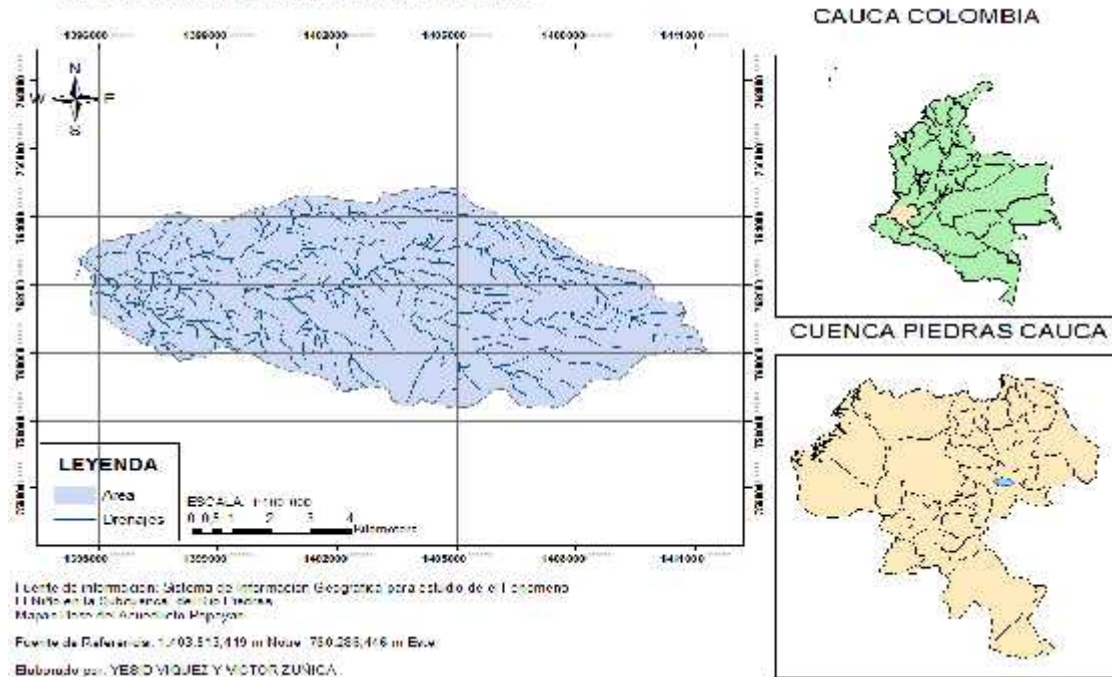
La subcuenca del río Las Piedras está ubicada en el municipio de Popayán y Totoró, al nororiente de la ciudad, sobre el flanco occidental de la cordillera Central. Se encuentra a 76° 31' 10" al Oeste de Greenwich y 2° 21' 45" de latitud Norte, en el nacimiento del río y a 76° 23' 45" longitud Oeste y 2° 25' 40" de latitud Norte en la desembocadura del río Cauca (Figura 7.1).

Limita al norte con la divisoria de aguas de la subcuenca del río Palacé, al sur con la divisoria de aguas del río Vinagre, al este con los cerros de Puzná y Cargachiquillo, al oeste con el río Cauca. Hace parte de la cuenca del río Cauca en el Departamento del Cauca. Su extensión es de 6.626 Ha. La subcuenca comprende dos corregimientos:

- 1) Quintana al que pertenecen las veredas Quintana, San Ignacio, La Laguna, Parcelación El Canelo, Laureles, parte baja de San Juan.
- 2) Las Piedras al que pertenecen las veredas Las Huacas y San Isidro.

²⁰ IBÁÑEZ A. S., MORENO R. H., GISBERT B. J. M. Métodos para la determinación del Tc de una cuenca hidrográfica. Producción vegetal. Escuela técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.

Figura 7.1. Ubicación subcuenca del río Las Piedras.
CUENCA HIDROGRÁFICA RIO PIEDRAS



Fuente: Mapa base del Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

7.2 CLIMA

De acuerdo a la clasificación climática de la subcuenca se cuenta con “clima medio y húmedo: se presenta este clima, en la franja altitudinal por debajo de los 2000 msnm, en una pequeña proporción de la parte baja de la subcuenca, en las veredas Las Huacas y San Isidro, con temperaturas promedio similares de 19.3° C. La subcuenca del río Las Piedras cuenta con altitudes en un rango entre 1.980 y 3.820 msnm.

7.2.1 Precipitación

Según el Plan de Ordenación y Manejo de la subcuenca del río Las Piedras, la precipitación de la subcuenca no es uniforme. Esto se debe a que es un clima típicamente ecuatorial de montaña con pisos térmicos como, templado, frío y de páramo con pisos bioclimáticos subandinos y altoandinos. Estos pisos se ven afectados por los vientos alisios y por la geomorfología del área, generando precipitaciones de tipo orográfico. De esta manera, se encuentran periodos de lluvias de octubre a mayo y un periodo seco de junio a septiembre. Los periodos más intensos de lluvias están entre octubre y diciembre, haciendo que la oferta

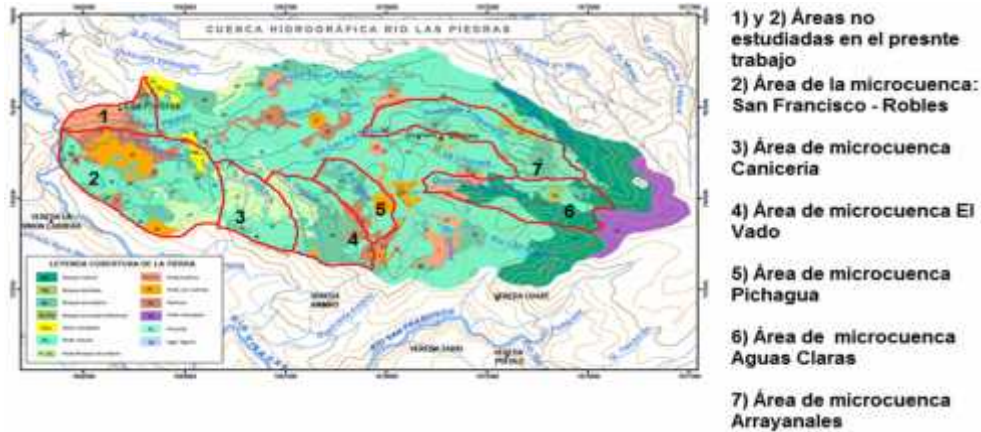
hídrica de la zona se mantenga, debido a sus largos meses de precipitación y la retención de aguas de sus suelos²¹.

7.3 HIDROGRAFÍA

La subcuenca del río Las Piedras pertenece a la cuenca del río Cauca. El río Las Piedras nace a partir de las corrientes Aguas Claras y Peñas Blancas; aguas abajo, a la corriente principal llegan 18 quebradas: Agua Colorada, Carnicería, El Vado, Pichagua, El Cedro, Las Juntas, La Costa, La Chorrera, Arrayanales, El Arado, El Limonar, Santa Teresa, Los Robles, La Josefina, San Pedro y caño El Muerto. En la subcuenca del río Las Piedras se encuentra la estación hidrométrica Puente Carretera, la cual monitorea la corriente a una altura de 2000 msnm. Esta estación sirve de referente en la generación de caudales máximos para diseño de estructuras hidráulicas, entre otros.

Para el presente trabajo se determinaron los tiempos de concentración para el río Las Piedras (hasta la estación hidrométrica Puente Carretera) y en las microcuencas de las quebradas: Aguas Claras, Arrayanales, Pichagua, El Vado y Carnicería. Lo anterior, al tener en cuenta que estas corrientes son de gran importancia por su alto aprovechamiento en actividades agrícolas y de fuentes de abastecimiento de agua potable (Figura 7.2).

Figura 7.2. Ubicación de las microcuencas de análisis.



Fuente: López y Mavisoy (2016) con modificaciones propias.

²¹ López F. y Mavisoy C. Metodologías para la determinación de caudales máximos en cuencas hidrográficas con y sin registros de caudal. Universidad del Cauca. Popayán. 2016.

7.2.1 Características de la red de drenaje

Esta caracterización se hace a partir de los valores de densidad de drenaje, pendiente del cauce principal, orden del cauce principal y densidad hidrográfica.

Pendiente de la corriente principal: La pendiente de la corriente principal es 0.35 m/m, acorde con las pendientes típicas de los ríos de montaña.

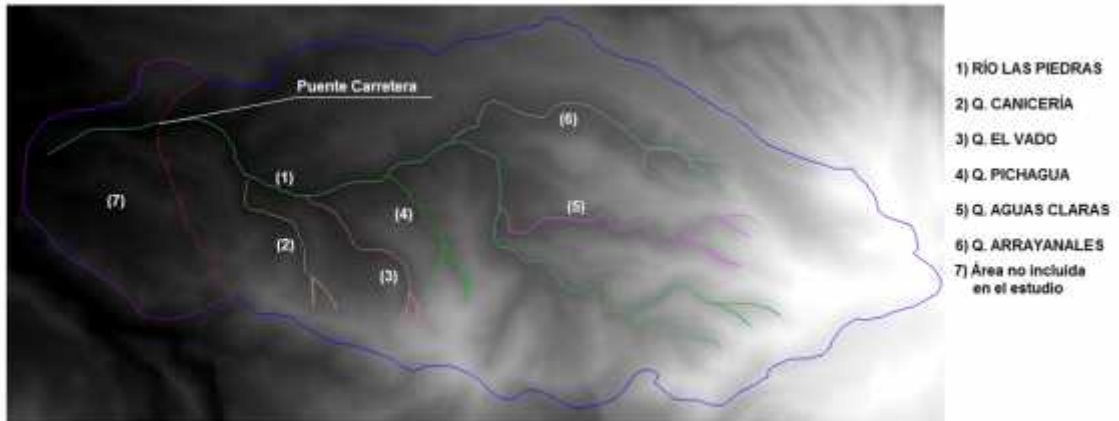
Densidad de Drenaje: se define como la relación entre la longitud de los canales de flujo y la superficie de la cuenca. En el caso particular de estudio este parámetro evidencia la alta capacidad de escorrentía de la subcuenca. En total el sistema de drenajes de la cuenca tiene una longitud de 250.88 km distribuidos en 66.27 km² para un valor calculado de densidad de drenaje de 3.785 (kilómetro de cauce sobre kilómetro cuadrado de área).

Densidad Hidrográfica: Este parámetro representa en número de canales de flujo por unidad de superficie. En el caso de la cuenca el valor es de 6.2 cauces/km², lo que evidencia una alta escorrentía.

Los resultados morfométricos de la subcuenca la definen como una subcuenca en estado de desequilibrio o juventud clasificándola como erosiva, lo que permite analizar la importancia que representa la conservación de los principales sistemas reguladores de la subcuenca y su relación con la estabilidad de los caudales medios; lo anterior unido a los tiempo de concentración le permite a la subcuenca regular en condiciones favorables de conservación y evitar la amenaza por crecidas y avalanchas. Es importante destacar que la subcuenca posee una densidad de drenaje de 3.78 km/km² permitiendo un buen drenaje con grandes volúmenes de escurrimiento y altas velocidades de desplazamiento de las aguas.

Teniendo en cuenta que el área de la cuenca del río Las Piedras está intervenida por el embalse Florida II, el cual recibe las afluentes de las quebradas: Robles y San Francisco (Figura 7.3). El área total de estudio de la cuenca del río Las Piedras se delimita hasta la Estación Puente Carretera, 2.43 km antes de su desembocadura al río Cauca.

Figura 7.3. Área de microcuenca no analizada en el presente trabajo.



Fuente: Elaboración propia en QGIS.

7.4 COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO

Este tema ha sido resumido del Plan de Ordenación y Manejo de la subcuenca del río Las Piedras de la Corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC, Figura 7.4 y Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Cuantificación por área, cobertura y uso del suelo

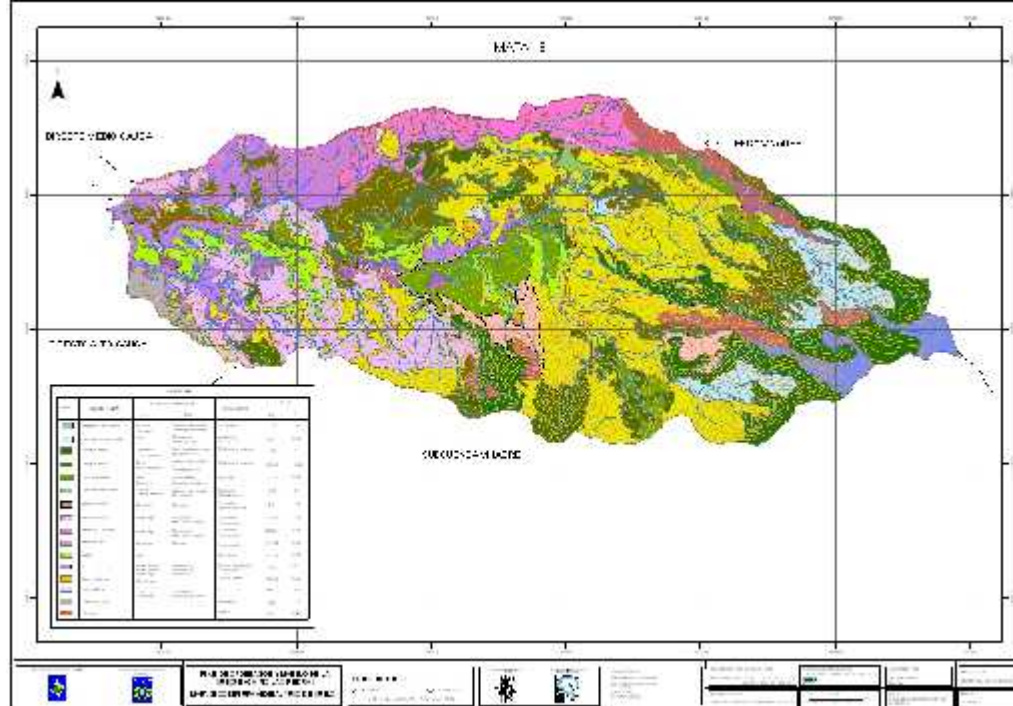
Item	Cobertura	Uso	Pendiente	Área (m ²)	Área(Ha)
1	PASTOS	PECUARIO	50-75%	55721	5.6
2	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	8514	0.9
3	PASTOS	PECUARIO	25-50%	48394	4.8
4	RASTROJOS	REGENERACION	50-75%	32171	3.2
5	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	44740	4.5
6	RASTROJOS	REGENERACION	50-75%	203262	20.3
7	PASTOS	PECUARIO - AGRICOLA	50-75%	613863	61.4
8	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	101090	10.1
9	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	107816	10.8
10	PASTOS	PECUARIO	25-50%	255760	25.6
11	RASTROJOS	REGENERACION - PECUARIO	50-75%	281540	28.2
12	PASTOS	PECUARIO - AGRÍCOLA	50-75%	147540	14.8
13	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	498841	49.9
14	PASTOS	PECUARIO	25-50%	1452201	145.2
15	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	546032	54.6
16	PASTOS	PECUARIO	25-50%	53839	5.4

17	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	108459	10.8
18	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	1922043	192.2
19	PASTOS	PECUARIO	25-50%	812096	81.2
20	BOSQUES	REGENERACION	50-75%	171637	17.2
21	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	119986	12.0
22	PASTOS	PECUARIO	25-50%	58026	5.8
23	PASTOS	PECUARIO	25-50%	311735	31.2
24	PASTOS	PECUARIO - AGRÍCOLA	50-75%	214413	21.4
25	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	671401	67.1
26	BOSQUES	PROTECCION	50-75%	8054492	805.4
27	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	42770	4.3
28	PASTOS	PECUARIO - AGRICOLA	50-75%	269989	27.0
29	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	65875	6.6
30	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	92735	9.3
31	PASTOS	PECUARIO	25-50%	389591	39.0
32	PASTOS	PECUARIO	25-50%	2284100	228.4
33	PASTOS	PECUARIO	25-50%	1264932	126.5
34	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	21942	2.2
35	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	131959	13.2
36	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	627925	62.8
37	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	568228	56.8
38	PASTOS	PECUARIO	25-50%	1247751	124.8
39	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	381714	38.2
40	PISCÍCOLA	PISCICOLA	50-75%	96761	9.7
41	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	31444	3.1
42	PASTOS	PECUARIO - Agrícola	25-50%	148989	14.9
43	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	874217	87.4
44	PASTOS	PECUARIO	25-50%	296379	29.6
45	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	72669	7.3
46	PASTOS	PECUARIO	25-50%	1076562	107.7
47	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	88587	8.9
48	LAGO	GENERACION ELECTRICA	25-50%	7163	0.7
49	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	156115	15.6
50	BOSQUES	REGENERACION	50-75%	211485	21.1
51	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	18162	1.8
52	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	25-50%	34331	3.4
53	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	211329	21.1
54	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	1142998	114.3
55	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	3656	0.4

56	BOSQUES	COMERCIAL - PROTECTOR	50-75%	373572	37.4
57	PASTOS	PECUARIO	50-75%	151935	15.2
58	RASTROJOS	REGENERACION	50-75%	414774	41.5
59	RASTROJOS	REGENERACION	50-75%	584445	58.4
60	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	189027	18.9
61	PASTOS	PECUARIO - REGEN - CONSERV. ACTIVA	50-75%	327795	32.8
62	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	252078	25.2
63	RASTROJOS	REGENERACION	50-75%	68108	6.8
64	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	59120	5.9
65	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	289180	28.9
66	PASTOS	PECUARIO - REGENERACION	50-75%	302820	30.3
67	PASTOS	PECUARIO	50-75%	395396	39.5
68	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	692338	69.2
69	PASTOS	PECUARIO	50-75%	498796	49.9
70	PASTOS	PECUARIO	50-75%	23639722	2364.0
71	PASTOS	PECUARIO - REGENERACION	50-75%	882879	88.3
72	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	811006	81.1
73	PASTOS	PECUARIO	50-75%	32051	3.2
74	PASTOS	PECUARIO	50-75%	57249	5.7
75	PARAMO	PROTECCION	50-75%	2324297	232.4
76	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	119702	12.0
77	PASTOS	PECUARIO	25-50%	141404	14.1
78	PASTOS	PECUARIO	25-50%	264687	26.5
79	PASTOS	PECUARIO	25-50%	718050	71.8
80	PASTOS	PECUARIO	50-75%	1446050	144.6
81	PASTOS	PECUARIO	25-50%	1197492	119.7
82	PASTOS	PECUARIO	25-50%	1079346	107.9
83	BOSQUES	CONSERVACION ACTIVA	50-75%	151633	15.2
84	PASTOS	PECUARIO	25-50%	357426	35.7
85	RASTROJOS	REGENERACION	25-50%	53041	5.3

Fuente: López y Mavisoy (2016).

Figura 7.4. Mapa de uso del suelo de la subcuenca del río Las Piedras.



Fuente: Mapa base del Acueducto y Alcantarillado de Popayán.

7.5 PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS

Los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Las Piedras están detallados a continuación y tomados del Plan de Ordenamiento de la subcuenca del río Las Piedras (C.R.C., 2006) (Anexo G):

- Área de la cuenca: 66.27 Km²
- Longitud del Cauce principal: 18.95 Km
- Cota mayor de la cuenca: 3750 msnm
- Cota menor de la cuenca: 1900 msnm
- Cota más alta del cauce principal: 2640 msnm
- Cota más baja del cauce principal: 1800 msnm
- Factor de forma de la cuenca: 0.27
- Elevación media en la cuenca: 2624 msnm
- Pendiente media Taylor – Shwarz: 0.33%

La clasificación de las cuencas para el presente estudio se presenta en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Clasificación de las cuencas de análisis.

CAUCE	ÁREA (Ha)	CLASIFICACIÓN
Río Las Piedras	6626	Subcuenca*
Quebrada Aguas Claras	387.2	Microcuenca
Quebrada Arrayanales	440.1	Microcuenca
Quebrada Carnicería	272.4	Microcuenca
Quebrada El Vado	262.3	Microcuenca
Quebrada Pichagua	178.3	Microcuenca

*Clasificación del A.A.P. S.A.
Fuente: Elaboración propia.

7.6 MUESTREO DE CAMPO

Inicialmente los recorridos a los afluentes fueron guiados por personas nativas de las veredas. Los trayectos fueron realizados a lo largo de todo el trazado de cada afluente teniendo en cuenta que algunos tramos eran de difícil acceso y obligaban a tomar rutas alternas. No obstante las distancias han sido corroboradas con un SIG de tipo Licencia - Libre que se llama "QGIS". En este SIG fueron corroborados detalles (cotas, longitudes, coordenadas y variables climáticas) de cada recorrido, por medio de imágenes satelitales.

Los recorridos se iniciaron desde el sitio de nacimiento de cada afluente, teniendo en cuenta que las condiciones de acceso generalmente solo permitían llegar allí caminando. Previo a la iniciación del recorrido, en el punto inicial se tomaba la altitud; posteriormente se procedía a medir tramos de 10 m a 20 m con cinta, para realizar las mediciones de las velocidades superficiales de cada tramo del cauce, ayudándose de un cronómetro. En los tramos en donde no se lograba continuar con el procedimiento descrito, se referenciaba coordenadas, altitud y distancia de recorrido hasta allí, para posteriormente ser corroborados con el sistema de información geográfico "QGIS". A lo largo del recorrido hubo tramos en los que fue necesario retirar del cauce, materiales residuales de los bosques como troncos, volúmenes pequeños de tierra, basura orgánica, piedras, entre otros, que limitaban la continuidad del procedimiento de medición del tiempo de recorrido superficial de las bolas de ping - pong.

Cabe resaltar que aproximadamente cada 100 m a 300 m de recorrido a lo largo del cauce, se registraban datos de altitudes para poder medir las pendientes del mismo. Para finalizar los recorridos, se registraba la altitud del punto de desembocadura del afluente, la longitud del cauce, el tiempo de recorrido de las pelotas y se realizaba un registro fotográfico, teniendo en cuenta que este último

también se hizo en algunos de los tramos en donde se efectuaban las mediciones de tiempo de recorrido.

Es necesario aclarar también que para el presente trabajo no se tuvo en cuenta el tiempo de viaje desde la línea divisoria de aguas hasta el nacimiento, porque eran distancias muy cortas. Además, hay que tener presente que los Tc medidos en campo resultaron muy grandes comparados con los Tc estimados a partir de las fórmulas empíricas.

Materiales utilizados en campo: La logística que se empleó en campo consistió en:

- Cinta de 20 m
- Altimetro con precisión de 1 m
- Pelotas de Ping – Pong
- Cronómetro
- Cámara fotográfica
- Aplicación móvil “Mi Ruta” para medir distancias recorridas
- Machete
- Estacas.

Los datos de longitud total y altitud en nacimiento y desembocadura de cada corriente, fueron medidos directamente en campo teniendo cuidado de verificarlos con los registrados a partir del programa SIG “QGIS” (Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Datos de campo de cada corriente.

QUEBRADA O RÍO	ALTITUD (m.s.n.m.)		LONGITUD (m)	PENDIENTE (%)
	NACIMIENTO	DESEMBOCADURA		
CARNICERÍA	2568	2168	2340	17.09
EL VADO	2917	2203	3354	21.29
PICHAGUA	2819	2289	2590	20.46
ARRAYANALES	2997	2370	5565	11.27
AGUAS CLARAS	3210	2416	4614	17.21
RÍO LAS PIEDRAS	2640	2000	16520	3.87

Fuente: Elaboración propia.

7.7 MEDICIÓN DIRECTA DE LOS TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN

Este método de las pelotas de ping – pong también llamado “Método de los Flotadores Simples” consistió en medir la velocidad de desplazamiento de las pelotas sobre el agua. Las ventajas de este método se basan en que es

económico, práctico y con menor interdependencia de las condiciones del cauce con respecto a otros como el uso de trazadores y sales.

Siguiendo las conclusiones y recomendaciones del estudio de Sánchez (2013), se debe multiplicar el valor del tiempo de concentración obtenido en campo con el método de los flotadores, por un valor que esté entre 0.7 y 0.8. En este caso se tomó 0.7 debido a la alta sinuosidad de los ríos de montaña ya que la trayectoria de los flotadores no es en línea recta sino que se desvían constantemente por los obstáculos que van encontrando como rocas, principalmente. Cuando se desvía la ruta en línea recta del flotador, se siguen trayectorias que afectan la velocidad del mismo por la mayor distancia recorrida y porque cerca de las orillas por lo general se presentan velocidades más bajas del flujo y también vórtices y oleaje, lo que se traduce en aumentos excesivos en el tiempo de concentración real.

Las mediciones directas con los flotadores o pelotas de ping – pong sobre cada una de las quebradas analizadas se realizaron en tramos entre 10 m y 20 m de distancia, teniendo en cuenta que los elementos fijos en las corrientes de agua como rocas, árboles, troncos, desechos orgánicos, entre otros, no afectara su recorrido normal.

Los cálculos de la sinuosidad y las carteras de campo en medio magnético de cada corriente, se encuentran en el Anexo G.

8 RESULTADOS

8.1 TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN MEDIDOS EN CAMPO

Los resultados encontrados con el método de los flotadores o pelotas de ping - pong se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Tiempos de recorrido con flotadores, obtenidos en campo.

QUEBRADA O RÍO	Tc medido y corregido	Tc medido en campo		
	(min)	(min)	(seg)	(h)
CARNICERÍA	44.4	60.9	4175.2	1.0
EL VADO	61.6	84.4	5784.0	1.4
PICHAGUA	44.2	60.6	4152.0	1.0
ARRAYANALES	133.1	182.4	12505.6	3.0
AGUAS CLARAS	108.6	148.8	10203.2	2.5
RÍO LAS PIEDRAS	268.7	368.1	25239.2	6.1

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la medición en campo abarca una gran cantidad de variables como: rugosidad del lecho del cauce, radio hidráulico, sinuosidad de la trayectoria para la medición del Tc, presencia de obstáculos y ajuste de la velocidad media del flotador. Se estimó el Tc medido en campo como:

$$T_c = T_{c \text{ medido}} * T * V \quad (8.1)$$

Donde:

Tc = Tiempo de concentración medido *in situ*.

T = Corrección por sinuosidad = 0.7 (Sánchez, 2013).

V = Corrección por velocidad superficial a media = 0.73.

En el Anexo G se presentan estos cálculos.

8.2 TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN DETERMINADOS CON FÓRMULAS EMPÍRICAS

Los tiempos de concentración encontrados por las diferentes fórmulas de Tc y medidos en campo, se presentan en la Tabla 8.2. Para las determinaciones del tiempo de concentración por algunos métodos fue necesario estimar algunos parámetros adicionales bajo condiciones promedias como: coeficiente de rugosidad de Manning (n) = 0.035; coeficiente de escorrentía (C) = 0.67²² y una intensidad de diseño (i) = 25 mm/h, tomada como ejemplo para precipitación con período de retorno de 2 años.

8.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la comparación de los tiempos de concentración medidos en campo y los determinados por fórmulas empíricas, se estimó que se podían considerar iguales aquellos que se ubicaran dentro de un intervalo de confianza del 10% de los medidos *in situ*.

²² López F. y Mavisoy C. 2016. Metodologías para la determinación de caudales máximos en cuencas hidrográficas con y sin registros de caudal. Universidad del Cauca. Popayán.

Tabla 8.2. Tiempos de concentración por diferentes fórmulas empíricas, para las corrientes estudiadas.

FÓRMULA Tc (min)	AGUAS CLARAS	ARRAYANALES	CARNICERÍA	EL VADO	PICHAGUA	RÍO LAS PIEDRAS
CLARK	-	-	-	-	-	557.1
GEORGE RIVERO	-	95.2	-	-	-	203.8
PILGRIM Y McDERMOTT	76.3	80.1	66.7	65.8	56.8	206.7
TÉMEZ	80.4	100.5	48.0	60.6	50.2	281.3
D.N.C	80.4	100.5	48.0	60.6	50.2	281.3
KIRPICH	-	34.6	-	-	-	120.5
BRANSBY - WILLIAMS	83.7	108.4	44.0	60.6	49.0	310.5
KERBY - HATHAWAY	-	28.2	17.1	19.2	17.2	-
DOOGE	51.4	58.3	44.6	42.3	36.4	194.3
VEN TE CHOW	-	58.0	-	-	-	-
CUERPO DE INGENIEROS DE EEUU	51.2	64.0	30.6	38.6	31.9	179.1
PASINI	-	-	-	-	-	503.0
GIANDOTTI	-	-	-	-	-	84.1
CALIFORNIA CURVERTS PRACTICE	25.5	34.7	15.2	18.4	15.3	115.5
E. DE RETARDO DEL SCS	57.1	96.6	27.6	39.7	38.9	-
VENTURA	-	-	-	-	-	265.5
PENDIENTE	17.2	11.3	17.1	21.3	20.5	3.9
SINUOSIDAD	1.08	1.15	1.08	1.06	1.04	1.22
Tc promedio de las fórmulas (min)	66.1	71.8	38.0	45.1	38.4	223.7
Tc medio (Recomendado de fórmulas) (min)	57.1	64.0	44.0	42.3	38.9	206.7
TIEMPOS MEDIDOS EN CAMPO						
Tc medido y corregido (min)	108.6	133.2	44.5	61.6	44.2	268.7

Fuente: Elaboración propia.

8.3.1 Quebrada Aguas Claras

Para esta corriente se trabajó con nueve ecuaciones empíricas que se adaptaban a las condiciones de la corriente. Los resultados (Tabla 8.2) muestran, de cada fórmula empírica, que se obtuvieron tiempos de concentración que se localizaran dentro del intervalo de confianza. Sin embargo, los que más se acercaron fueron por las ecuaciones de: Bransby –Williams, Témez y D.N.C.

La descripción y detalles generales de la microcuenca se presentan en el Anexo B.

Los criterios que se establecieron para algunas de las fórmulas empíricas utilizadas fueron:

Cuando el T_c se utilice en la fórmula Racional se recomienda un valor de coeficiente de escorrentía “C” = 0.66, según su cobertura vegetal.

Ecuación de Retardo del S.C.S.: La topografía de la zona es de tipo montañosa, ajustándose mejor para el cálculo de T_c por esta ecuación. Además, la ecuación se aconseja para cuencas con áreas menores a 800 Ha, como en este caso, aunque se recomienda más específicamente para áreas mixtas (rural - urbana).

8.3.2 Quebrada Arrayanales

Esta corriente es la más larga y con mayor radio hidráulico de las estudiadas. A lo largo del cauce se aprecian zonas despejadas utilizadas para la pesca. La cuenca es una de las que poseen mayor cobertura vegetal de tipo natural, especialmente a lo largo de su cauce. También existen zonas grandes utilizadas para pastos y ganado y una menor parte para cultivos.

La descripción y detalles generales de la microcuenca se presentan en el Anexo C.

La pendiente longitudinal del cauce principal es de las más pequeñas por lo que el T_c es de los más altos. Para la estimación del T_c se utilizaron las 14 fórmulas empíricas que mejor se ajustaron a las condiciones de la corriente. Se obtuvieron valores alejados al valor del T_c medido en campo. Las fórmulas que más se acercaron fueron: Bransby – Williams, Témez y D.N.C.

8.3.3 Quebrada Carnicería

Las condiciones de cobertura vegetal para esta microcuenca abarcan vegetación de bosque a lo largo del cauce (Anexo D), rodeada de pastos para ganadería y cultivos. La altitud media es la menor de las microcuencas estudiadas. El perfil de la corriente muestra caídas bruscas en altitud en algunos lugares del cauce (Anexo D).

En esta corriente se utilizaron nueve ecuaciones empíricas, que fueron las que mejor se ajustaron para el análisis. Las fórmulas que presentaron valores dentro del intervalo de confianza del $\pm 10\%$ del T_c real de campo corregido fueron: Témez y D.N.C. El T_c que más se acercó al T_c medio fue el del Cuerpo de Ingenieros de los EEUU.

8.3.4 Quebrada El Vado

La cuenca presenta una gran parte en pastos para ganadería y su cauce es objetivo también de aprovechamiento para riego de cultivos por medio de canales artificiales, contando también que es otra de las corrientes altamente aprovechada para realizar pesca.

La pendiente del cauce principal es la más pronunciada de todas las corrientes analizadas, por lo que el valor del Tc tiende a ser menor aunque su cauce sea largo.

Se emplearon nueve de las ecuaciones que mejor se adaptaron a las condiciones de la cuenca. En esta quebrada el único valor de Tc que se encontró dentro el intervalo de confianza de $\pm 10\%$ del Tc medido y corregido fue el de la ecuación de Pilgrim y McDermott, aunque también estuvieron cerca los valores de las fórmulas: Bransby – Williams, Témez y D.N.C. que tuvieron el mismo Tc = 60.6 min.

La descripción y detalles generales de la microcuenca se presentan en el Anexo E.

8.3.5 Quebrada Pichagua

Esta microcuenca está cubierta en gran parte por bosques y muestra un alto aprovechamiento para la pesca y grandes extensiones de pastos para ganadería.

Para la quebrada Pichagua se utilizaron las nueve ecuaciones que mejor se ajustaron a las condiciones de la microcuenca. Dentro del intervalo de confianza de $\pm 10\%$ del valor del Tc medido y corregido se encontraron las ecuaciones de Témez, D.N.C. y Bransby – Williams. Aunque también estuvieron cerca los tiempos de concentración determinados con las fórmulas de Pilgrim y McDermott y el Cuerpo de Ingenieros de EEUU.

Las principales características de la microcuenca se muestran en el Anexo F.

8.3.6 Río Las Piedras desde nacimiento hasta Estación limnimétrica Puente Carretera

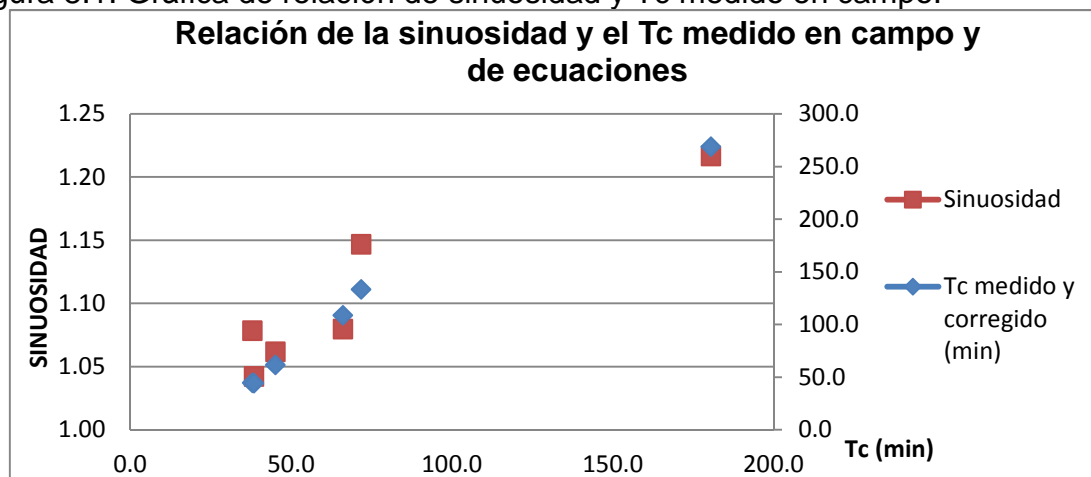
La subcuenca del río Las Piedras cuenta con una distribución muy diversa de cobertura vegetal, como se mostró en la Tabla 7.1.

Para realizar el análisis a este río, se utilizaron 13 fórmulas que resultaron las que más se adaptaron a las condiciones de la subcuenca. Se evidenció que dentro del intervalo de confianza de $\pm 10\%$ del Tc medido y corregido, se encontraron los valores del tiempo de concentración determinado con las ecuaciones de Ventura, Témez y D.N.C. Siendo la ecuación de Ventura la más cercana al valor del Tc medido y corregido.

8.3.7 Análisis general

Los resultados generales evidencian que la diferencia entre los tiempos medidos con las pelotas de ping pong con respecto al valor obtenido con las fórmulas difiere en algunos casos hasta en más del 100%. Los resultados obtenidos con el método de las pelotas de ping – pong muestran que éstos se acercan más a los de las fórmulas empíricas cuando la pendiente del cauce principal es baja. El tiempo de concentración es menor a menor sinuosidad (Lreal/Lteórica). De los resultados se aprecia que en las corrientes con menor sinuosidad los tiempos de concentración son menores y éstos se acercan más a los de las ecuaciones empíricas.

Figura 8.1. Gráfica de relación de sinuosidad y Tc medido en campo.



Fuente: Elaboración propia.

La fórmula de Ventura se aconseja para pendientes bajas. Para este estudio se aplicó al río Las Piedras y en caso de necesitar utilizarse una fórmula para determinar el tiempo de concentración para río de montaña con pendiente del cauce principal bajas ésta se recomendaría.

Las metodologías cuyos tiempos de concentración estuvieron más próximas a los resultados de campo fueron la de Témez, D.N.C. y Bransby – Williams para corrientes de montaña con pendientes del cauce principal relativamente bajas.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Existe una diferencia notable entre los tiempos de concentración medidos directamente en campo y los determinados por medio de fórmulas empíricas. Los medidos en campo son mayores, en términos generales.
- Para los ríos de montaña con pendiente del cauce principal alta, el método que más se acercó a los tiempos de concentración medidos en campo y que se aconseja emplear fue el de Témez, aunque también se recomienda usar las fórmulas empíricas de D.N.C. y Bransby – Williams.
- Para las cuencas hidrográficas de montaña con corrientes principales que tengan pendientes longitudinales bajas, se recomienda el empleo de la fórmula de Ventura.
- Se recomienda hacer una investigación para determinar con exactitud el coeficiente de corrección por sinuosidad en los ríos de montaña.
- Se recomienda repetir el estudio de la presente investigación para muchos otros ríos de montaña a fin de ir estimando el tiempo de concentración real bajo las condiciones de las regiones estudiadas.

10 BIBLIOGRAFÍA

- AMANCIO P. R. 2007. Efectos de Escala sobre la Simulación del Flujo de Agua Superficial en Áreas Urbanas Usando Modelos Basados en la Onda Cinemática. Tesis doctoral. Córdoba. Universidad Nacional de Córdoba.
- CLARK, C.O. 1945. Storage and the Unit Hydrograph. Proc. Amer. Soc. Eng. Vol 69. P13331360.
- DE ALMEIDA I. K.; ALMEIDA A. K.; ANACHE J. A. and STEFFEN J. L. 2014. Estimation on Time of Concentration of Overland Flow in Watersheds. Geociências. UNESP. São Paulo.
- HUDSON N. 1982. Conservación de suelos. Editorial Reverté. Madrid.
- IBÁÑEZ A. S.; MORENO R. H. y GISBERT B. J. M. 2004. Métodos para la determinación del Tc de una cuenca hidrográfica. Producción vegetal. Escuela técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Valencia.
- LAVAO P. S. y CORREDOR R. J. 2014. Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. Caso de estudio: cuenca del río Murcia, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica. Trabajo investigativo. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá.
- LÓPEZ F. y MAVISOY C. 2016. Metodologías para la determinación de caudales máximos en cuencas hidrográficas con y sin registros de caudal. Universidad del Cauca. Popayán.
- STRAUB T. D.; MELCHING C. S. and KOCHER K. E. 2000. Equations for Estimating Clark Unit - Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. U.S. Department of interior. U.S. Geological Survey. Urbana Illinois.
- TÉMEZ, J.R. 2003. Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de caudales máximos. Rev. Obras Púb. N°3.430, 4751.
- THOMPSON D.B. 2006. The Rational Method. Civil Engineering Dept. Texas Tech University.
- VÉLEZ U. J.J. y BOTERO G. A. 2010. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis. Manizales.

- VIESSMAN Jr. W. and LEWIS G. L. 1995. Introduction to hydrology, Fourth edition, Harper Collins, pag. 311.
- VILLÓN B. M. 2002. Cálculos hidrológicos e hidráulicos en cuencas hidrográficas. Curso de especialización en Gestión de Cuencas Hidrográficas. CATIE. Costa Rica.

11 ANEXOS

ANEXO A. RÍO LAS PIEDRAS

- **Cartera de campo**

Tabla A1. Cartera de campo río Las Piedras.

PUNTO DE REFERENCIA	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Trecorrido (seg)
NACIMIENTO A PUNTO 1	560	2640	1070
		2587	
PUNTO 1 A PUNTO 2	548	2587	1043
		2549	
PUNTO 2 A PUNTO 3	570	2549	1120
		2506	
PUNTO 3 A PUNTO 4	620	2506	1185
		2487	
PUNTO 4 A PUNTO 5	698	2487	1333
		2433	
PUNTO 5 A DESEMBOCADURA 1	490	2433	891
		2416	
DESEMBOCADURA 1 A PUNTO 6	650	2416	1242
		2397	
PUNTO 6 A DESEMBOCADURA 2	582	2397	1114
		2370	
DESEMBOCADURA 2 A PUNTO 7	730	2370	1398
		2346	
PUNTO 7 A PUNTO 8	680	2346	1298
		2301	
PUNTO 8 A PUNTO 9	590	2301	1127
		2295	
PUNTO 9 A DESEMBOCADURA 3	260	2295	325
		2289	
DESEMBOCADURA 3 A PUNTO 10	670	2289	1283
		2235	
PUNTO 10 A DESEMBOCADURA 4	985	2235	1883
		2203	
DESEMBOCADURA 4 A PUNTO 11	870	2203	1664
		2191	
PUNTO 11 A DESEMBOCADURA 5	1046	2191	2001
		2168	
DESEMBOCADURA 5 A PUNTO 12	940	2168	1797
		2136	
PUNTO 12 A PUNTO 13	960	2136	1835
		2108	
PUNTO 13 A PUNTO 14	971	2108	1867
		2092	
PUNTO 14 A PUNTO 15	930	2092	1789
		2057	
PUNTO 15 A PUNTO 16	1200	2057	2347
		2018	
PUNTO 16 A PUNTO 17	970	2018	1937
		2000	
PUENTE DE CARRETERA	16520	2000	31549

Fuente: Elaboración propia.

- **Registro fotográfico**

Figura A1. Referenciación de altura en un determinado lugar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura A2. Desembocadura de la quebrada Arrayanales al río Las Piedras.



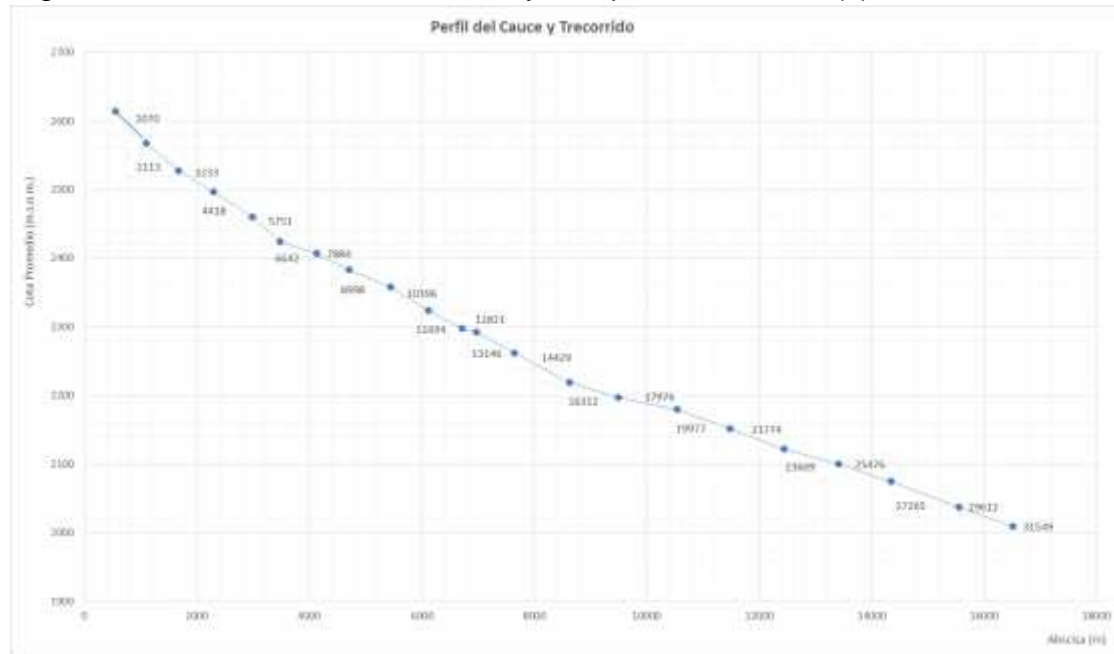
Fuente: Elaboración propia.

Figura A3. Cauce del río Las Piedras.



Fuente: Elaboración propia.

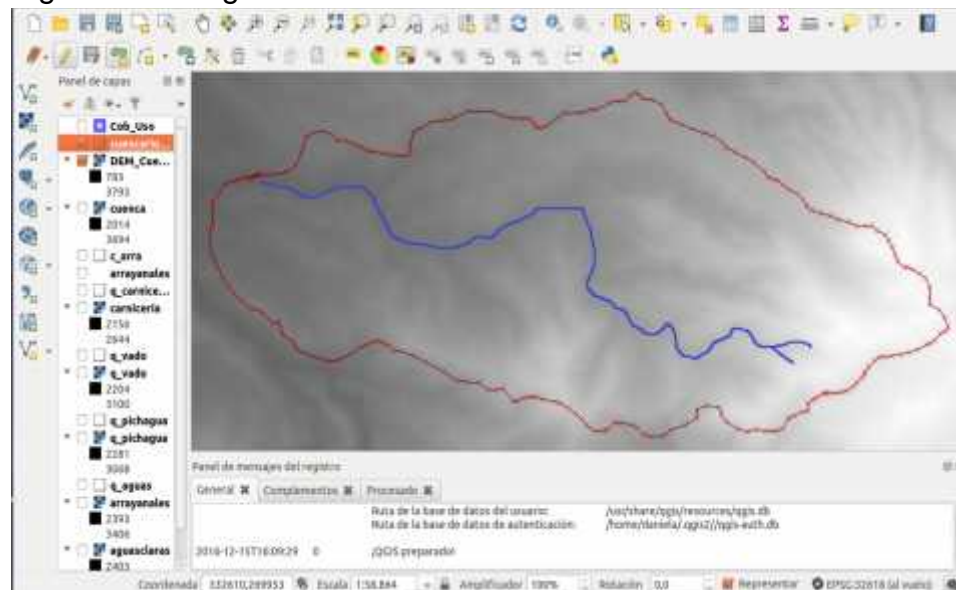
Figura A4. Perfil del río Las Piedras y tiempo de recorrido (s).



Fuente: Elaboración propia.

- **Modelo Digital de Elevación (MED) de QGIS**

Figura A5. Longitud del cauce del río Las Piedras.



Fuente: Elaboración propia.

- **Coeficiente de escorrentía promedio (C) para la subcuenca Las Piedras desde la estación limnimétrica Puente Carretera**

Si el tiempo de concentración se va a aplicar para determinar el caudal máximo en cuencas hidrográficas, se debe emplear el método Racional o americano. Para el método Racional se necesita el coeficiente de escorrentía "C". Por lo anterior, para este coeficiente se tomó como valor de referencia el valor adoptado por López y Mavisoy (2016) y después de realizarle algunas modificaciones propias, por el cambio en el tamaño del área, se obtuvo un valor de $C = 0.68$, como promedio para toda la cuenca aferente del río Las Piedras desde la estación limnimétrica "Puente Carretera" y hacia aguas arriba.

ANEXO B. QUEBRADA AGUAS CLARAS

- **Cartera de campo**

Tabla B.1. Cartera de campo quebrada Aguas Claras.

PUNTO DE REFERENCIA	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Trecorrido (seg)
NACIMIENTO A PUNTO 1	190	3210	515
		3150	
PUNTO 1 A BOCATOMA 1	234	3150	651
		3108	
BOCATOMA 1 A PUNTO 2	356	3108	985
		3048	
PUNTO 2 A PUNTO 3	460	3048	1264
		2987	
PUNTO 3 A PUNTO 4	390	2987	1082
		2916	
PUNTO 4 A BOCATOMA 2	487	2916	1348
		2874	
BOCATOMA 2 A PUNTO 5	560	2874	1551
		2801	
PUNTO 5 A PUNTO 6	480	2801	1328
		2766	
PUNTO 6 A PUNTO 7	320	2766	875
		2692	
PUNTO 7 A BOCATOMA 3	318	2692	861
		2617	
BOCATOMA 3 A PUNTO 8	290	2617	796
		2585	
PUNTO 8 A PUNTO 9	340	2585	930
		2529	
PUNTO 9 A BOCATOMA 4	98	2529	288
		2500	
BOCATOMA 4 A PUNTO 10	92	2500	280
		2483	
DESEMBOCADURA	4615	2483	12754

Fuente: Elaboración propia.

- **Registro fotográfico**

Figura B.1. Cauce de la quebrada Aguas Claras.



Fuente: Elaboración propia.

Figura B.2. Medición de tiempos de recorrido.



Fuente: Elaboración propia.

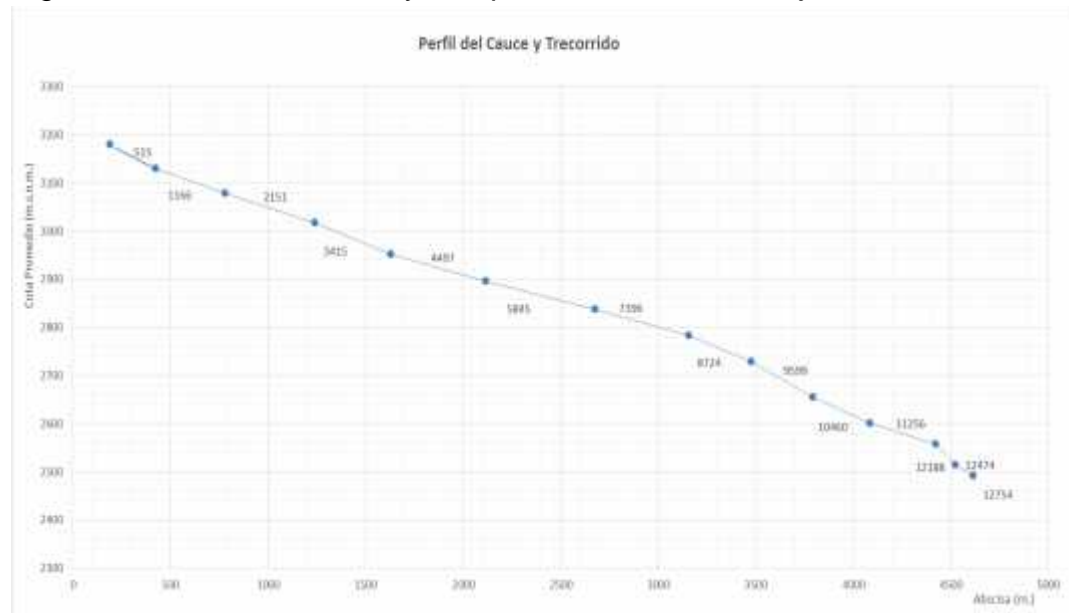
Figura B.3. Mediciones en el cauce.



Fuente: Elaboración propia.

- **Perfil – Tiempo de recorrido del flujo**

Figura B.4. Perfil del cauce y tiempo de recorrido del flujo.



Fuente: Elaboración propia.

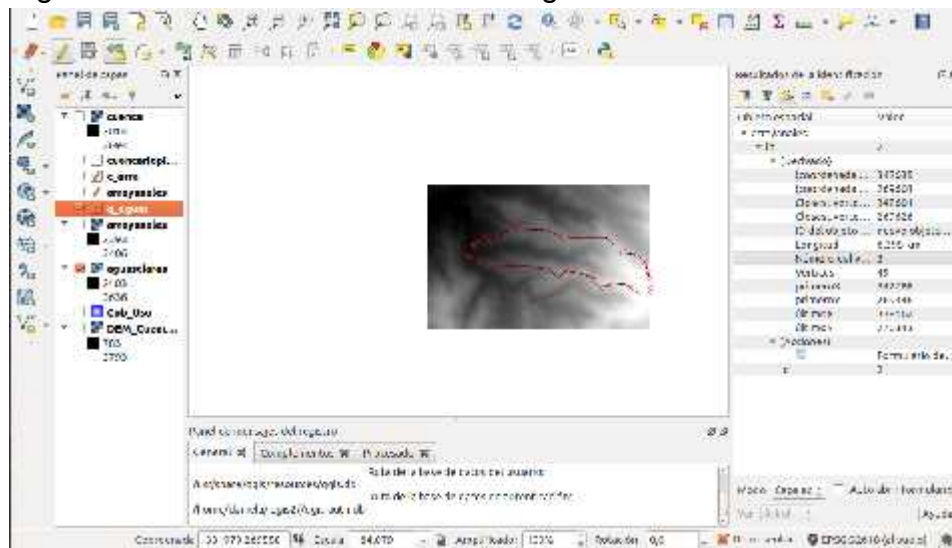
- **Modelo Digital de Elevación de QGIS**

Figura B.5. MED de la microcuenca Aguas Claras.



Fuente: Elaboración propia.

Figura B.6. Área de la microcuenca Aguas Claras.



Fuente: Elaboración propia.

- **Coefficiente de escorrentía promedio microcuenca Aguas Claras**

Teniendo en cuenta que la cobertura vegetal en esta zona está, se tomó como valor del Coeficiente de Escorrentía $C = 0.66$.

Figura B.7. Cobertura vegetal de la microcuenca Aguas Claras en la parte alta.



Fuente: POMCH (2006).

ANEXO C. QUEBRADA ARRAYANALES

- **Cartera de campo**

Tabla C.1. Cartera de campo para la quebrada Arrayanales.

PUNTO DE REFERENCIA	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Trecorrido (seg)
NACIMIENTO A PUNTO 1	220	2997	618
		2959	
PUNTO 1 A CASCADA 1	350	2959	956
		2915	
CASCADA 1 A PUNTO 2	297	2915	829
		2884	
PUNTO 2 A PUNTO 3	418	2884	1176
		2846	
PUNTO 3 A PUNTO 4	370	2846	1040
		2817	
PUNTO 4 A PUNTO 5	430	2817	1211
		2754	
PUNTO 5 A DESMBOCADURA	367	2754	1031
		2702	
DESEMBOCADURA A PUNTO 6	560	2702	1583
		2649	
PUNTO 6 A PUNTO 7	545	2649	1538
		2603	
PUNTO 7 A PUNTO 8	620	2603	1756
		2548	
PUNTO 8 A PUNTO 9	540	2548	1522
		2491	
PUNTO 9 A PUNTO 10	358	2491	997
		2417	
PUNTO 10 A PUNTO 11	186	2417	519
		2398	
PUNTO 11 A PUNTO 12	305	2398	856
		2370	
DESEMBOCADURA	5566	2370	15632

Fuente: Elaboración propia.

- **Registro fotográfico**

Figura C.1. Cauce de la quebrada Arrayanales.



Fuente: Elaboración propia.

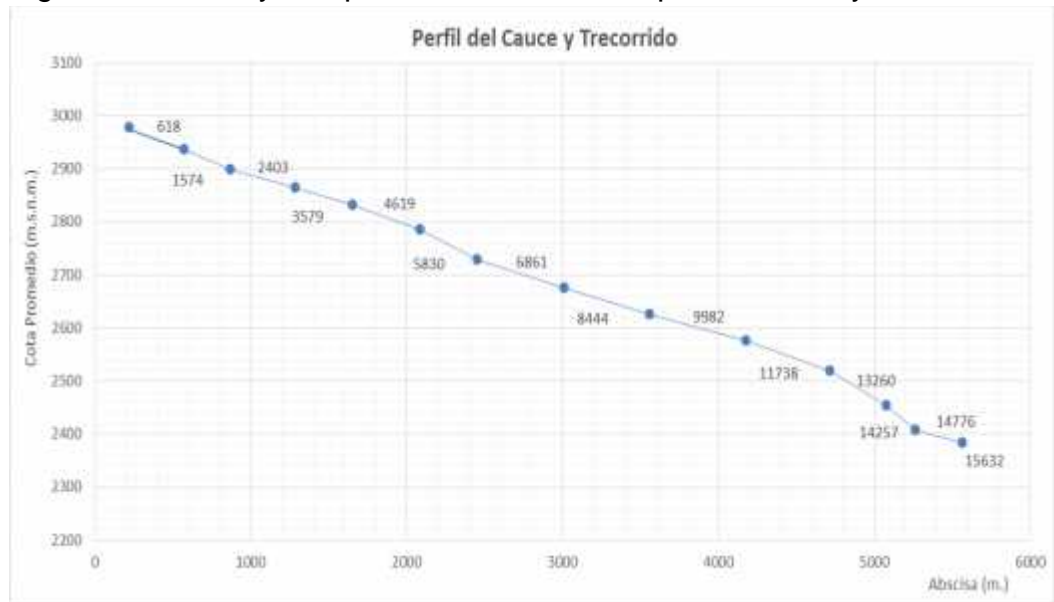
Figura C.2. Medición del tiempo de recorrido en la quebrada Arrayanales.



Fuente: Elaboración propia.

- **Perfil – Tiempo de recorrido del flujo**

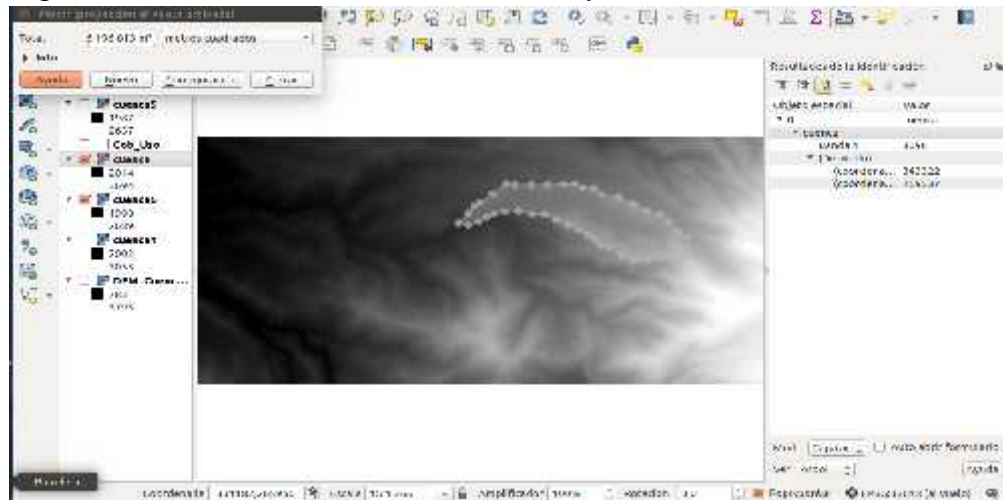
Figura C.3. Perfil y tiempo de recorrido de la quebrada Arrayanales.



Fuente: Elaboración propia.

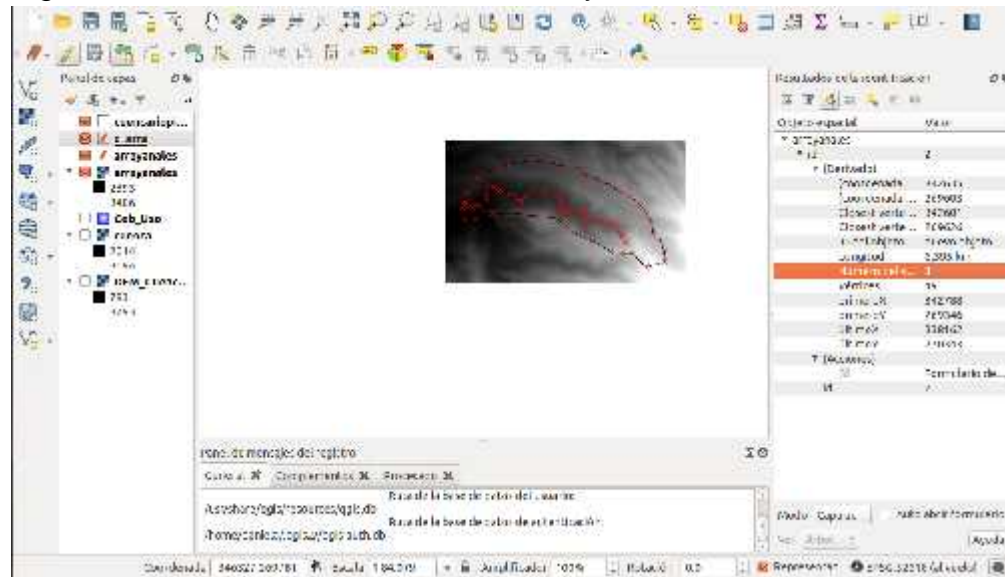
- **Model Digital de Elevación de QGIS**

Figura C.4. MED de la microcuenca Arrayanales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura C.5. Área de la microcuenca Arrayanales.



Fuente: Elaboración propia.

- **Coeficiente de escorrentía promedio para microcuenca Arrayanales**

Teniendo en cuenta las condiciones de la cobertura vegetal de la quebrada arrayanales, se determinó que el valor del coeficiente de escorrentía es $C = 0.65$.

Figura C.7. Parte alta de la microcuenca Arrayanales.



Fuente: POMCH (2006).

ANEXO D. QUEBRADA CARNICERÍA

- **Cartera de Campo**

Tabla D.1. Cartera de campo quebrada Carnicería.

PUNTO DE REFERENCIA	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Trecorrido (seg)
NACIMIENTO a PUNTO 1	222	2568	504
		2524	
PUNTO 1 a CASCADA 1	120	2524	270
		2503	
CASCADA 1 a PUNTO 2	460	2503	1025
		2469	
CASCADA 2 a PUNTO 2	370	2469	825
		2402	
PUNTO 2 a PUNTO 3	256	2402	571
		2384	
PUNTO 3 a CASCADA 3	360	2384	823
		2297	
CASCADA 3 a BOCATOMA	250	2297	578
		2249	
BOCATOMA a PUNTO 4	180	2249	345
		2202	
PUNTO 4 a PUNTO 5	122	2202	278
		2168	
DESEMBOCADURA	2340	2168	5219

Fuente: Elaboración propia.

- **Registro fotográfico**

Figura D.1. Caída en el cauce de la quebrada Carnicería.



Fuente: Elaboración propia.

Figura D.2. Mediciones en el cauce.



Fuente: Elaboración propia.

Figura D.3. Mediciones del tiempo de recorrido.



Fuente: Elaboración propia.

- **Perfil – Tiempo de recorrido**

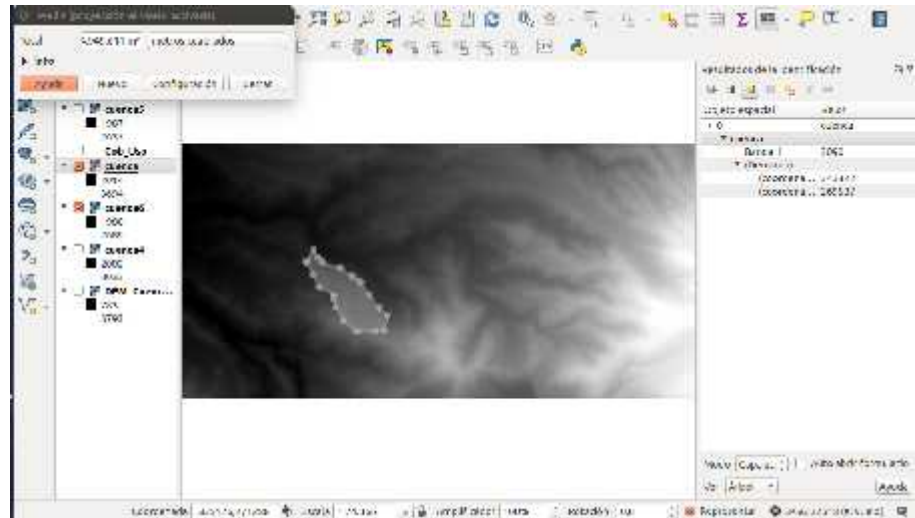
Figura D.4. Perfil del cauce y tiempo de recorrido para Carnicería.



Fuente: Elaboración propia.

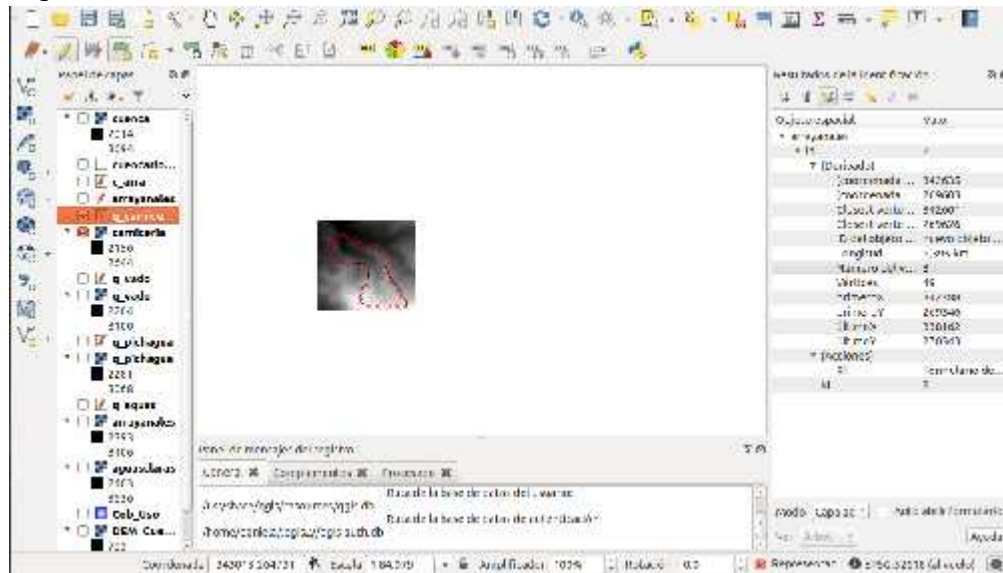
- **Modelo Digital de Elevación de QGIS**

Figura D.5. MED de la microcuenca Carnicería.



Fuente: Elaboración propia.

Figura D.6. Área de la microcuenca Carnicería.



Fuente: Elaboración propia.

- **Coefficiente de escorrentía promedio quebrada Carnicería**

Teniendo en cuenta la cobertura vegetal de la microcuenca se optó por tomar un valor que en general es el más bajo de todas las microcuencas de análisis, ya que es la zona más seca y con menor porcentaje de vegetación natural. El valor del coeficiente de escorrentía $C = 0.63$.

Figura D.7. Cobertura vegetal de la microcuenca Carnicería.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO E QUEBRADA EL VADO

- **Cartera de Campo**

Tabla E.1. Cartera de Campo quebrada El Vado.

PUNTO DE REFERENCIA	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Trecorrido (seg)
NACIMIENTO a PUNTO 1	135	2917	198
		2889	
CASCADA 1 a PUNTO 2	230	2889	388
		2823	
PUNTO 2 a PUNTO 3	310	2823	521
		2791	
PUNTO 3 a PUNTO 4	287	2791	432
		2726	
PUNTO 4 a PUNTO 5	345	2726	653
		2657	
PUNTO 5 a CASCADA 2	418	2657	879
		2599	
CASCADA 2 a PUNTO 6	370	2599	620
		2502	
PUNTO 6 a PUNTO 7	340	2502	576
		2467	
PUNTO 7 a PUNTO 8	270	2467	417
		2394	
PUNTO 8 a PUNTO 9	350	2394	378
		2306	
PUNTO 9 a PUNTO 10	300	2306	157
		2204	
DESEMBOCADURA	3355	2204	5219

Fuente: Elaboración propia.

- **Registro fotográfico**

Figura E.1. Medición de los tiempos de recorrido.



Fuente: Elaboración propia.

Figura E.2. Cauce de la corriente.



Fuente: Elaboración Propia.

- **Perfil – Tiempo de recorrido**

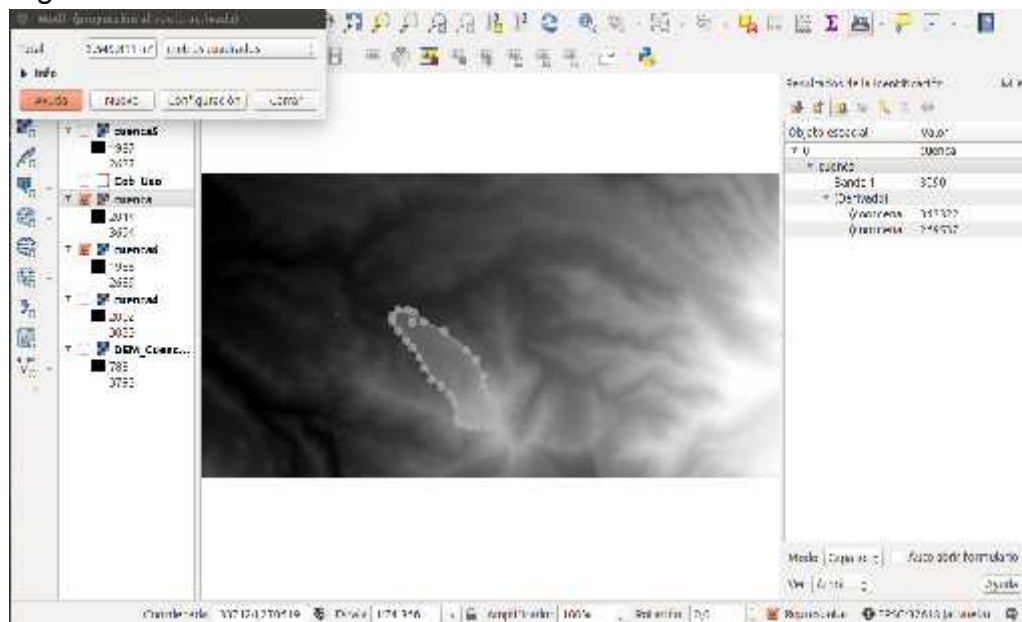
Figura E.2. Perfil del cauce y tiempo de recorrido quebrada El Vado.



Fuente: Elaboración propia.

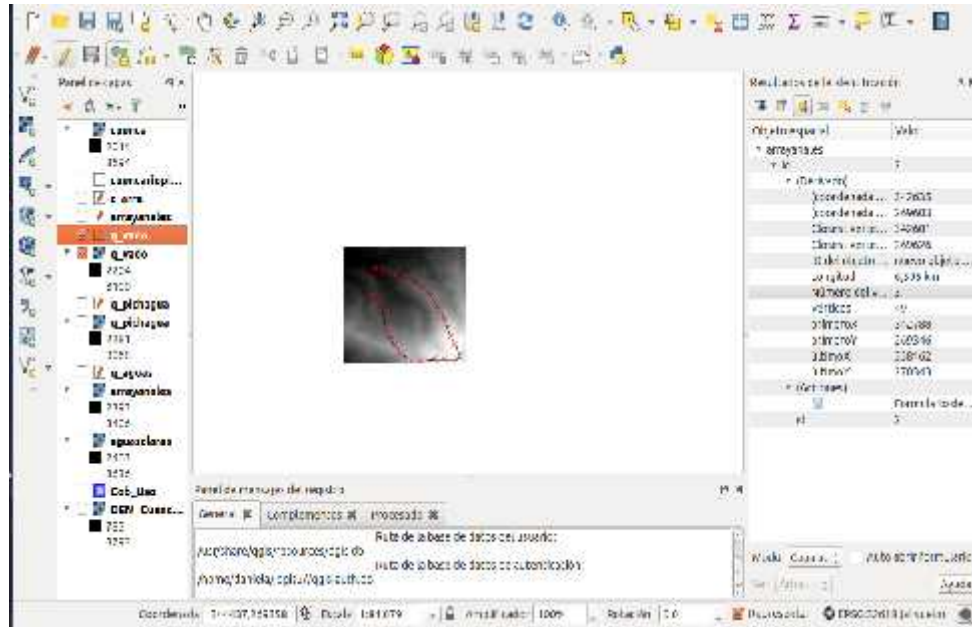
- **Modelo Digital de Elevación de QGIS**

Figura E.3. MED de la microcuenca El Vado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura E.4. Área de microcuenca El Vado.



Fuente: Elaboración propia.

- **Coefficiente de escorrentía promedio de la microcuenca El Vado**

Teniendo en cuenta la cobertura vegetal de la microcuenca, la cual es la segunda con menor cobertura vegetal natural, el valor adoptado de coeficiente de escorrentía es $C = 0.64$.

Figura E.6. Cobertura vegetal de la microcuenca El Vado.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO F. QUEBRADA PICHAGUA

- **Cartera de Campo**

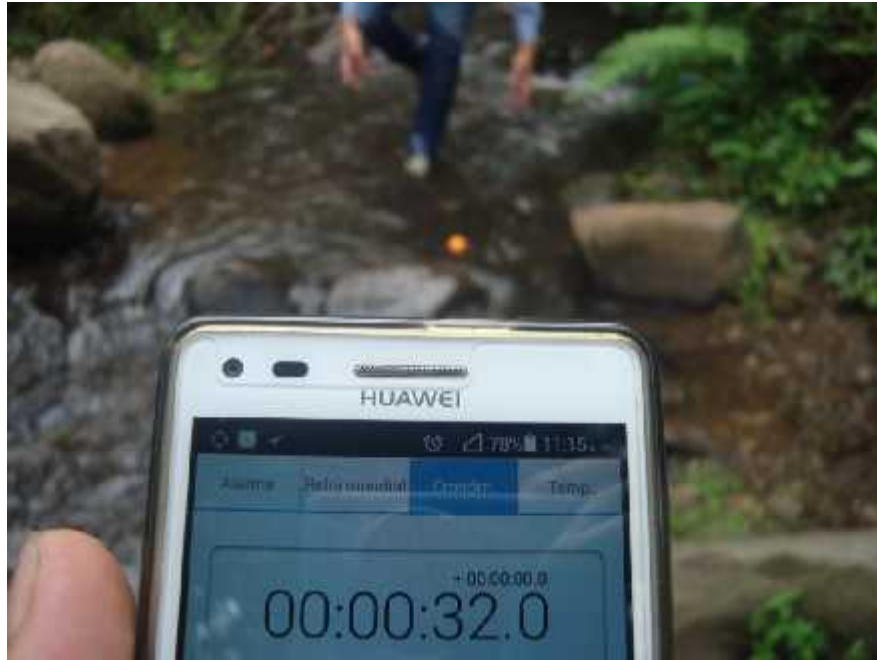
Tabla F.1. Cartera de campo quebrada Pichagua.

PUNTO DE REFERENCIA	Longitud (m)	Altitud (m.s.n.m.)	Trecorrido (Sg)
NACIMIENTO a PUNTO 1	298	2819	538
		2784	
PUNTO 1 A CASCADA 1	270	2784	503
		2691	
CASCADA 1 A PUNTO 2	350	2691	715
		2603	
PUNTO 2 A CASCADA 2	433	2603	787
		2587	
CASCADA 2 A PUNTO 3	410	2587	732
		2496	
PUNTO 3 A PUNTO 4	280	2496	584
		2429	
PUNTO 4 A CASCADA 3	236	2429	519
		2394	
CASCADA 3 A PUNTO 5	140	2394	315
		2302	
PUNTO 5 A PUNTO 6	90	2302	247
		2295	
PUNTO 6 A PUNTO 7	83	2295	250
		2289	
DESEMBOCADURA	2590	2289	5190

Fuente: Elaboración propia.

- **Registro fotográfico**

Figura F.1. Mediciones de los tiempos de recorrido en el cauce de la quebrada Pichagua.



Fuente: Elaboración propia.

Figura F.2. Mediciones sobre el cauce de la quebrada Pichagua.



Fuente: Elaboración propia.

- **Perfil – Tiempo de recorrido**

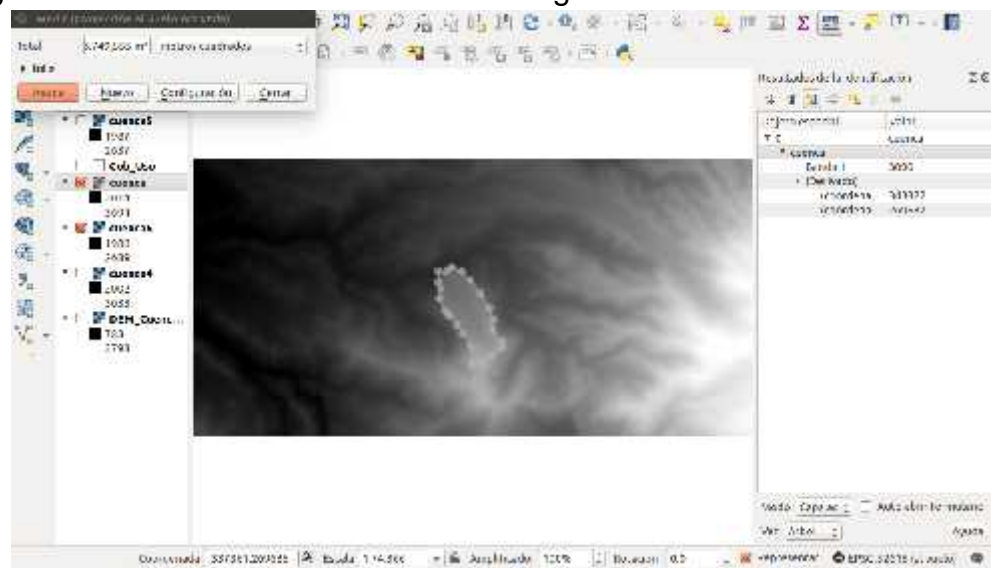
Figura F.3. Perfil del cauce y tiempo de recorrido de la quebrada Pichagua.



Fuente: Elaboración propia.

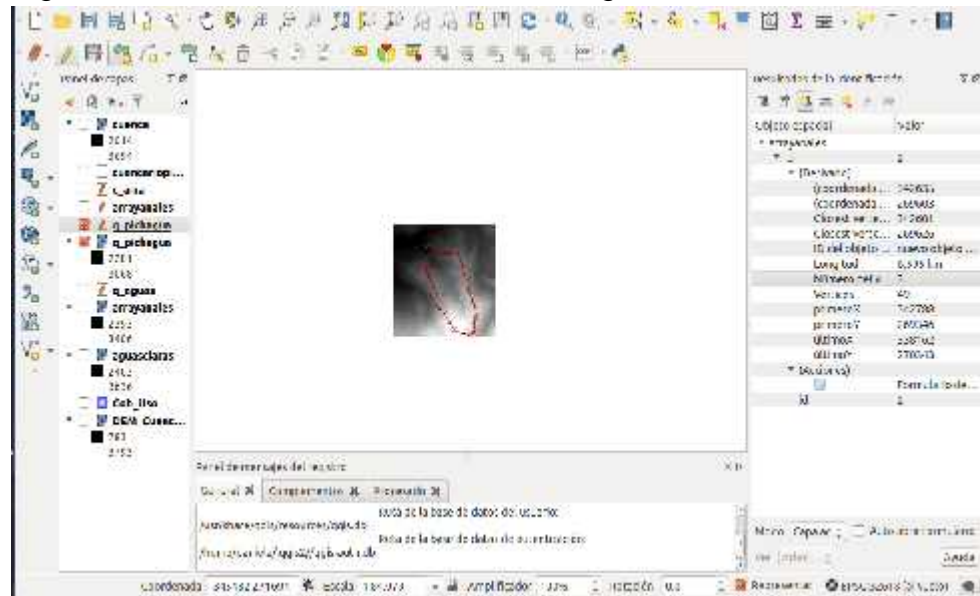
- **Modelo Digital de Elevación de QGIS**

Figura F.4. MED de la microcuenca Pichagua.



Fuente: Elaboración propia.

Figura F.5. Área de la microcuenca Pichagua.



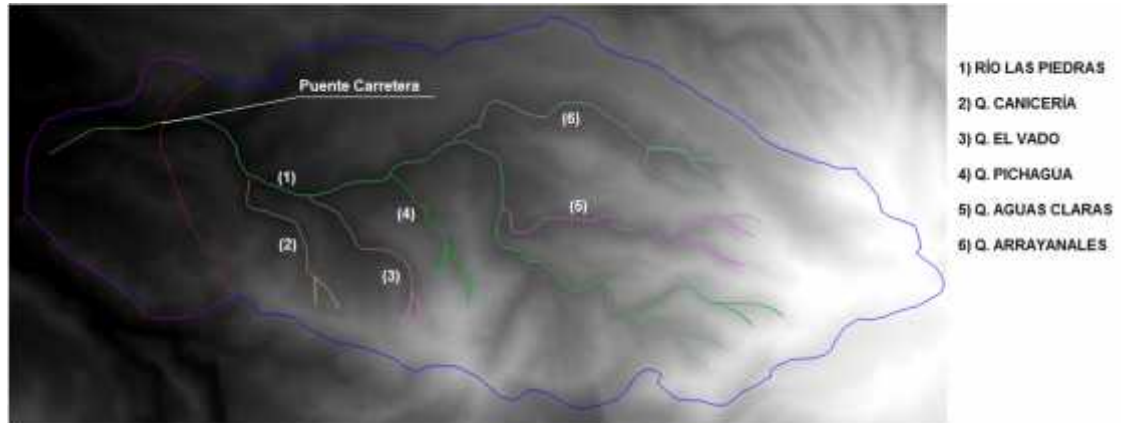
Fuente: Elaboración propia.

- **Coefficiente de escorrentía promedio de la microcuenca Pichagua**

Teniendo en cuenta la cobertura vegetal de la microcuenca se optó por tomar un valor de coeficiente de escorrentía $C = 0.65$.

ANEXO G. GENERAL

Figura G.1. MED de la subcuenca del río Las Piedras y las microcuencas estudiadas.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla G.1. Coeficientes para el método del flotador.

R = (A / P)	Pared de pedrusco	Tierra
0.1	0.748	0.565
0.2	0.792	0.645
0.3	0.812	0.685
0.4	0.822	0.712
0.5	0.83	0.73
0.6	0.835	0.745
0.7	0.837	0.755
0.8	0.839	0.763
0.9	0.842	0.771
1.0	0.844	0.778
1.2	0.847	0.786
1.4	0.85	0.794

Fuente: Gallardo (2000).

- Ecuación de cálculo del tiempo medido y corregido: (T_{mc})

$$C = 0.73, \quad v_p = \frac{T_m}{d} \quad v_{lc} = \frac{0.7 C}{d} \quad T_{G.1}$$

• Tabla G.2. Parámetros morfométricos de la subcuenca del río Las Piedras.

PARÁMETRO	ECUACIÓN O FUENTE	VARIABLES	VALOR
ÁREA	ARCVIEW 3.2	A: Área de la cuenca (Km ²)	66.27
PERÍMETRO	ARCVIEW 3.2	P: Perímetro de la cuenca (Km)	40.02
LONGITUD AXIAL	ARCVIEW 3.2	L: Longitud axial de la cuenca (Km)	15.97
LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL	ARCVIEW 3.2	L: Longitud del cauce ppal (Km)	18.95
AREAS ENTRE CURVAS DE NIVEL	ARCVIEW 3.2	VER CURVA HIPSOMETRICA	
LONGITUD DE LA RED DE DRENAJE	ARCVIEW 3.2	Ld: Longitud de la red de drenaje (Km)	250.84
COTA MAYOR DE LA CUENCA	CARTOGRAFIA IGAC	Cota en msnm	3750
COTA MENOR DE LA CUENCA	CARTOGRAFIA IGAC	Cota en msnm	1900
COTA MAYOR DEL CAUCE PRINCIPAL	CARTOGRAFIA IGAC	Cota en msnm	2200
COTA MENOR DEL CAUCE PRINCIPAL	CARTOGRAFIA IGAC	Cota en msnm	1800
MAXIMO ANCHO EN LINEA RECTA	ARCVIEW 3.2	Ancho Maximo en (Km)	6.55
LONGITUD DEL CAUCE PPAL ENTRE CURVAS	ARCVIEW 3.2	Lc: Longitud del Cauce Ppal en (Km)	
NUMERO DE CAUCES DE ORDEN 1	ARCVIEW 3.2	n: numero de cauces	416
LONGITUD DEL LOS TRIBUTARIOS	ARCVIEW 3.2	Lt: Longitud de los Tributarios (Km)	231.9
ANCHO PROMEDIO	ARCVIEW 3.2	Ap: Ancho Promedio (Km)	4.34
ANCHO PROMEDIO		B: Ancho promedio (Km)	4.15
	$B = \frac{A}{L}$	A: Área de la cuenca (Km ²) L: Longitud axial de la cuenca (Km)	
FACTOR DE FORMA		Kf: Factor de forma	0.27
	$Kf = \frac{B}{L}$	B: Ancho promedio (Km) L: Longitud axial de la cuenca (Km)	
COEFICIENTE DE COMPACIDAD		Kc: Coeficiente de capacidad	1.38
	$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P: Perímetro de la cuenca (Km) A: Área de la cuenca (Km ²)	
ÍNDICE DE ALARGAMIENTO		la: Índice de alargamiento	2.44
	$la = \frac{L}{Am}$	L: Longitud axial de la cuenca (Km) Am: Ancho máximo perpendicular a la longitud Axial (Km)	
ELEVACIÓN MEDIA		Em: Elevación media (m)	2624
	$Em = \frac{\sum(Ai * ei)}{A}$	Ai: Área entre curvas de nivel (Km ²) ei: Elevación promedia entre dos curvas de nivel consecutivas (msnm) A: Área de la cuenca (Km ²)	
COEFICIENTE DE MASIVIDAD		Km: Coeficiente de masividad	39.60
	$Km = \frac{Em}{A}$	Em: Elevación media (m.s.n.m) A: Área de la cuenca (Km ²)	
PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (ALVORD)		Sm: Pendiente media de la cuenca	0.35
	$Sm = \frac{D * L}{A}$	D: Desnivel entre curvas L: Suma de longitudes de curvas (Km) A: Área de la cuenca (Km ²)	
PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL (TAYLOR - SCHWARZ)		S: Pendiente del cauce (%)	0.33
	$s = \left[\frac{n}{\left(\frac{1}{\sqrt{s1}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{\sqrt{sn}}\right)^2} \right]$	n: Número de tramos Sn: Pendiente de cada tramo (%)	
SINUOSIDAD		l: Longitud del cauce principal (Km)	1.10
	$sin = \frac{1}{ls}$	ls: Longitud del cauce trazado suave (Km)	
DENSIDAD DE DRENAJE		Dd: Densidad de Drenaje	3.785
	$Dd = \frac{Ld}{A}$	Ld: Longitud de la red de drenaje (Km) A: Área de la cuenca (Km ²)	
DENSIDAD HIDROGRAFICA		Dh: Densidad Hidrográfica	6.278
	$Dh = \frac{n}{A}$	n: Número de cauces A: Área de la cuenca (Km ²)	

Fuente: POMCH (2006).

- Tabla G.3. Sinuosidad de las corrientes estudiadas.

Corriente	Longitud real	Sinuosidad	Longitud de trazado recto
	(m)		(m)
CARNICERÍA	2340	1.08	2170
EL VADO	3354	1.06	3159
PICHAGUA	2590	1.04	2485
ARRAYANALES	5565	1.15	4853
AGUAS CLARAS	4614	1.08	4274
RÍO LAS PIEDRAS	16520	1.22	13578

Fuente: Elaboración propia.

- Carteras de campo en medio magnético.