

ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES

(ESTIMATION OF THE TIME OF CONCENTRATION AND THE LAG TIME AT SAN LUIS CREEK BASIN, MANIZALES)

JORGE JULIÁN VÉLEZ UPEGUI

Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Profesor Asociado jjvelezu@unal.edu.co

ADRIANA BOTERO GUTIÉRREZ

Ingeniera Civil. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales

Recibido para revisar febrero 17 de 2010, aceptado julio 28 de 2010, versión final diciembre 13 de 2010

RESUMEN: La cuenca de la quebrada San Luis es una pequeña cuenca experimental 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. Este trabajo pretende estimar 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 la ecuación empírica del tiempo de concentración que muestra un mejor ajuste a la observada en la cuenca experimental es el valor de la mediana de todas las ecuaciones, siendo las ecuaciones de Kirpich, Passini, California y Ventura-Heras las que muestran valores más conservadores para el diseño hidrológico, ya que muestran respuestas más rápidas a las observadas. En cuanto al tiempo de rezago, se observa una relación aproximada de 0.6 con respecto al tiempo de concentración medio estimado.

PALABRAS CLAVE: Hidrología urbana, tiempo de concentración, tiempo de rezago.

ABSTRACT: The San Luis creek basin is a small experimental watershed located in the urban area of the city of Manizales. It is a typical mountain basin of the Colombian Andes, which has been instrumented since few years ago. In the basin have been installed four pluviometric stations and one gauge station, where the approximate area at the outlet is 1,0 km². The temporal information is available at intervals of 5 minutes. This paper aims to estimate the time of concentration and the lag time of a small experimental basin, which is gauged and therefore can be extracted the time of concentration and the lag time from the recorded information in hydrographs and hietographs. These values are compared with estimated values using empirical equations available in the hydrological literature. The main conclusion emphasizes that the empirical equation of the time of concentration that shows a better fit is the median value of all empirical equations. The equations of Kirpich, Passini, California, SCS and Ventura-Heras are more conservative for hydrological design because show lower time values and therefore faster hydrological responses. In terms of lag time, there is an approximate ratio of 0,6 over the average estimated time of concentration.

KEYWORDS: Urban hydrology, time of concentration; lag time.

1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de concentración y de rezago son variables utilizadas extensivamente en el diseño hidrológico para determinar la capacidad hidráulica máxima de diferentes estructuras; se trata de variables que son propias para cada sitio y que dependen de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia. El tiempo de concentración también es conocido como el tiempo de respuesta o de equilibrio; la referencia [1] lo define como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe. Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe. Lo cual no siempre se corresponde con el fenómeno real, pues pueden existir lugares en la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al desagüe que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante ya que depende ligeramente de las características de la lluvia.

La hipótesis fundamental en el diseño hidrológico radica en la suposición de que la duración de la lluvia máxima o de diseño coincide con el tiempo de concentración de la cuenca, ya que lluvias con mayores duraciones no producen aumento en los caudales punta. Sin embargo, [2] establece una diferencia importante destacando que el tiempo de concentración es la fase del aguacero que determina el caudal máximo, y esta fase puede ser igual o no a la duración del aguacero, ya que la duración de la lluvia es ajena al tamaño de la cuenca y es sólo función de variables climáticas, por lo que la lluvia asociada a los caudales máximos se refiere al intervalo más intenso de duración igual al tiempo de concentración, pero esa duración no equivale a la duración del aguacero, ya que sólo una fase del aguacero puede ser suficiente para generar una crecida si el suelo se encuentra saturado.

Zuluaga, Valencia y Saldarriaga en 1981 según [3] obtienen una expresión para el tiempo de concentración en Antioquia y posteriormente la diferencian en regiones, siendo las regiones 2 y 6 las que más se asemejan a las condiciones de la zona andina tropical, pero se trata de un estudio con pocas estaciones que produce resultados muy locales. Debido a la falta de información en cuencas tropicales andinas, para el cálculo del tiempo de concentración usualmente se utilizan las relaciones empíricas basadas en información obtenida para cuencas instrumentadas en Europa y Estados Unidos de América que han sido estimadas por distintos autores [3-7], las cuales en ocasiones no son aplicables a las condiciones tropicales que se encuentran en las cuencas andinas, lo que hace que normalmente se estén sobreestimando o subvalorando estos valores [8]. La ciudad de Manizales, ubicada en el Departamento de Caldas, es pionera en la implementación de redes meteorológicas, entendidas éstas como los mecanismos de caracterización de fenómenos atmosféricos, reconocimiento obtenido gracias a la preocupación e interés que han mostrado tanto las entidades privadas como estatales para apoyar la ejecución de acciones orientadas a establecer, con base en registros, la manifestación y evolución de variables hidroclimatológicas a través del tiempo, contribuyendo de esta manera al fortalecimiento de los procesos de planeación local, así como también a una adecuada prevención de desastres [9-10].

La cuenca experimental de la quebrada San Luis ha sido instrumentada por la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y en la actualidad cuenta con información detallada de lluvia y caudal [11]. Por este motivo se plantea hacer uso de los datos disponibles en la cuenca experimental para realizar una primera aproximación que sirva de referente para las cuencas de montaña ubicadas en la zona andina colombiana.

Pocos estudios recientes se encuentran en la literatura relacionadas con este tema, entre ellos [12] quien realiza una comparación de la

estimación del tiempo de concentración en laderas y canales, estimando estos valores mediante la velocidad del flujo y la celeridad de la onda, ya que esta última es la recomendada según la teoría de la Onda Cinemática, mostrando que, para las laderas y los canales excepto el canal rectangular- el tiempo de concentración promedio es mayor si se calcula con la velocidad del flujo que con la celeridad. En conclusión, al estimar el tiempo de concentración mayor los caudales de diseño son menores con sus respectivas implicaciones en diseño de estructuras. En la referencia [13] realizan un estudio en laderas para examinar un modelo de onda cinemática unidimensional y su relación con el tiempo de concentración, para a su vez relacionarlo con variables de tipo ambiental. Su aplicación a pequeñas laderas muestra resultados muy satisfactorios para la estimación del lavado de polutos basándose en el tiempo de concentración. La referencia [7] realiza una recopilación minuciosa de las relaciones existentes entre los tiempos de respuesta hidrológica y las variables geomorfológicas para distintas regiones de Australia, mostrando la variabilidad presente en estas relaciones.

En términos generales, este trabajo pretende mostrar los resultados del análisis y procesamiento de la información de lluvia y caudal disponible en la cuenca experimental de la quebrada San Luis, con los cuales es posible estimar parámetros como el tiempo de concentración, tiempo de rezago, tiempo pico y tiempo base de eventos, que permitan comprender hidrológicamente la respuesta de las cuencas andinas tropicales. De esta manera, se presenta una nueva revisión con respecto a estos temas para la zona montañosa colombiana y, aunque los resultados obtenidos no son concluyentes, se propone una reflexión crítica sobre la estimación de los tiempos de concentración y tiempo de rezago para el diseño de obras hidráulicas en Colombia.

2. MARCO TEÓRICO

El área comprendida bajo un hidrograma simple, es decir con un solo pico, corresponde al

volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo determinado. El hidrograma producido por una tormenta conocida, se conoce como evento, en donde el tiempo base T_b es el tiempo transcurrido entre el momento en que empiezan a llegar las componentes de la escorrentía generadas por el aguacero y el momento en que éstas ya dejan de actuar. El tiempo de concentración T_c ha sido definido de diferentes maneras en la literatura; la más común lo designa como el tiempo en el cual la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de desagüe o salida, es decir el tiempo en el cual toda la cuenca contribuye al flujo. Dicho de otra forma, es el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida, cuando se tiene una lluvia uniforme que cubre toda la cuenca. Para cuencas muy grandes en donde no es posible cumplir la hipótesis de uniformidad en la lluvia, se considera al tiempo de concentración como el tiempo representativo del flujo en laderas más el tiempo de viaje en los cauces. Para su cálculo se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con otros parámetros propios de la cuenca. Para la estimación del tiempo de concentración usualmente se recomienda emplear el valor medio obtenido de varias ecuaciones empíricas disponibles en la literatura científica; se considera apropiado incluir al menos cinco estimaciones diferentes [3-7]. En la referencia [14] lo definen como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa, siendo este último valor el punto de inflexión del hidrograma después del caudal pico, punto C en la Figura 1, por lo que es posible estimarlo mediante la expresión:

$$T_{c-1} = T_b - d \quad \text{Ec. 1}$$

En donde T_{c-1} es el tiempo de concentración, T_b es el tiempo base del hidrograma de escorrentía y d es la duración de la precipitación efectiva o lluvia neta.

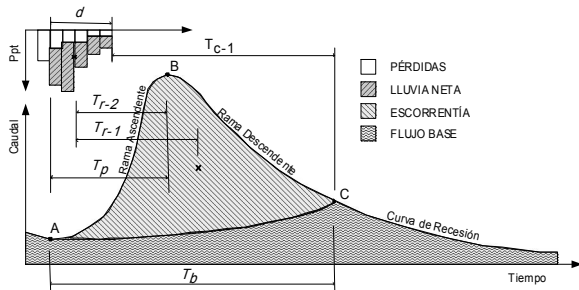


Figura 1. Tiempos característicos en un hidrograma que sirven para la estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago cuando se dispone de datos de lluvia y caudal

Figure 1. Characteristic times in a hydrograph used to estimate time of concentration and lag time when rain and flow data are available

En la referencia [3] mencionan que el tiempo de concentración se puede expresar en función del tiempo de rezago según la siguiente expresión:

$$T_{c-2} = T_b - T_{r-1} \quad \text{Ec. 2}$$

$$T_{c-3} = T_b - T_{r-2} \quad \text{Ec..3}$$

Siendo T_{r-1} el tiempo de rezago, que se define como el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y el centroide del hidrograma de escorrentía. También se encuentra en la literatura que el tiempo de rezago es el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y el caudal punta, T_{r-2} , por lo que se utilizarán estas dos definiciones en este estudio, tal como se aprecia en la Figura 1.

En este trabajo se explora la posibilidad de expresar el tiempo de concentración como el tiempo transcurrido entre el inicio de la lluvia efectiva y el caudal punta, T_p , considerando que se trata de cuencas pequeñas con fuerte presencia de aguaceros intensos que se distribuyen uniformemente en toda la cuenca:

$$T_{c-4} = T_p \quad \text{Ec..4}$$

Por lo tanto, por medio de estas cuatro ecuaciones es posible obtener el tiempo de concentración cuando se dispone de datos de lluvia y caudal.

Desde el punto de vista empírico, en la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas, desarrolladas por

diferentes autores para diferentes regiones del mundo. Se identifican dos grupos de ecuaciones, las que se emplean en diseño hidrológico y las de evento; estas últimas incluyen las variables relacionadas con la lluvia, que para el caso de eventos máximos se emplean lluvias de diseño, convirtiéndose en ecuaciones que requieren de procesos iterativos para su solución. Aunque existen numerosas ecuaciones empíricas, sólo se exploran en este estudio aquellas que a criterio de los autores son las más utilizadas en Colombia y que usualmente se emplean en el contexto rural y urbano que caracteriza la zona de estudio. A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones utilizadas en el presente estudio y tomadas de diferentes fuentes [3-7,13]:

ASC Modificada:

$$t_c = \frac{0,007 \cdot n^{0,8} \cdot L_p^{0,8}}{S^{0,4} \cdot P_2^{0,5}} \quad \text{Ec. 5}$$

Bransby-Williams [15]:

$$t_c = 14,6 \cdot L \cdot A^{0,1} \cdot S^{-0,2} \quad \text{Ec. 6}$$

California Culvert Practice:

$$t_c = 60 \cdot \left[\frac{0,87075 \cdot L^3}{H} \right]^{0,385} \quad \text{Ec. 7}$$

Clark [16]: $T_c = 0,335 \cdot \left[\frac{A}{S^{0,5}} \right]^{0,593} \quad \text{Ec. 8}$

Ecuación de retardo, SCS [17]:

$$T_c = \frac{100 \cdot L_p^{0,8} \cdot [(1000 / NC) - 9]^{0,7}}{1900 \cdot (S \cdot 100)^{0,5}} \quad \text{Ec. 9}$$

Federal Aviation Agency, FAA:

$$t_c = 3,26 \cdot (1,1 - C) \cdot \frac{(L \cdot 1000)^{0,5}}{(S \cdot 100)^{0,333}} \quad \text{Ec. 10}$$

George Rivero:

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{[(1,05 - 0,2 \cdot p) \cdot (100 \cdot S)^{0,04}]} \quad \text{Ec. 11}$$

$$\text{Giandotti [18]: } T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{25,3 \cdot \sqrt{S \cdot L}} \quad \text{Ec. 12}$$

Henderson y Wooding [19]:

$$t_c = 0,94 \cdot I^{-0,4} \cdot \left[\frac{n \cdot L_p}{\sqrt{S}} \right]^{0,6} \quad \text{Ec. 13}$$

Izzard [20]:

$$t_c = \frac{41,025 \cdot (0,0007 \cdot I_p^{0,8} + c) \cdot L_p^{0,333} \cdot n^{0,605}}{I_p^{0,667} \cdot S^{0,333}} \quad \text{Ec. 14}$$

Johnstone Cross, [21]:

$$T_c = 5 \cdot \left(\frac{L_m}{\sqrt{S}} \right)^{0,5} \quad \text{Ec. 15}$$

Kerby - Hathaway [22, 23]:

$$t_c = \left[\frac{0,67 \cdot n \cdot L_p}{\sqrt{S}} \right]^{0,467} \quad \text{Ec. 16}$$

Kirpich, [24]:

$$t_c = 0,0078 \cdot L_p^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad \text{Ec. 17}$$

Método Racional Generalizado:

$$t_c = \left[\frac{60 \cdot n \cdot L}{H^{0,3}} \right] \quad \text{Ec. 18}$$

Morgali y Linsley, [25]:

$$t_c = \frac{0,933 \cdot L_p^{0,6} \cdot n^{0,6}}{I^{0,4} \cdot S^{0,3}} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\text{Passini: } T_c = \frac{[0,108 \cdot (A \cdot L)^{1/5}]}{S^{0,5}} \quad \text{Ec. 20}$$

$$\text{Pérez [26]: } T_c = \frac{L}{72 \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^{0,6}} \quad \text{Ec. 21}$$

Pilgrim y McDermott [27]:

$$T_c = 0,76 \cdot A^{0,38} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\text{Snyder [28]: } T_c = 1,2 \cdot (L \cdot L_{cg})^{0,3} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\text{Témez, [29]: } T_c = 0,3 \cdot \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76} \quad \text{Ec. 24}$$

Valencia y Zuluaga [30]:

$$T_c = 1,7694 \cdot A^{0,325} \cdot L^{-0,096} \cdot S_0^{-0,290} \quad \text{Ec. 25}$$

Ventura-Heras [19]:

$$T_c = \alpha \cdot \frac{A^{0,5}}{S} \quad 0,04 \leq \alpha \leq 0,13 \quad \text{Ec. 26}$$

Donde, t_c es el tiempo de concentración (*min*), T_c es el tiempo de concentración (*horas*), L es la longitud del curso de agua más largo (*km*), H es la diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida (*m*), S es la pendiente promedio del cauce principal (*m/m*), S_0 es la pendiente en porcentaje, A es el área de la cuenca (*km²*), L_p es la longitud del cauce (*pies*), L_{cg} es la distancia desde la salida hasta el centro de gravedad de la cuenca (*mi*), NC es el número de curva, C es el coeficiente de escorrentía del método racional, p es la relación entre el área cubierta de vegetación y el área de la cuenca, L_m es la longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (*m*), s es la pendiente promedio de la cuenca (*pies/mi*), n es el coeficiente de rugosidad del cauce, P_2 es la precipitación con un período de retorno de 2 años para una lluvia de duración de 24 horas (*pulg*), i es la intensidad de la lluvia (*mm/hr*), i_p es la intensidad de la lluvia (*pies/s*), α es un parámetro que depende de la pendiente.

Los resultados de la estimación del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí puesto que cada autor estima su ecuación para una cuencas con características muy particulares, por lo que debe tenerse mucho cuidado para la selección del valor más adecuado para el tiempo de concentración. Es el caso de la ecuación propuesta por Bransby-Williams, donde se recomienda para cuencas menores a 75 km², mientras que Kerby-Hathaway recomiendan su ecuación para cuencas menores a 0,1 km². La ecuación de Kirpich se estimó originalmente para cuencas de Tennessee y Pensilvania en los Estados Unidos. La ecuación de la *Federal Aviation Agency* se emplea para cuencas urbanas asociadas a aeropuertos de los Estados Unidos. El SCS desarrolló su ecuación como la suma de

tiempos de viaje individual para diferentes regiones, desde zonas boscosas con cauces pendientes a planicies con escorrentía lenta y zonas impermeables [31]. Pilgrim y McDermott sugieren el uso de su ecuación para cuencas menores a 250 km². Izzard utiliza su expresión en cuencas asociadas a autopistas y carreteras, Henderson y Wooding extraen su expresión de la onda cinemática para longitudes del orden de 100 m. Una práctica común en la Hidrología Aplicada es utilizar el valor medio eliminando los valores extremos [4,5].

En cuanto al tiempo de rezago, se encuentran en la literatura la relación propuesta por el “*Soil Conservation Service*”, SCS, quien propone que es 0,6 veces el tiempo de concentración [31]. Sin embargo, el “*Watershed Modelling System*” del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos utiliza varias opciones para el cálculo del tiempo de rezago en su modelo, entre las que se encuentran las siguientes expresiones, [32]:

- *Colorado State University*.

$$T_r = \frac{7,81 \cdot (L_m \cdot L_{cg})^{0,3}}{I_a^{-0,57}} \quad \text{Ec. 27}$$

- Eagleson [33]:

$$T_r = 0,32 \cdot \left(\frac{L_m \cdot L_{cg}}{S^{0,5}} \right)^{0,39} \quad \text{Ec. 28}$$

- Putnam [34]:

$$T_r = 0,49 \cdot \left(\frac{L_m}{S^{0,5}} \right)^{0,50} \cdot I_a^{-0,57} \quad \text{Ec. 29}$$

- SCS [31]:

$$T_r = \frac{L_p^{0,8} \cdot (CN/1000 - 9)^{0,7}}{1900 \cdot S^{0,5}} \quad \text{Ec. 30}$$

- Snyder:

$$T_r = 0,48 \cdot \left(\frac{L_m \cdot L_{cg}}{S^{0,5}} \right)^{1,42} \quad \text{Ec. 31}$$

- Taylor y Schwartz [14]:

$$T_r = 0,6 \cdot \left(\frac{L_m \cdot L_{cg}}{S^{0,5}} \right)^{0,3} \quad \text{Ec. 32}$$

Las ecuaciones descritas en este apartado han sido obtenidas para diferentes condiciones de terreno, clima y geomorfología, por lo que se deben tener en cuenta estos aspectos a la hora de hacer uso de cada una de ellas. Es el caso de Eagleson que propone su ecuación para cuencas hasta de 3,0 km² con un porcentaje de zona urbana entre el 30% y 80%, Taylor y Schwartz emplean su ecuación para la zona Noreste de los Estados Unidos, Putnam extiende su ecuación para cuencas urbanas de aproximadamente 60 km², la Universidad Estatal de Colorado condiciona su ecuación a la zona de Colorado en los Estados Unidos de América para cuencas con unas pérdidas iniciales mayores al 10%.

3. APLICACIÓN EN LA CUENCA EXPERIMENTAL DE LA QUEBRADA SAN LUIS

La cuenca de la quebrada San Luis es una cuenca urbana de media montaña típica de la zona andina colombiana y ha sido seleccionada como cuenca experimental dada su cercanía a la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y a que se trata de un cuenca urbanizada en su parte alta, intervenida en la parte media y algo conservada en la parte baja.

En la Figura 2 se puede apreciar la topografía de la zona y la ubicación de las estaciones de lluvia “San Luis”, “Cable”, “Bolivariana” y “Posgrados”, y de la estación de aforo ubicada en “Ruta 30”, que se encuentra instrumentada con una canaleta tipo Parshall y un sensor de nivel por ultrasonido. La resolución temporal de la información recopilada se unificó a 5 minutos para todas las estaciones.

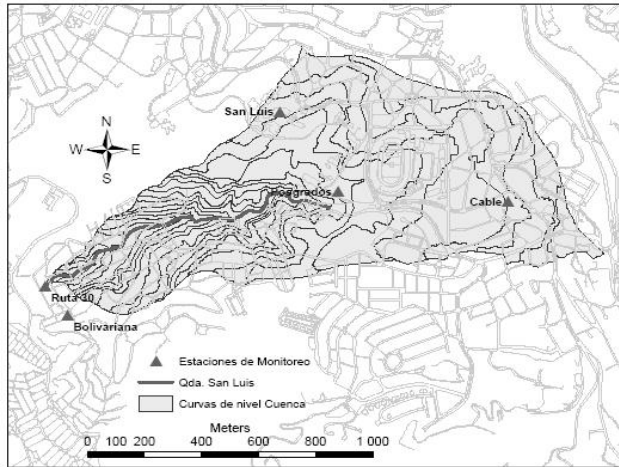


Figura 2. Localización de las estaciones de monitoreo en la cuenca de la quebrada San Luis
Figure 2. Location of monitoring stations in the San Luis Creek basin

La cuenca presenta aproximadamente un 65% de zona urbana, con presencia de viviendas de poca altura, incluye la zona universitaria y el estadio, la mayor parte de ellas ubicadas en la parte alta. El restante 35% de la cuenca se encuentra cubierta con bosques. Es importante mencionar que la cuenca ha sufrido un proceso de reforestación en los últimos años, debido a los programas de recuperación de laderas por deslizamientos ocurridos en el pasado; además, el proceso de urbanización en la zona se ha detenido.

Con la información cartográfica disponible y proveniente del Modelo de Elevación Digital MED, y con el conocimiento de las características de la cuenca se procede a calcular el tiempo de concentración para la cuenca de la quebrada San Luis en el punto donde se localiza la estación de aforos “Ruta 30”. Para estos cálculos se tiene en cuenta un área de 0,99 km², una longitud del cauce principal de 1,79 km, una pendiente del cauce de 0,128 m/m, un desnivel de 230 m, un coeficiente de rugosidad del cauce de 0,03, un coeficiente de escorrentía de 0,6, un número de curva de 91 para una lluvia máxima de intensidad 200 mm/hr y un coeficiente α de 0,04.

Los resultados de los tiempos de concentración obtenidos empleando diferentes fórmulas disponibles en la literatura se observan en la Tabla 1. El valor medio para el tiempo de

concentración estimado es de 31 minutos, con una variación importante de acuerdo con la ecuación seleccionada, es el caso de las ecuaciones propuestas por el ASCE modificado y el Racional Generalizado, que arrojan resultados muy bajos, lo cual se debe a que son métodos que involucran valores de precipitación y de rugosidad, los cuales pueden haber sido subestimados en esta cuenca. En cuanto a las ecuaciones propuestas por Johnstone Cross, Pilgrim y McDermott y Kerby-Hathaway que sobrevaloran el valor del tiempo de concentración, se considera aquí que se debe al rango del área para el cual estas cuencas han sido estimados, que se encuentran alejadas del rango propuesto por los autores. Por lo tanto, si se calcula un valor medio de todas las ecuaciones propuestas exceptuando aquellas que arrojan valores superiores a 40 minutos y menores a 10 minutos, se obtiene un valor medio para el tiempo de concentración de 28 minutos.

Posteriormente, se procede a calcular los tiempos de concentración basándose en la forma del hidrograma y del hietograma registrados para 33 eventos. La selección de los eventos se basa en la forma del hidrograma, considerando sólo aquellos de un solo pico con una lluvia claramente asociada. En la Tabla 2 se presentan las características generales de los eventos seleccionados. Para la estimación del tiempo se debe tener en cuenta que el intervalo temporal de registro es de 5 minutos y se consideran los diferentes valores para el tiempo de concentración y el tiempo de rezago según lo explicado anteriormente. El coeficiente de escorrentía C mostrado en la tabla corresponde a la relación de volúmenes entre la escorrentía registrada en la estación de aforo, descontando el flujo base, y el volumen de precipitación registrada.

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos, en donde se destaca que el valor promedio para el tiempo de concentración es de 29 minutos, valor que se asemeja al valor medio estimado mediante el uso de las ecuaciones empíricas. Las lluvias analizadas presentan una duración media de 29 minutos con un tiempo base para el hidrograma de escorrentía medio de 53 minutos y un tiempo de rezago medio de 22 y 13 minutos para T_{r-1} y T_{r-2} , respectivamente.

Tabla 1. Resumen de resultados de los tiempos de concentración para la cuenca de la quebrada San Luis empleando diferentes ecuaciones

Table 1. Summary of results from the time of concentration for the San Luis Creek basin using different equations

Autor de la ecuación	Tc (min)
ASCE modificada	6
Bransby Williams	37
California culvert practice	14
Clark	34
Ec. Retardo SCS	21
Federal Aviation Agency - FAA	27
George Rivero	29
Giandotti	28
Henderson y Wooding	34
Izzard	33
Johnstone Cross	62
Kerby - Hatheway	47
Kirpich	12
Racional generalizado	8
Morgaly - Linsley	34
Passini	19
Pérez	28
Pilgrim	46
Snyder	44
Témez	39
Valencia y Zuluaga	44
Ventura-Heras	13
PROMEDIO	31
MEDIANA	31
DESV.STD.	16
COEF VAR	0,51

En cuanto a los tiempos de concentración de los 33 eventos, se tiene que el valor de la mediana de T_{c-1} es de 25 minutos, T_{c-2} es de 30 minutos, T_{c-3} es de 35 minutos y T_{c-4} es de 20 minutos, lo cual nos indica que el método más conservador para el cálculo del tiempo de concentración, desde el punto de vista del diseño de obras hidráulicas, es el T_{c-4} , cuyas ecuaciones

empíricas que más se acercan son las propuestas por Passini y el SCS. El valor obtenido para el T_{c-2} se asemeja considerablemente al valor medio calculado de forma empírica, por lo que se tiene una buena aproximación para este caso. Para el tiempo de concentración que depende del tiempo al pico y el tiempo de rezago, T_{c-3} , se observan valores muy altos lo que conlleva a subvalorar los caudales de diseño de las obras hidráulicas.

El valor de la mediana para el tiempo de rezago estimado mediante los 33 eventos sugiere valores de T_{r-1} y T_{r-2} de 20 y 15 minutos, respectivamente. El tiempo de rezago es una variable que se relaciona al tiempo de concentración cuando no se dispone de la información temporal detallada para la cuenca. En el caso de la quebrada San Luis, se tiene que la relación entre el tiempo de rezago y el tiempo de concentración T_{c-1} es 0,8 cuando se emplea T_{r-1} ; y 0,6 para el caso de T_{r-2} . Este último resultado es coincidente con el valor propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos en su hidrograma Unitario [3,31].

Tabla 2. Principales características de los 33 eventos seleccionados en la cuenca de la quebrada San Luis
Table 2. Main features of the 33 events selected in the study at the San Luis Creek basin

<i>N°</i>	<i>PPT (mm)</i>	<i>Qp (m³/s)</i>	<i>Imax (mm/hr)</i>	<i>Vol total (m³)</i>	<i>Vol PPT (m³)</i>	<i>Vol base (m³)</i>	<i>Vol Esc (m³)</i>	<i>C</i>
1	2,4	0,462	10,0	791	2410	347	443	0,18
2	2,7	0,486	9,7	1303	2648	533	770	0,29
3	10,7	2,187	50,9	2268	10678	462	1806	0,17
4	2,2	0,611	10,5	1254	2148	422	832	0,39
5	5,1	2,529	22,0	2513	5076	443	2070	0,41
6	7,3	3,170	22,1	4955	7262	578	4377	0,60
7	6,1	4,658	18,7	6893	6079	1495	5398	0,89
8	13,3	6,162	52,2	9214	13235	1825	7389	0,56
9	3,5	1,046	12,6	2123	3513	707	1416	0,40
10	1,5	0,611	6,2	1258	1480	439	818	0,55
11	8,2	5,047	31,0	5085	8142	468	4617	0,57
12	4,7	1,903	17,8	4320	4646	2264	2056	0,44
13	16,7	4,658	36,2	11536	16646	1687	9849	0,59
14	2,5	0,922	6,8	2561	2475	823	1738	0,70
15	2,2	0,664	9,5	1349	2211	529	820	0,37
16	1,6	2,023	10,3	1596	1571	353	1243	0,79
17	1,9	0,535	6,4	703	1920	281	422	0,22
18	1,4	0,664	9,1	958	1382	178	780	0,56
19	3,2	0,775	28,7	656	3163	104	552	0,17
20	4,6	1,487	21,3	1475	4620	240	1234	0,27
21	1,7	0,775	5,5	1137	1735	368	768	0,44
22	0,4	0,350	1,8	534	413	161	373	0,90
23	1,0	0,232	4,1	339	1029	0	339	0,33
24	1,1	0,269	3,6	483	1064	144	339	0,32
25	1,8	0,952	8,8	1380	1757	568	811	0,46
26	0,7	0,803	5,3	1510	736	808	702	0,95
27	0,9	0,560	2,7	1728	912	1125	603	0,66
28	3,7	1,143	10,9	2974	3671	968	2006	0,55
29	2,2	0,983	6,9	1288	2172	210	1078	0,50
30	1,8	0,350	3,4	1187	1745	284	903	0,52
31	0,7	0,289	2,2	620	736	114	506	0,69
32	1,8	0,747	7,8	1874	1776	954	920	0,52
33	1,4	0,535	6,1	895	1391	229	666	0,48
PROMEDIO	3,7	1,472	14,0	2387	3650	609	1777	0,50
DESV. STD.	3,8	1,555	13,0	2554	3746	537	2171	0,21

Tabla 3. Estimación de los tiempos de concentración y de rezago, en minutos, datos tomados en 33 eventos registrados en la cuenca de la quebrada San Luis

Table 3. Estimation of the time of concentration and the lag time, in minutes, data collected from 33 events registered in the San Luis Creek basin

N°	d	T_b	T_{r-1}	T_{r-2}	T_p	T_{C-1}	T_{C-2}	T_{C-3}	T_{C-4}	$T_{C\text{medio}}$
1	30	55	25	15	25	25	30	40	25	30
2	45	65	30	20	25	20	35	45	25	31
3	20	40	15	10	15	20	25	30	15	23
4	30	50	20	15	15	20	30	35	15	25
5	25	45	10	5	20	20	35	40	20	29
6	30	50	15	10	15	20	35	40	15	28
7	30	55	15	5	20	25	40	50	20	34
8	30	60	20	15	30	30	40	45	30	36
9	40	60	20	10	15	20	40	50	15	31
10	20	45	15	15	25	25	30	30	25	28
11	25	45	20	15	20	20	25	30	20	24
12	25	45	20	15	20	20	25	30	20	24
13	55	85	25	5	40	30	60	80	40	53
14	35	70	25	10	25	35	45	60	25	41
15	30	55	25	15	20	25	30	40	20	29
16	20	50	25	15	30	30	25	35	30	30
17	25	40	20	15	15	15	20	25	15	19
18	25	55	30	15	25	30	25	40	25	30
19	25	50	20	20	25	25	30	30	25	28
20	20	45	20	15	20	25	25	30	20	25
21	30	50	20	15	20	20	30	35	20	26
22	25	50	25	15	20	25	25	35	20	26
23	30	55	30	20	25	25	25	35	25	28
24	30	55	30	20	30	25	25	35	30	29
25	25	40	20	10	15	15	20	30	15	20
26	20	35	20	10	15	15	15	25	15	18
27	35	55	15	20	10	20	40	35	10	26
28	35	60	25	15	25	25	35	45	25	33
29	20	50	15	10	20	30	35	40	20	31
30	40	80	35	10	25	40	45	70	25	45
31	25	65	30	15	25	40	35	50	25	38
32	25	50	20	15	15	25	30	35	15	26
33	20	50	20	10	20	30	30	40	20	30
PROMEDIO	29	53	22	13	22	25	32	40	22	29
DESV. STD.	8	11	6	4	6	6	9	12	6	7
COEF. VAR.	0,28	0,20	0,26	0,31	0,28	0,25	0,28	0,30	0,28	0,24
MEDIANA	25	50	20	15	20	25	30	35	20	29

En la Tabla 4 se observan los resultados de las ecuaciones empíricas empleadas para el cálculo del tiempo de rezago; se destaca que las ecuaciones propuestas por Snyder, Putnam y Taylor y Schwartz arrojan resultados similares entre sí y coincidentes con el valor estimado para T_{r-2} . La ecuación propuesta por *Colorado State University* se asemeja al valor estimado por T_{r-1} . En términos generales se considera al T_{r-2} como el tiempo de rezago más adecuado, tanto desde el punto de vista de las ecuaciones empíricas como del valor estimado de los eventos registrados en la cuenca de la quebrada San Luis. Se observa que el valor obtenido para el tiempo de rezago es mucho más estable que el obtenido para el tiempo de concentración, que muestra gran variabilidad.

En la Tabla 5 se presenta la relación entre los tiempos de rezago y el tiempo de concentración, T_r/T_c , en donde se observa un valor medio de 0,7 cuando se emplea el tiempo de rezago T_{r-1} y 0,52 para T_{r-2} , lo que arroja un valor medio global de 0,6 que es similar al sugerido por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [31,35]. Se concluye, por lo anterior, que la aproximación propuesta por el SCS es válida para cuencas urbanas de montaña.

Tabla 4. Estimación de los tiempos de rezago empleando ecuaciones empíricas para la cuenca de la quebrada San Luis

Table 4. Estimated lag times using empirical equations for the San Luis Creek basin

Autor de la ecuación	Tr (min)
Colorado State University	25
Eagleson (1962)	5
Putnam (1972)	15
SCS (1972)	9
Snyder	15
Taylor y Schwartz (1952)	12
PROMEDIO	13
MEDIANA	14
DESV. ESTANDAR	7
COEF. VARIACIÓN	0,51

Tabla 5. Relación entre el tiempo de rezago y el tiempo de concentración T_r/T_c

Table 5. Relationship between lag time and time of concentration T_r/T_c

T_r/T_c	T_{c-1}	T_{c-2}	T_{c-3}	T_{c-4}	$T_{c\text{medio}}$
T_{r-1}	0,80	0,67	0,50	1,00	0,70
T_{r-2}	0,60	0,50	0,38	0,75	0,52

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Una de las conclusiones más relevantes es que se considera adecuado hacer uso de la mayor cantidad de ecuaciones empíricas para calcular el tiempo de concentración de pequeñas cuencas de montaña en la zona Andina, de tal forma que se reduzca la incertidumbre asociada, siendo posible eliminar aquellas ecuaciones que se encuentran por fuera del rango medio. Curiosamente, para la ecuación estimada para Antioquia propuesta por Valencia y Zuluaga no se observa una buena aproximación con el valor observado en los registros históricos, lo cual indica la alta variabilidad presente en la zona andina y plantea la necesidad de continuar con estos estudios.

El efecto de la vegetación no aparece reflejado en las ecuaciones empíricas, salvo en aquellas que hacen uso del Número de curva y del Coeficiente de escorrentía, ya que estos parámetros de forma indirecta incluyen la cobertura vegetal. No incluir el efecto de la vegetación en las ecuaciones limita su confiabilidad, ya que a mayor cobertura vegetal, la respuesta hidrológica es menor, por lo que los tiempos de concentración y de rezago se hacen mayores. Las ecuaciones del SCS y del FAA incluyen de forma indirecta este efecto y sus resultados se encuentran dentro de los valores que reflejan respuestas más rápidas, explicando la componente urbana de la respuesta hidrológica. Sin embargo, la ecuación de Izzard presenta un tiempo de concentración alto, por lo que no es posible obtener una clara conclusión con relación al efecto de la urbanización en la cuenca de estudio.

De las cuatro formas de estimación del tiempo de concentración basándose en la información proveniente de los hietogramas e hidrogramas observados, se tiene que la más conservadora desde el punto de vista del diseño de obras hidráulicas es el T_{c-4} , siendo el T_{c-2} el que más se asemeja al valor medio de las ecuaciones empíricas, y el T_{c-3} es el que presenta mayores tiempos, lo cual arroja valores más bajos en los caudales de diseño de las obras hidráulicas.

El tiempo de rezago medio extraído de la información disponible en los registros históricos para la cuenca de la quebrada San Luis es muy similar al tiempo de concentración en la primera aproximación T_{r-1} , pero en la segunda definición, T_{r-2} , es más próximo a los valores estimados con las ecuaciones empíricas de la literatura. Las relaciones observadas entre las diferentes concepciones para el tiempo de concentración y el tiempo de rezago crean la necesidad de consolidar definiciones únicas que no generen controversia en la comunidad.

Se propone para el tiempo de concentración que se emplee la metodología más conservadora desde el punto de vista de diseño de obras hidráulicas, ya que la alta variabilidad espacial y temporal presente en la lluvia nos hace pensar de esta manera, por lo que se recomienda hacer uso de la definición del T_{c-4} , que para el caso de la cuenca de la quebrada San Luis arroja un valor medio de 22 minutos, en donde las ecuaciones empíricas que más se asemejan a este resultado son Passini, California, Kirpich y Ventura-Heras. En cuanto al tiempo de rezago, se recomienda el uso de la definición del T_{r-2} , que para la cuenca de la quebrada San Luis presenta un desfase medio entre el centroide del hietograma y el caudal punta de 13 min. La relación que se observa entre el tiempo de rezago y el tiempo de concentración empleando los valores recomendados T_{r-2}/T_{c-4} es de 0,59, el cual se asemeja al valor medio estimado por medio de los registros observados en la quebrada San Luis. Es interesante resaltar que en la cuenca de la quebrada San Luis el valor de la duración media de los eventos es de 30 min, el cual coincide con el valor medio del tiempo de concentración, pero no se recomienda emplear este valor en diseño hidrológico de obras hidráulicas ya que es alto y

conlleva a una subvaloración de los caudales de diseño. Es importante mencionar que este estudio es una primera aproximación y sus resultados deben ser contrastados con resultados de otras cuencas experimentales disponibles en la zona andina y con un mayor número de episodios para poder llegar a mejores conclusiones. Asimismo, la creación de nuevas cuencas experimentales en la región permitiría

generar más información de tipo geomorfológica que dé validez a la extrapolación de estas ecuaciones empíricas a cuencas no instrumentadas en zonas de montaña de los Andes colombianos.

REFERENCIAS

- [1] LLAMAS, J. Hidrología general: Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. 635 p. 1993.
- [2] TÉMEZ, J.R. Facetas del cálculo hidrometeorológico y estadístico de máximos caudales. Rev. Obras Púb. N°3.430, 47-51. 2003.
- [3] SMITH, R. Y VÉLEZ, M.V. Hidrología de Antioquia. Departamento de Antioquia, Sec. de Obras Púb. Reporte Técnico. 1997.
- [4] CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. Y MAYS, L.W. Applied Hydrology. New York, McGraw Hill. Cap 11-15. 361-571. 1988.
- [5] MAIDMENT, D.R. Handbook of hydrology. McGraw-Hill Inc. New York. 1993.
- [6] VIESSMAN, W. Y LEWIS, G.L. Introduction to Hydrology. 5ta Ed. Prentice Hall, NJ, USA. 2003.
- [7] BODHINAYAKE, N.D. Influence of hydrological, geomorphological and climatological characteristics of natural catchments on lag parameters. [Ph.D. Thesis]. University of Wollongong, Australia. <http://ro.uow.edu.au/theses/385>. 2004.
- [8] MCCUEN, R.H. Y SPIESS, J.M. Assessment of kinematic wave time of concentration. J. of Hydraulic Eng. ASCE, 121 (3), 256-266. 1995.

- [9] MEJÍA, F.; Y VARGAS, D. Red de estaciones pluviométricas para prevención de desastres. XII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Bogotá, julio 17-19. 1996.
- [10] PACHÓN, J.A. Y MEJÍA F. Monitoreo Climático y Prevención de Desastres en Manizales. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá, 22-24 mayo. 2008.
- [11] MEJÍA, F.; CHARDON, A.; LONDOÑO, J.P. Y ESTRADA, J.H.. Zonificación de riesgos por deslizamientos en áreas urbanas andinas. Informe Técnico. DIMA, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2005.
- [12] WONG, T.S.W. Comparison of celerity-based with velocity-based time-of-concentration of overland plane and time-of-travel in channel with upstream inflow. *Adv. in Water Res.*, 26, p 1171–1175. 2003.
- [13] KANG J.H., KAYHANIAN, M. Y STENSTROM, M. K. Technical Memorandum: Estimation of time of concentration for three first flush highway runoff characterization sites. California Department of Transportation Division of Env. Analysis. 26 p. 2006.
- [14] TAYLOR, A.B. Y SCHWARZ, H.E. Unit hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Trns. Amer. Geophys. Union*, 33, 235-246. 1952.
- [15] WANIELISTA, M., KERSTER, R., y EAGLIN, R. *Hydrology, water quantity and quality control*, 2nd Ed., Wiley, New York. 1977.
- [16] CLARK, C.O. Storage and the Unit Hydrograph. *Proc. Amer. Soc. Eng.* Vol 69. P 1333-1360. 1945.
- [17] SOIL CONSERVATION SERVICE, SCS. *Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55.* Washington D.C. Departamento de Agricultura de EEUUA. 1986.
- [18] ARBELÁEZ, A.C., VÉLEZ, M.V. Y SMITH, R. Diseño hidrológico con información escasa un caso de estudio: río San Carlos. *Avances en Rec. Hidráulicos.* N°4. p 1-20. 1997
- [19] HENDERSON, F.M. Y WOODING, R.A. Overland flow and groundwater flow from a steady rain of finite duration. *J. of Geoph. Research* 1, p. 193-206. 1964.
- [20] IZZARD, C.F. Hydraulics of runoff from developed surfaces from developed surfaces. *Proceedings of the 26th Annual meeting of the Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. EEUUA.* 1946.
- [21] JOHNSTONE, D. Y CROSS, W.P. *Elements of Applied Hydrology.* New York. Ronald Press. 1949.
- [22] KERBY W.S. Time of concentration of overland flow. *Civil Eng.* 60, p. 174. 1959.
- [23] HATHAWAY, G.A. Design of Drainage facilities. *Transactions, American Society of Civil Engineers* 110, p 697-730. 1945.
- [24] KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Eng.* 10 (6),362. 1940.
- [25] MORGALI, J.R. y LINSLEY R.K. Computer analysis of overland flow. *Journal of Hydraul. Div.(HY3).* 1965.
- [26] PÉREZ, O. Determinación del tiempo de concentración para estimar la avenida de diseño. *Ingeniería civil (La Habana), Cuba,* 1985 V36 N1 ene-feb p 40-53. 1985.
- [27] PILGRIM D.H Y MCDERMOTT, G.E. Design floods for small rural catchments in Eastern New South Wales. *Civ. Eng. Trans. Inst. Eng. Aust.* Vol CE24.pp. 226-234. 1982.
- [28] SNYDER, F.F. *Syntethic Unit Graphs.* Transaction of the American Geophysical Union. Estados Unidos. 1938.

[29] TÉMEZ, J.R. Extended and improved Rational Method. Proc. XXIV Congress, Madrid, España. Vol. A. pp 33-40. 1991.

[30] VALENCIA, C Y ZULUAGA, O. Estudio preliminar del tiempo de concentración en algunas cuencas de Antioquia. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 1981.

[31] NEH. Time of Concentration. Parte 630. Hidrología. National Engineering Handbook. Capítulo 15. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Natural Resources Conservation Service. p 1-17. 2010.

[32] HAAN, C.T., BARFIELD, B.J. Y HAYES, J.C. Design hydrology and sedimentology for small catchments. Academic Press Inc. United Kingdom. p. 77. 1994.

[33] EAGLESON, P.S. Unit hydrograph characteristics for sewered areas. Journal of the Hydraulic Division. HY4, 34-35. 1962.

[34] PUTNAM, A.L. Effect of urban development on floods in the Piedmont Province of North Carolina, USGS Report, 87 pp. 1972.

[35] KENT K.. Travel time, time of Concentration, and Lag. National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington D.C., SCS USDA. Capítulo 15. 1972.