



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Investigación en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los Recursos Hídricos

Estimación del Coeficiente de Escorrentía "C" y su análisis a través de variables determinantes de la respuesta hidrológica mediante el estudio de tres cuencas urbanas de la ciudad de Cuenca-Ecuador.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Investigación en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los Recursos Hídricos

Autor:

Mario Ricardo Rubio Ramírez

CI:0103662250

rrubio81@gmail.com

Director: Ing. Rubén Fernando Jerves Cobo, PhD

CI:0102017027

Co-director: Ing. Diego Esteban Mora Serrano, PhD

CI:0102423506

Cuenca, Ecuador

08-abril-2021



Resumen: La ciudad de Cuenca, enfrenta un permanente proceso de urbanización de su territorio, alterando la respuesta hidrológica del área urbanizada. En este contexto, es importante conocer la respuesta hidrológica de sus microcuencas, dónde el caudal pico (Q_p) que se produce es clave en el dimensionamiento de estructuras hidráulicas. Tanto para el análisis de la respuesta hidrológica como para estimar Q_p se puede utilizar el coeficiente de escorrentía, siendo necesario para la primera parte el coeficiente de escorrentía volumétrico (C_{VOL}) y para la segunda el coeficiente de escorrentía de tasa (C_{RATE}), valores que pueden obtenerse usando la literatura (C_{TEOR}). En el presente trabajo se estimaron los valores del coeficiente de escorrentía (C_{VOL} y C_{RATE}) considerando los hietogramas e hidrogramas levantados entre Marzo y Mayo del 2017, y, también se analizó el coeficiente en función de la cobertura del suelo, la humedad del suelo permeable y las intensidades de lluvia, estudiando tres microcuencas urbanas de Cuenca. Los resultados obtenidos indican que para las lluvias analizadas los valores de C_{RATE} y C_{VOL} se subvaloraron en un 18% y 21% respectivamente frente al C_{TEOR} máximo. Asimismo, se evidenció que el comportamiento de C_{VOL} frente a la humedad del suelo permeable y la cobertura impermeable del suelo muestra una correlación lineal positiva, mientras que, la correlación con la intensidad de lluvia no es lineal. Además, se encontró una expresión preliminar para estimar C_{VOL} en función de la impermeabilidad del suelo para la zona urbana de Cuenca, relación a ser validada con más información.

Palabras claves: Hidrología urbana. Coeficiente de escorrentía volumétrico. Coeficiente de escorrentía de tasa. Cuenca urbana.



Abstract: The city of Cuenca faces a permanent process of urbanization, changing the hydrological response of the urbanized area, therefore, it is important to know the hydrological response of its microbasins, where the peak flow (Q_p) that is produced is key in the dimensioning of hydraulic structures. Both for the analysis of hydrological response and for estimating Q_p the runoff coefficient can be used, being necessary for the first part use the volumetric runoff coefficient (C_{VOL}) and for the second the rate based runoff coefficient (C_{RATE}), however, these values can be obtained using literature values (C_{TEOR}). In this work the runoff coefficient (C_{VOL} and C_{RATE}) were estimated considering the hyetographs and hydrographs registered between March and May 2017. In addition, the coefficient was also analyzed based on the soil cover, permeable soil moisture and rainfall intensities, studying three urban micro-basins of Cuenca. The results showed that for the analyzed rainfall C_{RATE} and C_{VOL} were undervalued by 18% and 21% respectively against the maximum C_{TEOR} . Moreover, it was shown that C_{VOL} 's behavior against permeable soil moisture and impermeable soil cover shows a positive linear correlation, while the correlation with rainfall intensity is not linear. Besides a preliminary expression was found to estimate C_{VOL} based on the soil impermeability of the urban area of Cuenca. In a future work, this relationship must be validated with more information.

Keywords: Urban hydrology. Volumetric runoff coefficient. Rate-based runoff coefficient. Urban watershed.



Índice del Trabajo

1	CAPITULO I.....	10
	Introducción	10
1.1	Antecedentes y justificación	10
1.2	Objetivos del estudio	12
1.2.1	Objetivo general.....	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
2	CAPITULO II.....	14
	Materiales y Métodos	14
2.1	Marco teórico	14
2.2	Área y datos para el estudio.....	15
2.3	Determinación de eventos lluvia-escorrentía	19
2.4	Determinación de humedad del suelo permeable	22
2.5	Estimación de los coeficientes de escorrentía C_{RATE} , C_{VOL} y C_{TEOR}	23
2.6	Evaluación de los coeficientes de escorrentía	25
3	CAPITULO III.....	27
	Resultados y Discusión.....	27
3.1	Caracterización de la lluvia, escorrentía y humedad.....	27
3.2	Estimación de C_{TEOR} , C_{VOL} y C_{RATE}	34
3.3	Evaluación de los coeficientes de escorrentía	37
4	CAPITULO IV	45
	Conclusiones y Recomendaciones	45
4.1	Conclusiones y observaciones.....	45
4.2	Recomendaciones.....	46
5	Referencias.....	47



Índice de Tablas

Tabla 2.1. Principales características topológicas de las redes de saneamiento de las áreas en estudio.	17
Tabla 2.2. Valores del coeficiente de escorrentía teóricos.....	25
Tabla 3.1. Estadística descriptiva de los eventos lluvia escorrentía analizados. ...	30
Tabla 3.2. Valores de C_{TEOR} obtenido utilizando clasificación supervisada de la ortofoto y sus índices de fiabilidad	34
Tabla 3.3. Resumen estadístico de los valores de C_{RATE} y C_{VOL} para las diferentes microcuencas.	36



Índice de Figuras

Figura 2.1. Ubicación de las microcuencas de estudio en Cuenca, Ecuador	16
Figura 2.2. Ortofoto del área de estudio: (a) composición de color natural (RGB:1-2-3); (b) composición de color falso infrarrojo (RGB:4-2-1).....	16
Figura 2.3. Estructuras hidráulicas derivadoras de caudal: (a) microcuenca T2; (b) microcuenca T3.....	17
Figura 2.4. Ubicación de equipos para medición de lluvia, caudal de escorrentía de lluvia y humedad del suelo.	18
Figura 2.5. Esquema de funcionamiento del sistema de derivación de caudales en el sistema combinado.....	20
Figura 2.6. Estimación del C_{RATE} en la microcuenca T3 para el evento del 19 de marzo del 2017.....	24
Figura 3.1. Histograma comparativo de lluvias para el periodo marzo-mayo 2017.	27
Figura 3.2. Hietogramas e hidrogramas de las microcuencas en estudio	28
Figura 3.3. Lluvia acumulada para las Estaciones UC y EC.....	29
Figura 3.4. Intensidades máximas para las Estaciones UC y EC.....	29
Figura 3.5. Distribución de las lluvias según I_{60} para las microcuencas de estudio.	31
Figura 3.6. Boxplots de los tiempos de concentración para las diferentes microcuencas.	31
Figura 3.7. Hietogramas y variación de la humedad para la microcuencas de estudio entre abril y mayo del 2017.....	33
Figura 3.8. Tipos de superficie de las microcuencas en estudio usando la clasificación supervisada de la ortofoto.....	34
Figura 3.9. Boxplots de C_{RATE} (izquierda) y C_{VOL} (derecha) en las diferentes microcuencas.	37
Figura 3.10. Curvas de distribución acumulada C_{RATE} VS $C_{TEOR\ min}$ y $C_{TEOR\ max}$ (arriba) C_{VOL} VS $C_{TEOR\ min}$ y $C_{TEOR\ max}$ (abajo).....	38
Figura 3.11. Lluvia versus escorrentía en las diferentes microcuencas.	39
Figura 3.12. Relaciones entre el C_{VOL} y la humedad del suelo cada 30 minutos..	40
Figura 3.13. Relaciones entre I_{30} y C_{VOL}	41
Figura 3.14. Biplot del Análisis de componentes principales entre la humedad, I_{30} y Q_{30}	42
Figura 3.15. C_{VOL} versus porcentaje de área impermeable de las microcuencas.	43



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Mario Ricardo Rubio Ramírez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estimación del Coeficiente de Escorrentía "C" y su análisis a través de variables determinantes de la respuesta hidrológica mediante el estudio de tres cuencas urbanas de la ciudad de Cuenca-Ecuador.", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 08 de abril del 2021.

Mario Ricardo Rubio Ramírez

C.I: 0103662250



Cláusula de Propiedad Intelectual

Mario Ricardo Rubio Ramírez, autor del trabajo de titulación "Estimación del Coeficiente de Escorrentía "C" y su análisis a través de variables determinantes de la respuesta hidrológica mediante el estudio de tres cuencas urbanas de la ciudad de Cuenca-Ecuador.", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 08 de abril del 2021

Mario Ricardo Rubio Ramírez

C.I: 0103662250



Dedicatoria

Para Camila, Rafaela y Gaby mi luz, motivación e inspiración

A mis padres Rosy, Mario y mis hermanos

Agradecimientos

A Dios por el maravilloso regalo de la vida.

A la Empresa ETAPA EP mi gratitud imperecedera, pues con su apoyo se pudo sacar adelante esta maestría y la presente investigación.

A los Ingenieros Manuel Cordero y Omar Cueva por el voto de confianza.

Al personal técnico y administrativo del PROMAS de la Universidad de Cuenca que gentilmente facilitaron la logística, información y equipos para llevar a cabo el presente trabajo.

Asimismo, mi reconocimiento a Linde De Schrijever, Carlos Deluquez y Alejandro Bowen por el apoyo brindado en el trabajo de campo.

A mis amigas y amigos de la maestría y ETAPA EP les agradezco por el apoyo brindado en este proceso.

Finalmente agradecer a los docentes que aportaron con su valioso tiempo y conocimiento para concretar este trabajo.



1 CAPITULO I

Introducción

1.1 Antecedentes y justificación

En la actualidad, de acuerdo con datos y cifras de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 (ONU, 2015), alrededor de 3500 millones de personas (50% de la población mundial) viven en zonas urbanas, y se estima que para el año 2030 cerca del 60% de la humanidad vivirá en zonas urbanas.

En este contexto, el proceso de urbanización a nivel mundial se desarrolla de una manera insostenible; sin embargo, en Latinoamérica este proceso ha sido más significativo pues, de acuerdo con la ONU, el 77% de la población es urbana y con una tendencia a la estabilización prevista para después del año 2150 (Tucci, 2007). La condición expuesta contribuye a que las ciudades presenten déficits, funcionamientos ineficientes en los servicios que presta y ninguna estructura urbana aparente (Carrión, 2001).

La ciudad de Cuenca-Ecuador, como otras ciudades en el mundo, presenta también un permanente proceso de urbanización de su territorio. De acuerdo a un estudio desarrollado para la Municipalidad de Cuenca su huella urbana consolidada ha pasado de 4826 Ha a 6188 Ha entre los años 2002 a 2010 (BID CE3, 2014), es decir se ha incrementado en un 28% el área urbanizada.

Este proceso de urbanización, comprende varios cambios físicos en la cuenca hidrográfica, entre ellos, la impermeabilización del área urbana y la construcción de sistemas de evacuación de aguas lluvias en reemplazo de rutas naturales de evacuación de la escorrentía del agua lluvia. Estos cambios provocan entre otras consecuencias, una considerable alteración en la respuesta hidrológica del área urbanizada ante un evento de lluvia (Miller et al., 2014) y, de acuerdo con Marsalek et al., (2008) también se puede modificar enormemente el ciclo del agua.

Entre los aspectos de la respuesta hidrológica que se afectan debido a la urbanización están: la transformación de gran parte de la precipitación en escorrentía superficial; la aceleración del tiempo de respuesta de la cuenca y la disminución del tiempo de retardo entre la precipitación y la escorrentía; el incremento de los picos de flujo para todos los eventos de tormenta excepto las más grandes; la disminución del flujo base debido a la reducción del aporte de agua subterránea y la afectación de la calidad del agua de las fuentes por la descargas de los efluentes de la red de saneamiento (Rose & Peters, 2001).

También se ha identificado en investigaciones realizadas por Wai et al. (2017), que el proceso de urbanización provoca una tendencia a incrementar la precipitación en estas áreas; esto debido a las modificaciones térmicas y dinámicas de la capa límite troposférica relacionada con la urbanización.



En resumen, el incremento de las precipitaciones y la afectación de la respuesta hidrológica de una cuenca debida al proceso de urbanización puede provocar que los sistemas de saneamiento, tales como los construidos en la ciudad de Cuenca, presenten problemas en su desempeño ya que esta infraestructura puede verse sub-dimensionada por el aumento de escorrentía que este proceso involucra (Valbuena, 2016), generando el aumento de la frecuencia de las inundaciones, produciendo pérdidas económicas, contaminación y problemas de salud (Yao et al., 2016).

En función de lo expuesto, durante los últimos treinta años se ha introducido el manejo del agua lluvia, con el fin de reducir los impactos antropogénicos sobre el ciclo hidrológico del agua, los riesgos de inundaciones y la movilización de sedimentos y contaminantes hacia los cuerpos superficiales de agua (Marsalek et al., 2008).

Considerando esta problemática, resulta de gran importancia que para ciudades que se encuentran en un permanente proceso de urbanización de su territorio, se realice una estimación de la respuesta hidrológica de sus cuencas urbanas ante eventos lluvia-escorrentía, ya que ésta establece la forma del hidrograma de la escorrentía que transita por la red de evacuación de aguas lluvias (Rey-Valencia & Zambrano, 2018), dónde el caudal pico (Q_p) que se produce es un aspecto clave en los procesos de dimensionamiento de estructuras hidráulicas.

Entre las diversas metodologías existentes para estimar el caudal pico generado por escorrentía superficial, se identifica que la más utilizada por la mayoría de ingenieros por su sencillez de aplicación y comprensión es el Método Racional (Mays, 2001), donde el Coeficiente de Escorrentía “C” es el componente principal.

De acuerdo con Grimaldi & Petroselli (2014), para la determinación de “C” la mayoría de los libros de diseño se refieren al manual de diseño de alcantarillado sanitario y pluvial de 1969 producido por la American Society of Civil Engineers (ASCE) y la Water Pollution Control Federation (WPCF), los cuales no obtuvieron los valores de “C” por medio de un proceso de calibración experimental sino más bien a través del juicio de expertos consultados.

Según la ASCE (2006) los valores de los Coeficientes de Escorrentía son función del uso de suelo, y el tipo de suelo, la tormenta de diseño y la pendiente del terreno, y también del periodo de retorno.

Por otro lado, el coeficiente de escorrentía es también utilizado como un parámetro que describe la respuesta de la cuenca (Blume et al., 2007) y se ha encontrado que la variación de “C” también obedece a la variabilidad de la respuesta hidrológica de las cuencas (Ahm et al., 2013).

Young et al. (2009) en su investigación sugiere que los valores de “C” recomendados por la literatura para cuencas rurales son muy bajos respecto de los



obtenidos empíricamente, lo cual plantea la interrogante de que si estos valores también son bajos para cuencas urbanas.

Asimismo, se ha encontrado que al comparar el valor de “C” recomendado en la literatura, con valores de “C” obtenidos a partir de la precipitación y de la escorrentía observada en Texas (USA) se obtuvo que un 25% de los valores de “C” de la literatura son menores que los obtenidos experimentalmente, lo cual, implica subestimación del caudal pico de escorrentía para propósitos de diseño (Dhakal et al., 2013) y por consiguiente la estructura que se considere para evacuar la escorrentía tendrá problemas con su capacidad de transporte.

Por tanto, la existencia de poca información respecto de la estimación del coeficiente de escorrentía en una cuenca urbanizada se vuelve un problema, más aún, si se toma en cuenta que el manejo del drenaje urbano en la actualidad presenta nuevos desafíos (Ávila, 2012).

Si a la problemática arriba señalada se suma que la cuenca hidrográfica en la que se asienta la ciudad donde se realiza el estudio, enfrenta el aumento de los eventos extremos (sequías, inundaciones) debidos a los efectos del cambio climático (Mora et al., 2014) es preciso conocer la respuesta hidrológica de su área urbanizada.

En este escenario, para un mejor dimensionamiento de las estructuras hidráulicas a través de la aplicación del Método Racional y mejorar la modelización hidrológica es necesario caracterizar y analizar el valor de “C”, lo cual puede ser aplicado para diferentes sectores urbanos de Cuenca.

Con los resultados que se obtengan se contará con mayor información para sustentar el uso del coeficiente de escorrentía en sus diferentes aplicaciones y se contribuirá al conocimiento del comportamiento de este parámetro frente a variables como la cobertura del suelo, la humedad del suelo y las intensidades de lluvia.

Finalmente se debe indicar que cómo hipótesis en la investigación se plantea que existen variaciones apreciables en los valores del coeficiente de escorrentía que se utiliza en el cálculo de caudales pico a través del método racional y en la estimación de la respuesta hidrológica de la cuenca, las cuales son producto de la no determinación en campo de este coeficiente, de la variabilidad de condiciones antecedentes que presenta la cuenca y de la característica de la precipitación que genera la escorrentía.

1.2 Objetivos del estudio

1.2.1 Objetivo general

Estimar el valor del coeficiente de escorrentía “C” mediante dos enfoques conceptuales y analizar los resultados en función de la cobertura del suelo, la



humedad del suelo y las intensidades de lluvia registradas en tres cuencas urbanizadas de la Ciudad de Cuenca.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar, levantar y analizar la información de las microcuencas de estudio, lluvias, caudales y humedad del suelo.
- Estimar el valor del coeficiente de escorrentía de tasa (C_{RATE}), el coeficiente de escorrentía volumétrico (C_{VOL}) y el coeficiente de escorrentía teórico (C_{TEOR}).
- Analizar el coeficiente de escorrentía en función de la cobertura del suelo, la humedad del suelo y las intensidades de lluvia registradas.

En las siguientes secciones se ofrece información sobre los materiales y métodos utilizados para luego presentar los resultados, su discusión, y, finalmente presentar las conclusiones del estudio.



2 CAPITULO II

Materiales y Métodos

2.1 Marco teórico

Para poder realizar la estimación de “C”, se puede utilizar la misma ecuación del método racional, a partir de mediciones directas de altura de precipitación y altura de escorrentía a la salida de la cuenca en estudio, lo cual implica que el coeficiente varía respecto del flujo, es decir se calcula un C de tasa (C_{RATE}) (Dhakal et al., 2013; Guo, 2017; Pilgrim & Cordery, 1993). Por su concepto, este coeficiente puede llegar a tener valores superiores a la unidad.

$$C_{RATE} = \frac{Q_p}{IA}$$

Por otro lado, también se tiene que C corresponde a la parte de la lluvia que se transforma en escorrentía, por tanto, puede ser obtenido a través de la relación entre el volumen de escorrentía y el volumen de lluvia, es decir un C volumétrico (C_{VOL}) que representa un valor promedio del evento analizado (Dhakal et al., 2011; Guo, 2017).

$$C_{VOL} = \frac{Vol_{escorrentía}}{Vol_{lluvia}}$$

De lo expuesto se puede concluir que C_{VOL} incluye el efecto agregado de todos los factores que afectan el balance hídrico del sistema analizado, pudiendo estos ser la evaporación, la filtración, los errores de estimación de caudales y precipitación y otras abstracciones que evitan que la precipitación se convierta en escorrentía (Visessri & McIntyre, 2016).

A priori se podría indicar que por medio de los dos métodos se obtendrían los mismos resultados, sin embargo, la diferencia entre el hietograma de la lluvia y la curva de intensidad duración frecuencia usadas en cada método provocan valores de C diferentes (Guo, 2017).

En algunas investigaciones se ha buscado determinar el valor de “C” para predicciones de caudal pico utilizando el concepto de que este parámetro correspondería a C_{VOL} , obteniéndose malos resultados, lo cual demostró que este concepto no es el adecuado para obtener caudales pico (Young et al., 2009).

Por tanto, es apropiada la utilización del C_{RATE} para cuando se busca determinar el caudal pico a través del método racional, mientras que, C_{VOL} se puede utilizar para estimar las pérdidas de la lluvia, modelización hidrológica y estimar el volumen de escorrentía para el control de calidad de aguas pluviales (Dhakal et al., 2013).



Entre los objetivos de este estudio también se planteó el análisis del coeficiente de escorrentía en función de las variables que determinan la respuesta hidrológica, es decir se buscó establecer sus relaciones causales.

En cuanto al coeficiente de Escorrentía que se evaluó hay que precisar que se consideró a C_{VOL} ya que este se obtuvo del ratio entre lo que llueve y lo que escurre ya que este lleva implícito el fenómeno físico de las pérdidas hidrológicas que se producen en el proceso de transformación lluvia-escorrentía (Visessri & McIntyre, 2016). No se consideró en la evaluación a C_{RATE} por cuanto este se consiguió a partir de la relación matemática establecida en la ecuación del método racional.

Con respecto a la respuesta hidrológica de las cuencas, hay que indicar que está determinada por la variabilidad de la lluvia y las propiedades de superficie de la cuenca, tales como la humedad antecedente y la red de drenaje (Yang et al., 2016). Además, se ha identificado que el incremento de la impermeabilidad afecta la respuesta hidrológica de una cuenca (Cristiano et al., 2017).

2.2 Área y datos para el estudio

El área dónde se desarrolló el estudio (Figura 2.1) está ubicada en la zona urbana consolidada de la ciudad de Cuenca en Ecuador dentro de la subcuenca del río Tomebamba. La zona de estudio presenta un régimen bimodal de lluvias con profundidades promedio anual de entre 700 y 900 mm (Mora et al., 2014). En esta zona se seleccionaron tres microcuencas T1, T2 y T3, las mismas que tienen áreas de aporte 18.1, 19.45 y 56 Ha respectivamente.

Es importante señalar que las áreas analizadas son suelos urbanizados y presentan características mixtas, ya que T1 y T3 presentan áreas comerciales y residenciales, siendo la primera la que mayor extensión posee, mientras que T2 guarda características residenciales mayormente y comerciales en menor medida.

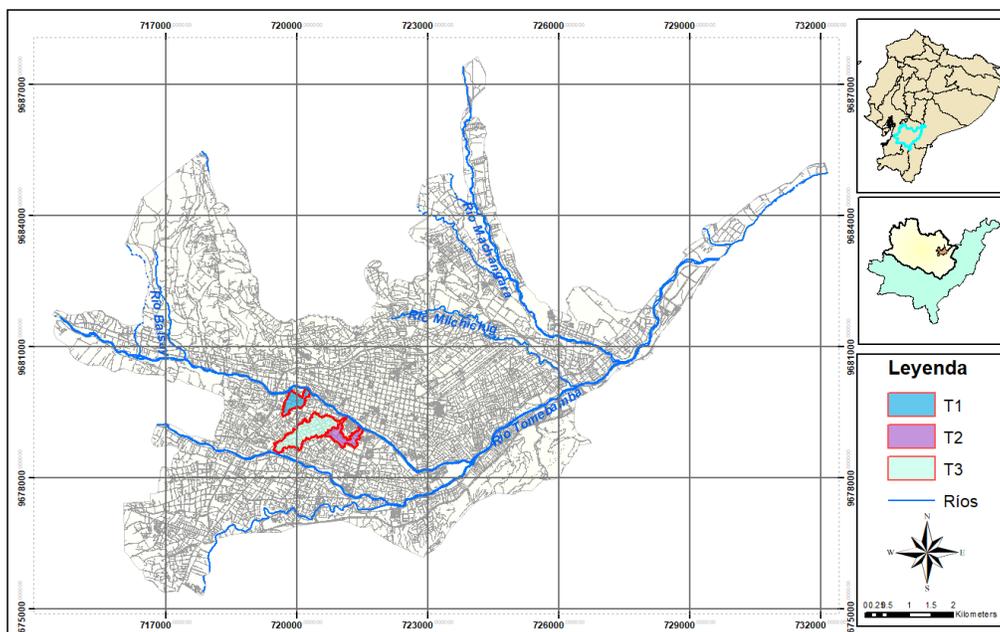


Figura 2.1. Ubicación de las microcuencas de estudio en Cuenca, Ecuador
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Para la zona de estudio se cuenta con información completa del catastro del sistema de saneamiento y las ortofotos NV-F4b-F4, NV-F4b-F3, NV-F4b-F2, NV-F4b-F1 levantada por el programa SIGTIERRAS (Resolución espacial: 0.3 x 0.3 m, Número digital y 4 bandas: R, G, B, NIR) entre septiembre y octubre del 2010 (Figura 2.2).

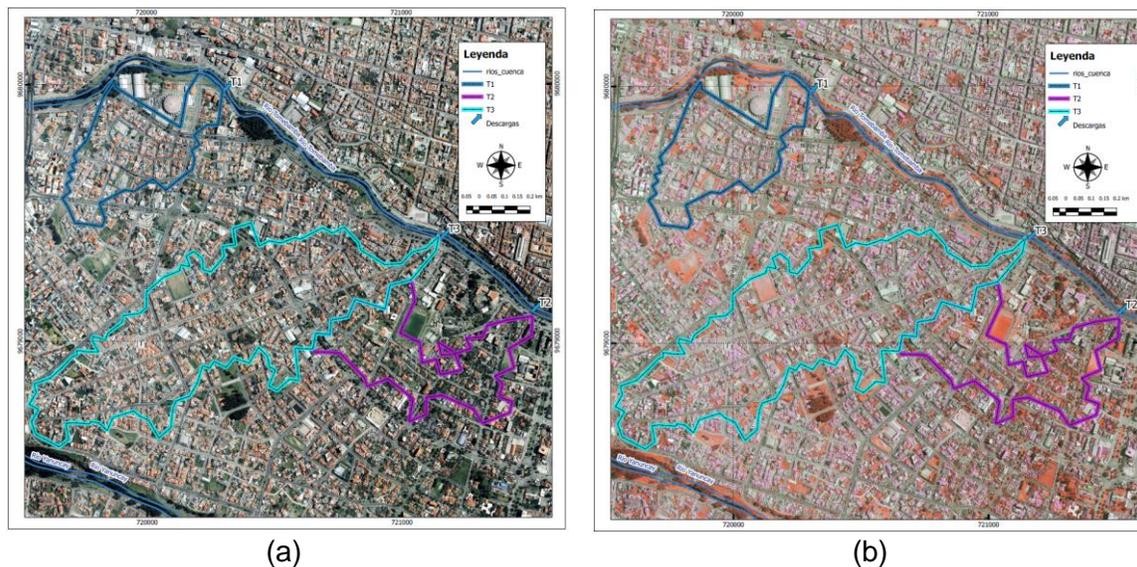


Figura 2.2. Ortofoto del área de estudio: (a) composición de color natural (RGB:1-2-3); (b) composición de color falso infrarrojo (RGB:4-2-1).
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020. **Fuente:** Programa SIGTIERRAS, MAGAP, 2012.

Las diferentes microcuencas presentan zonas impermeables que se encuentran en un rango de 83% hasta un 60% de su área total y evacúan la escorrentía de la lluvia por medio de un sistema de alcantarillado combinado (SAC), en el cual, mediante una estructura hidráulica se realiza la separación de caudal de agua residual que va al tratamiento y el caudal de escorrentía que se dispone hacia los cuerpos de agua, que para los tres casos de estudio resulta ser del tipo conocido como vertedero transversal con orificio (Figura 2.3).



Figura 2.3. Estructuras hidráulicas derivadoras de caudal: (a) microcuenca T2; (b) microcuenca T3

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Las principales características topológicas de las redes de saneamiento de las tres microcuencas se presentan a continuación

Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Principales características topológicas de las redes de saneamiento de las áreas en estudio.

Microcuenca	Diámetros en la red		Estructura hidráulica derivadora		
	mínimo (m)	máximo (m)	p (m)	L (m)	orificio (m)
T1	0.3	1	0.25	0.85	0.2
T2	0.3	1.2	0.25	0.98	0.2
T3	0.3	1.5	0.3	1.2	0.2

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

La información de lluvia utilizada para la investigación corresponde a los registros de dos estaciones pluviométricas. La primera estación (UC) utilizada para las microcuencas T2 y T3, es un equipo Davis con tip de 0.2mm, mientras que, la segunda (EC) es un equipo Texas con tip de 0.1 mm empleado para la microcuenca T1 (Figura 2.4).

Respecto de los caudales que se generan en cada cuenca, se midieron los calados de flujo de cada evento de rebose en la tubería de descarga utilizando un transductor de presión diferencial instalado en un muestreador automático Teledyne ISCO 6712 (Figura 2.4), el mismo que registra la información cada minuto. Esta información fue procesada y transformada a caudales utilizando la ecuación de Manning.

Los datos crudos de lluvia y caudal obtenidos se procesaron a una escala temporal de cinco minutos, procediendo a acumular y a promediar respectivamente en la escala indicada. La selección de esta escala obedece a que se sigue la metodología planteada por Dhakal et al. (2013) para la determinación de la intensidad de las precipitaciones.

Por otro lado, para la obtención de la humedad del suelo permeable se ha utilizado un reflectómetro de contenido de agua CS625 Campbell, ubicado dentro de la microcuenca T1 (Figura 2.4). El periodo de levantamiento de datos está comprendido entre los meses de abril y mayo del 2017.

Los datos crudos de humedad no se procesaron, pues la escala temporal de registro de datos del equipo es de 30 minutos, lo cual se considera adecuado para el análisis que se busca realizar en este estudio.

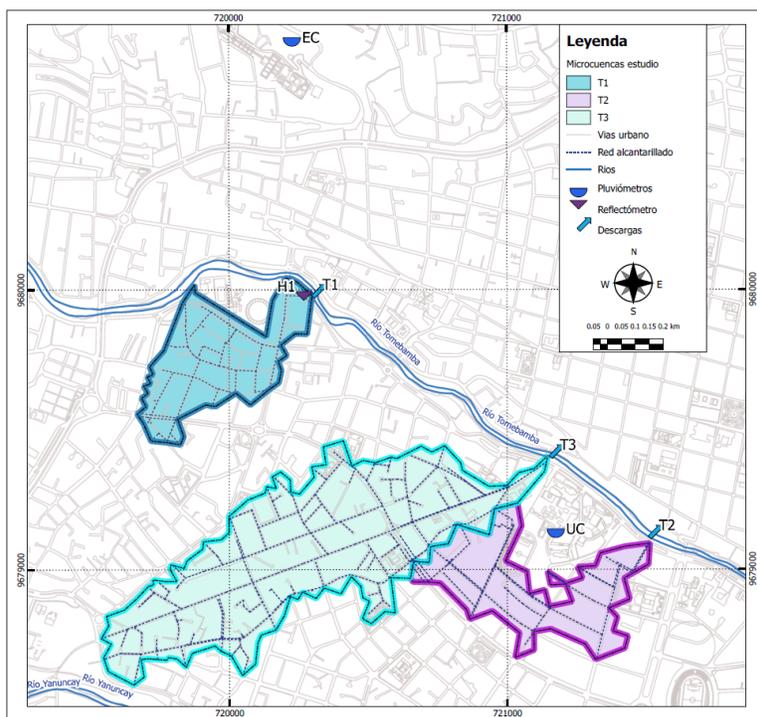


Figura 2.4. Ubicación de equipos para medición de lluvia, caudal de escorrentía de lluvia y humedad del suelo.

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020



2.3 Determinación de eventos lluvia-escorrentía

En el estudio de la respuesta hidrológica de una cuenca urbana, donde hay una variabilidad alta y el área de drenaje es pequeña, varias investigaciones resaltan la importancia de una alta resolución espacial y temporal de los datos de lluvia para mejorar la estimación de la escorrentía en estas áreas (Cristiano et al., 2017). Esto concuerda con lo reportado en varios estudios, donde se ha encontrado que la relación entre el área de la cuenca y el impacto de la resolución de la lluvia es inversamente proporcional (Ochoa-Rodriguez et al., 2015).

Con el objetivo de registrar la estructura y los extremos de la lluvia se sugiere que la escala espacial de medición de la lluvia en cuencas urbanas sea medida a escala sub-kilométrica, mientras que la escala temporal a utilizar sería por debajo de los 5 minutos para obtener un registro adecuado de su variabilidad (Ochoa-Rodriguez et al., 2015). Estas recomendaciones se confirman con la determinación de las escalas críticas de resolución temporal y espacial para diferentes áreas de drenaje obtenidas por Cristiano et al. (2017).

Es importante señalar que mientras más detallado sea el modelo que se esté utilizando para el estudio, las necesidades de la escala temporal y espacial probablemente van a ser más finas (Ochoa-Rodriguez et al., 2015).

Por otro lado, se ha encontrado que de acuerdo con la Guía de prácticas hidrológicas Volumen I (2008), la consideración de contar con una estación pluviométrica para obtener la información de una cuenca es suficiente.

Con estos antecedentes, considerando que se está analizando la respuesta hidrológica de las cuencas a partir del método racional, para la escala espacial es justificado el uso de estaciones de lluvia representativas para cada cuenca y escalas temporales de hasta 5 minutos de resolución.

Definidos las estaciones de medición de lluvia, es necesario realizar la estimación de la lluvia sobre un área, pudiendo esta determinarse a partir de mediciones puntuales dentro de las zonas de estudio o cerca de estos. Para este cálculo en la literatura existen varios procedimientos que pueden ser utilizados entre los cuales están el Factor de Reducción de Área (ARF), la distancia inversa, los polígonos de Thiessen, las isoyetas, kriging, entre otros, etc.

La selección del método dependerá de la particularidad del problema analizado, así como también de factores tales como la densidad de pluviógrafos, el conocimiento de la variabilidad espacial y también la experticia del hidrólogo (Robinson & Ward, 2017).

La metodología del ARF, muy utilizada para la estimación de riesgo de inundación, es aplicada cuando se trata de cuencas donde no se tiene una densa red de medición de la lluvia (Wright et al., 2014). Al respecto de los valores del ARF estos varían con las áreas tributarias de la cuenca y dependen de la frecuencia y duración

de la lluvia (Guo, 2017). En este sentido al analizar los datos que se tienen de los diferentes eventos de tormenta, los que tienen duraciones promedio de 2 horas y al ser el área de análisis muy pequeña (165 Ha) los valores que se tendrían del ARF serían muy cercanos a uno.

Por otro lado, en el caso de pequeñas cuencas urbanas (áreas con radios de hasta 1 km, ~314 Ha) se indica que no es necesaria ninguna corrección mediante el ARF (Vaes et al., 2005). En estas circunstancias, se descarta el uso de ARF para la obtención de la lluvia promedio de las cuencas analizadas.

Por otro lado, también se descarta la posibilidad de utilizar el método de las isoyetas, ya que el cálculo de la distribución temporal de la lluvia promedio con las estaciones consideradas puede generar la posibilidad de que el patrón promedio que se obtenga oculte o altere la información sobre la precipitación en las cuencas analizadas.

Con estos antecedentes, para la obtención de la lluvia promedio sobre las cuencas de estudio se aplicará el método de Thiessen que considera el efecto de la densidad de las estaciones en la zona de estudio. Por otro lado, las microcuencas de estudio no presentan grandes desniveles (50 m) y pueden considerarse planas.

Los datos para la estimación de la escorrentía se midieron aguas abajo de la estructura hidráulica derivadora de caudales del sistema de saneamiento, debido a la imposibilidad de instalación de los equipos de medición aguas arriba de estas estructuras.

Con este antecedente, la estimación de los hidrogramas de escorrentía de la lluvia se calculó a partir de un modelo conceptual del sistema de derivación, que considera la hidráulica de conductos circulares y un balance de caudales (Figura 2.5) en la estructura hidráulica derivadora.

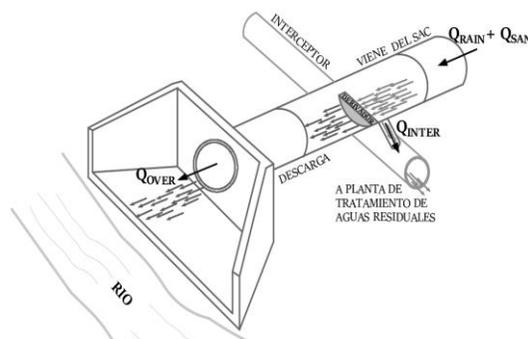


Figura 2.5. Esquema de funcionamiento del sistema de derivación de caudales en el sistema combinado.

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020



Para el balance de caudales se consideró que las exfiltraciones e infiltraciones de agua en las redes de alcantarillado que aportan a las microcuencas analizadas son despreciables, por tanto, no afectarán en la determinación de los hidrogramas de escorrentía superficial a obtener. En este sentido, los caudales de lluvia (Q_{RAIN}) se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{RAIN} = Q_{INTER} + Q_{OVER} - Q_{SAN}$$

Donde Q_{INTER} es el caudal que se deriva al tratamiento, Q_{OVER} es el caudal que se evacúa al río por la descarga del sistema de saneamiento de la cuenca (dato medido en campo) y Q_{SAN} es el caudal sanitario.

Por medio de la ecuación de Manning, utilizando los calados de flujo medidos en la descarga, el coeficiente de rugosidad (consultado en la literatura), la pendiente y sección del conducto, se obtiene Q_{OVER} .

La estimación de Q_{INTER} considera la estructura derivadora vertedero transversal con orificio y utilizó las expresiones de orificio sumergido (Zambrano, 2015), que está en función de la cabeza del flujo que se produce sobre el orificio en cada evento de rebose.

Para estimar la cabeza del flujo se estudió el comportamiento hidráulico de la estructura derivadora, se analizó sus características físicas, y se determinó que la aproximación más real del funcionamiento del vertedero se lo hace considerándolo como si este fuera uno de cresta corta, puesto que, de acuerdo con Bos et al. (1989) para que este funcione como un vertedero de cresta delgada la relación cabeza de flujo sobre el vertedero y longitud de la cresta (H_1/L) ≥ 15 ; y para que funcione como cresta ancha se debe cumplir que $0.07 \leq H_1/L \leq 0.5$.

La formulación de las ecuaciones de descarga para vertederos de cresta corta con sección de control no rectangular es similar que para los vertederos de cresta ancha (Bos et al., 1989); en consecuencia se puede asumir que la carga hidráulica que se produce en la cresta de los vertederos de este tipo es igual a la profundidad crítica.

De acuerdo con Clemmens et al. (1984), a partir de las expresiones válidas para vertederos de cresta ancha con flujo crítico se puede obtener una expresión en términos de relaciones adimensionales para el flujo en canales circulares, de donde, resolviendo una ecuación implícita se puede estimar el valor de la cabeza del flujo aguas arriba del vertedero que es el valor con el que se calculará el Q_{INTER} .

Finalmente Q_{SAN} se estimó con los parámetros de dotación, coeficiente de retorno (ETAPA EP, 2015) y población de la cuenca urbana analizada (INEC, 2010).

Con todos los términos de la ecuación de balance se obtuvo los valores de caudal de escorrentía de la lluvia Q_{RAIN} con los que se pudo construir hidrogramas, sin embargo, por la configuración de la estructura derivadora de caudales y dado que la medición de Q_{OVER} se realizó aguas abajo de la estructura hidráulica los



hidrogramas obtenidos se encontraban incompletos puesto que no se registró la información del inicio y fin de la escorrentía ya que en estos momentos el calado del flujo no supera la altura del vertedero. Para completar esta información se extrapolaron los datos de las curvas de recesión y de concentración de cada evento.

Considerando que se va realizar una estimación de los valores del coeficiente de escorrentía por cada de evento de lluvia resulta fundamental para el estudio establecer el criterio para la definición de los diferentes eventos.

De acuerdo con la literatura existen varios criterios para establecer un evento de lluvia, de los cuales destaca el conocido como tiempo mínimo inter-evento (MIT) (Larsen & Teves, 2015) que resulta ser un intervalo de tiempo mínimo en el cual no se detecta lluvia.

Para usar este criterio es necesario definir el intervalo de tiempo que separa los eventos la cual no ha sido normalizada, sin embargo, la información recogida indica que el rango de variación puede ir desde los 10 hasta los 60 minutos (Wang et al., 2008).

La selección del intervalo debe considerar el objetivo y las condiciones en las que se realiza el estudio (Dunkerley, 2008). Para el presente caso, se ha analizado además del criterio MIT los hidrogramas de escorrentía, puesto que este dato sustenta la independencia entre eventos de lluvia para el estudio del proceso lluvia-escorrentía.

Con estos antecedentes para el procesamiento de datos de la investigación se determina que el tiempo para el criterio MIT es 30 minutos, ya que se espera trabajar con lluvias de intensidades bajas y complementándolo se incluye el análisis de hidrogramas en el que se considera un evento de lluvia a aquel cuyo final de escorrentía no interfiere con el inicio de la siguiente escorrentía.

Además, es importante señalar que se ha realizado un análisis de los eventos lluvia escorrentía de manera que la información que se analice guarde coherencia, estableciéndose como criterio de verificación que el volumen de escorrentía no supere el volumen de lluvia registrado.

2.4 Determinación de humedad del suelo permeable

Tomando en cuenta que se busca realizar un análisis de la respuesta hidrológica de las microcuencas urbanas, un parámetro a considerar es la humedad de los suelos permeables, ya que por medio de esta se puede observar el comportamiento de la infiltración de estos suelos.

Para la consecución de esta información se utilizan reflectómetros, que son equipos que realizan la medición de la humedad del suelo de manera indirecta, ya que su principio de operación es la detección de pulsos electromagnéticos que se propagan

a lo largo de las varillas de la sonda. Para la determinación de la humedad se utilizan ecuaciones de calibración establecidas previamente por el fabricante del equipo y que varía de acuerdo con el tipo de suelo dónde se realizó la medición.

2.5 Estimación de los coeficientes de escorrentía C_{RATE} , C_{VOL} y C_{TEOR}

El cálculo de C_{RATE} se puede realizar utilizando la ecuación del método racional por cada evento, dónde la máxima intensidad de lluvia antes del pico de la tormenta (I) y el tiempo de duración de la tormenta, que para la metodología del método racional es igual al tiempo de concentración (T_c) son parámetros requeridos para el cálculo (Dhakal et al., 2013) (Figura 2.6).

El primer parámetro se calcula como la máxima intensidad a través de una ventana de tiempo móvil con intervalos de 5 minutos en el hietograma del evento de la tormenta (I_5). Con esta información, que correspondería a la lluvia de diseño, se construye la curva intensidad-duración aplicando el proceso inverso de la metodología de bloque alterno (Chow et al., 1994).

Para estimar el tiempo de concentración el empleo del valor medio de al menos cinco expresiones empíricas es lo que se recomienda (Vélez & Botero, 2011), mismas que responden bien a las condiciones para las que han sido desarrolladas. Además, este parámetro es una variable intrínseca de cada cuenca, ya que depende de las características morfológicas de la misma y de la lluvia que sucede. Con estos antecedentes, en este estudio se estimó T_c para cada cuenca y por cada evento lluvia escorrentía.

En este sentido el T_c para cuencas pequeñas es definido por el tiempo que transcurre desde la máxima intensidad de la lluvia hasta el pico del hidrograma, puesto que lo más importante para este tipo de cuencas es la exacta ocurrencia del caudal pico que se produce (Gericke & Smithers, 2014).

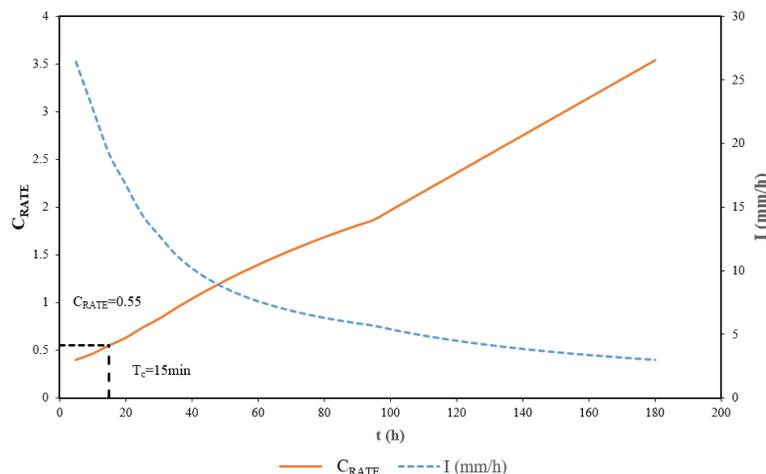




Figura 2.6. Estimación del C_{RATE} en la microcuenca T3 para el evento del 19 de marzo del 2017

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Debido a que C_{VOL} es en esencia la transformación de la lluvia en escorrentía, con la información de los hietogramas y los hidrogramas de cada evento se obtuvo el volumen de lluvia utilizando el área de la microcuenca estudiada y la altura total de lluvia registrada, mientras que, para conseguir la escorrentía se integra el área bajo la curva del hidrograma correspondiente.

El valor de C_{TEOR} , se determinó realizando una clasificación supervisada del uso de suelo del área aportante a cada microcuenca, utilizando la ortofotografía conseguida (Sriwongsitanon & Taesombat, 2011), la cual cumple con el requerimiento mínimo de tener cuatro bandas para el procesamiento de información por medio de este procedimiento.

Cómo se indicó anteriormente la ortofoto que se consiguió tiene una muy alta resolución espacial y la resolución radiométrica ha sido manipulada, esto con el objeto de que las diferentes imágenes levantadas por el SIGTIERRAS logren de tonos de color y brillo homogéneos. Esta normalización provoca que las firmas digitales de las diferentes superficies se alteren.

Con estos antecedentes, sabiendo que el análisis de la cobertura del suelo se basa en la reflectancia el proceso de clasificación de superficies se complicó, provocando que la clasificación sea menos precisa, sin embargo, este procedimiento se justifica pues no se va a realizar un análisis multitemporal con esta información.

Para la clasificación de las coberturas se utilizó el QGIS que es un software libre de Sistemas de Información Geográfica, y a través de este se empleó el complemento gratuito de código abierto Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) versiones 5.4.2 y 6.4.0 que permite la clasificación de la cobertura del suelo a partir de teledetección a partir de la creación de las regiones de entrenamiento (ROI) y algoritmos de clasificación.

El algoritmo que mejores resultados arrojó al realizar la clasificación supervisada fue el de Máxima Verosimilitud que considera fundamentos estadísticos como la densidad de probabilidad y el umbral inferior.

Durante el proceso de creación de las ROI, para corroborar que las firmas espectrales de cada tipo de cobertura sean correctas, en el SCP se las evaluó mediante la distancia espectral Jeffries-Matusita y el estadístico de similaridad de Bray-Curtis debido a que con estos métodos se puede evaluar el algoritmo de Máxima Verosimilitud (Congedo, 2016)

Además, para validar la clasificación se calculó la exactitud de esta comparándola con muestras de la imagen analizada por medio de la matriz de error o confusión. El número de muestras para el análisis se estableció de acuerdo con lo indicado por



Olofsson et al. (2014) y para su generación aleatoria dentro del área clasificada según lo señalado por Congedo (2016) utilizando la herramienta SCP (Multiple ROI creation). Con la matriz se calculó los índices de fiabilidad tales como el índice de precisión general y el índice kappa, los cuales deben ser superior a 0.85 y 0.8 para que la clasificación sea aceptable (Ravagnani et al., 2009).

Luego de identificadas y validadas las diferentes superficies, se asignó a cada una los valores del coeficiente escorrentía que se recomiendan en la literatura (Dhakal et al., 2011; Water Resources Civil Engineers American Society of Research Council Urban Federation, 1992) en función de su tipo de cobertura (Tabla 2.2) y dado que las áreas analizadas tienen múltiples tipos de cobertura se procedió con el cálculo de un coeficiente de escorrentía compuesto de las diferentes microcuencas analizadas.

Tabla 2.2. Valores del coeficiente de escorrentía teóricos

Superficie	Coeficientes de escorrentía		Referencia
	Mínimo	Máximo	
Césped, suelo arenoso, plano (0-2% pendiente)	0.05	0.1	Water Resources Civil Engineers American Society of Research Council Urban Federation, 1992
Arbol	0.28	0.68	Dhakal et al., 2011
Arbusto	0.1	0.1	Dhakal et al., 2011
Asfalto	0.7	0.95	Water Resources Civil Engineers American Society of Research Council Urban Federation, 1992
Techos	0.75	0.95	Water Resources Civil Engineers American Society of Research Council Urban Federation, 1992
Superficies de hormigón	0.75	0.95	Water Resources Civil Engineers American Society of Research Council Urban Federation, 1992
Suelo desnudo	0.15	0.25	Dhakal et al., 2011

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

2.6 Evaluación de los coeficientes de escorrentía

Previo al análisis del coeficiente de escorrentía en función de los diferentes variables que influyen en la respuesta hidrológica, se consideró importante evaluar este parámetro en función de su par teórico, ya que en la práctica, el valor del coeficiente considerado para las diferentes aplicaciones es el que se obtiene a partir de las recomendaciones de la literatura especializada. Para la evaluación se realizó un análisis individual de sus curvas de distribución acumulada, lo cual permitió comparar los valores calculados reales con respecto de los valores teóricos.

El análisis anterior se complementó con la evaluación de C_{VOL} respecto de la intensidad de lluvia, la cobertura y humedad del suelo ya que estas son variables determinantes en la respuesta hidrológica de una cuenca urbana (Cristiano et al., 2017; Yang et al., 2016). Es decir se busca relaciones causales entre estas variables.



En esta búsqueda, para el caso de las variables humedad e intensidad se estudió individualmente varios eventos dónde se registró simultáneamente esta información; para lo cual se construyeron gráficos de las variables versus el C_{VOL} , y, se complementó análisis exploratorio utilizando el análisis de componentes principales para las variables humedad e intensidad.

En cambio cuando se buscó la relación del coeficiente de escorrentía con la cobertura del suelo, entendiéndose superficie permeable e impermeable, se construyeron gráficos considerando el valor de la mediana de C_{VOL} dado que esta es una medida resistente, y el valor la superficie impermeable que se determina para cada cuenca (Dhakal et al., 2011).

3 CAPITULO III

Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de la lluvia, escorrentía y humedad

El periodo de observación de lluvias y caudales estuvo comprendida entre los meses de marzo y mayo para las tres microcuencas, época que corresponde a uno de los periodos invernales en la subcuenca del río Tomebamba.

La altura de lluvia total registradas para los meses de marzo, abril y mayo del 2017 en la estación UC fueron de 415.8 mm mientras que el promedio de la lluvia total para el mismo periodo es de 317.2 mm entre los años 2005 y 2017. La comparación mensual con los máximos, medios y mínimos se presenta a continuación (Figura 3.1).

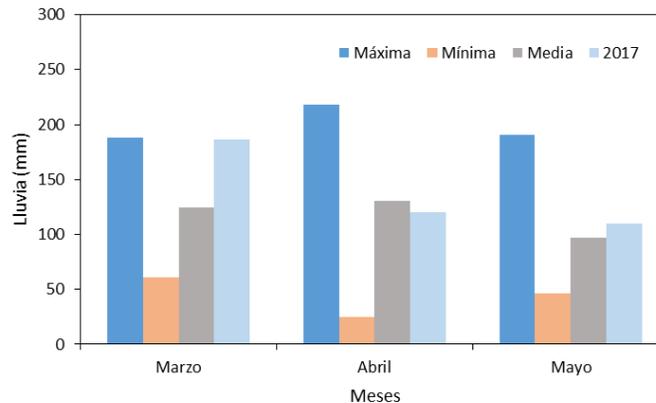


Figura 3.1. Histograma comparativo de lluvias para el periodo marzo-mayo 2017.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Como se indicó, para la medición de lluvia se utilizó las estaciones UC para las microcuencas T2 y T3 y la estación EC registró la lluvia para T1, mientras que, para medir los caudales de escorrentía de cada microcuenca en la estructura de descarga al río de sus sistemas se colocó un transductor de presión diferencial.

Es importante señalar que durante el periodo de recolección de información se produjeron discontinuidades en la medición de la escorrentía, debido principalmente a problemas con la descarga para la microcuenca T2 y T3, debido a que por su cota durante varios lapsos de tiempo estas fueron ahogadas parcialmente por aumentos en los niveles del espejo del río.

Con estos antecedentes y de acuerdo con la metodología planteada en el capítulo precedente para el análisis de los eventos lluvia-escorrentía, se obtuvieron 51 eventos en las tres microcuencas, de los cuales 27 eventos corresponden a T3, 16

a T2 y 8 a T3 (Figura 3.2), los mismos que se caracterizaron y analizaron individualmente.

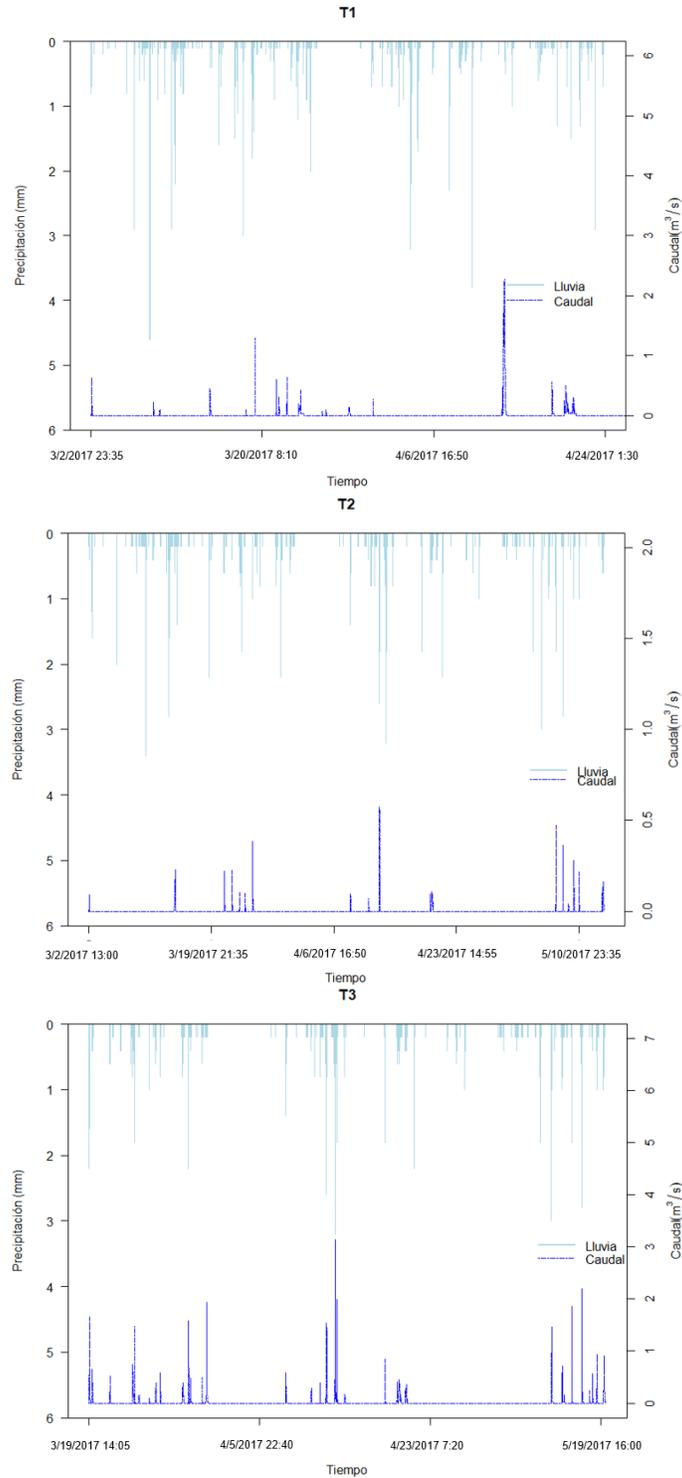


Figura 3.2. Hietogramas e hidrogramas de las microcuencas en estudio

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

En cuanto a las lluvias registradas en el periodo analizado, en la Figura 3.3 se presenta la lluvia acumulada de las estaciones consideradas, observándose que para la estación EC hay una mayor cantidad de lluvia acumulada.

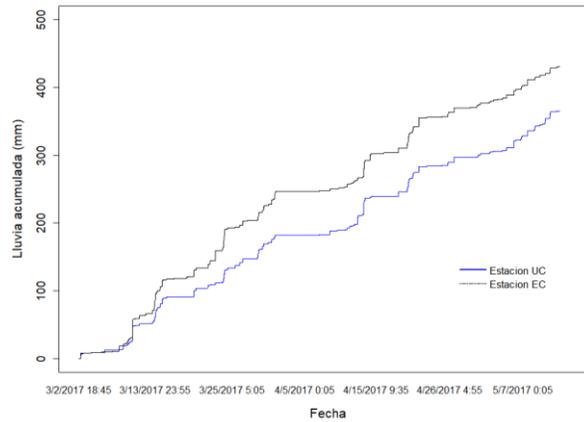


Figura 3.3. Lluvia acumulada para las Estaciones UC y EC.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Para el mismo periodo se obtuvo las intensidades máximas por cada estación, (Figura 3.4), notándose que las intensidades máximas de la estación EC son superiores a las registradas en la UC.

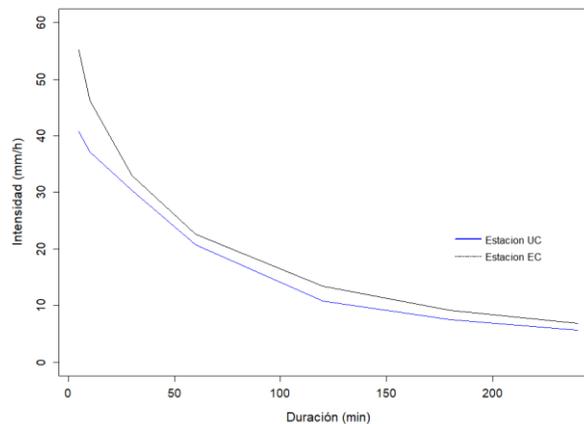


Figura 3.4. Intensidades máximas para las Estaciones UC y EC.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Las estadísticas de las lluvias y escorrentías analizadas en el presente trabajo para las diferentes microcuencas se reflejan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Estadística descriptiva de los eventos lluvia escorrentía analizados.

Estadístico	Microcuenca	Lluvia				Escorrentía	
		Altura	Duración	I_5^a	I_{60}^b	Altura	Q_p
		mm	min	mm/h	mm/h	mm	m ³ /s
Media		9.28	161.88	13.65	5.55	4.55	0.42
Mediana		7.35	95	8.4	4.15	3.58	0.28
Desviación estándar	T1	8.6	137.76	11.16	4.32	4	0.43
Máximo		26.9	385	36	13.7	19.71	1.29
Mínimo		0.9	50	3.6	0.9	0.46	0.07
Media		6.35	108.44	11.4	4.23	3.26	0.2
Mediana		4.8	82.5	7.2	3.6	2.58	0.14
Desviación estándar	T2	4.42	92.32	9.66	2.29	2.18	0.15
Máximo		15.4	390	33.6	9.8	7.44	0.57
Mínimo		1.4	35	2.4	1.4	0.74	0.04
Media		6.85	136.3	15.2	4.7	5.53	0.9
Mediana		5.6	120	12	4.2	4.96	0.59
Desviación estándar	T3	4.79	101.84	10.71	3.23	5.5	0.73
Máximo		23.6	365	38.4	16.6	17.77	3.14
Mínimo		1	5	2.4	1	0.58	0.1

^a Intensidad máxima de 5 minutos, ^b Intensidad máxima de 60 minutos

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Al analizar los datos de la altura de lluvia de la Tabla 3.1 para las diferentes áreas de estudio se puede colegir que para T2 y T3 las lluvias estudiadas presentan mayor homogeneidad comparadas con la de T1.

De la tabla anterior se puede indicar que para las lluvias estudiadas la I_{60} promedio se encuentra entre en 4.23 mm/h y 5.55 mm/h. En cuanto al volumen promedio de lluvia registrado en las microcuencas T1, T2 y T3 se tuvo 1680 m³, 1235m³ y 3836m³ respectivamente.

Considerando la metodología utilizada para la obtención de caudales de escorrentía, se puede indicar que los eventos de descarga al cuerpo receptor se producen para eventos con intensidades mínimo de 0.9 mm/h para T1, 1.4 mm/h para T2 y 1 mm/h para T3 (Tabla 3.1. Estadística descriptiva de los eventos lluvia escorrentía analizados., característica a tomar en cuenta para la evaluación de los eventos de desbordamiento en el sistema de saneamiento combinado.

Al respecto de la distribución de las 51 lluvias caracterizadas, se analizó estas según su I_{60} , en la Figura 3.5 se puede observar los eventos más frecuentes registrados para cada una de las microcuencas. De aquí se puede observar que solo un evento en T1 y T3 que supera los 10 mm/h de I_{60} , y para T2 no hay ninguno que supere este valor, asimismo, se puede indicar que hay alrededor del 38% de los eventos que superan los 5 mm/h para todas las microcuencas.

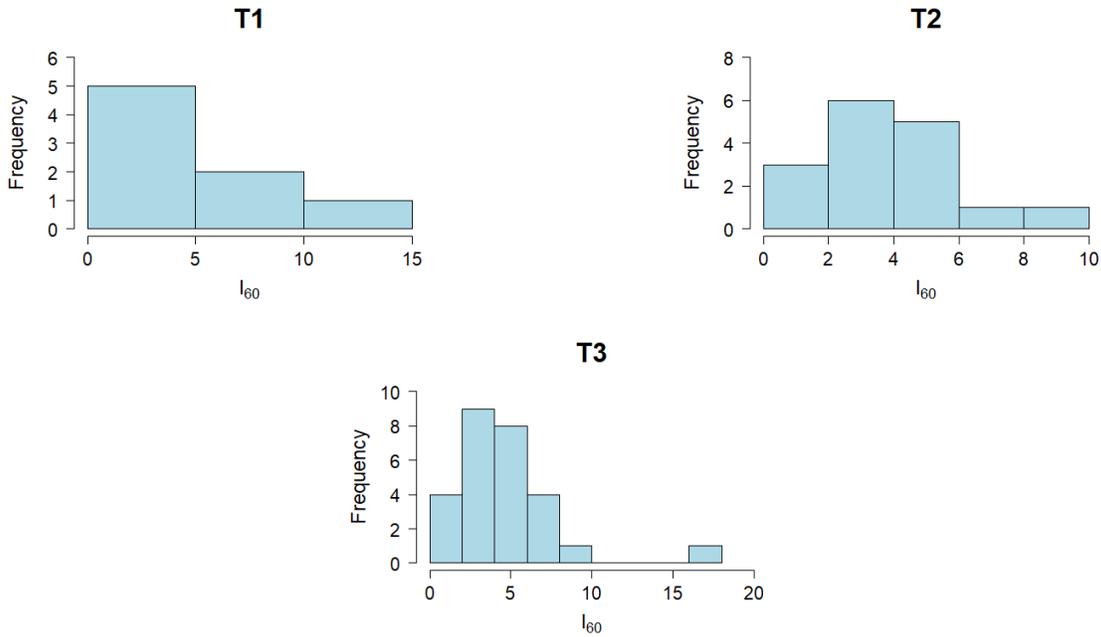


Figura 3.5. Distribución de las lluvias según I_{60} para las microcuencas de estudio.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

De los resultados de escorrentía de la Tabla 3.1 se aprecia que los Q_p promedio de las microcuencas varían entre 0.2 y 0.9 m^3/s , llegando a identificarse valores máximos de hasta 3.14, 0.57 y 1.29 m^3/s para T3, T2 y T1, respectivamente. Los volúmenes de escorrentía promedio registrados en las tres microcuencas fueron respectivamente 3097 m^3 , 634 m^3 y 824 m^3 .

Tomando en cuenta la metodología explicada en el numeral 2.5, y al tener la caracterización de la lluvia-escorrentía de los diferentes eventos por microcuenca, se estimó el tiempo de concentración de los diferentes eventos analizados, y sus principales características se muestran en la Figura 3.6.

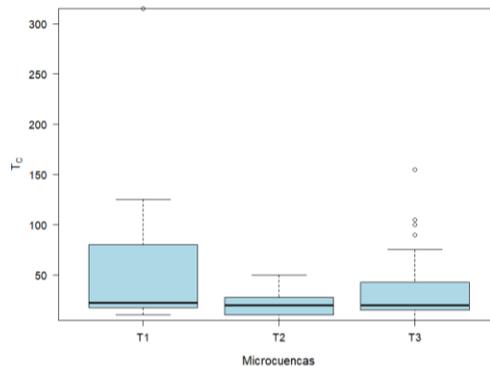


Figura 3.6. Boxplots de los tiempos de concentración para las diferentes microcuencas.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020



Al revisar la figura anterior se destaca que la mediana del T_c se encuentra alrededor de los 20 minutos para T1 y T2 mientras que para T3 se tiene 22 minutos. Además, se encontró valores atípicos extremos sobre los 130 y 80 minutos en T1 y T3.

Al calcular el T_c considerando la diferencia de tiempo entre el momento de intensidad máxima y caudal pico, nos permite tener un valor que no solo que contribuye a disminuir la incertidumbre en la estimación del coeficiente de escorrentía, sino que también, permite conocer la respuesta hidrológica de la cuenca en estudio (Gericke & Smithers, 2014) en particular se puede valorar el tiempo de respuesta a la lluvia que tienen las distintas microcuencas.

Al realizar una comparación del resultado que se obtiene al estimar el T_c para T3 de manera empírica, utilizando para ello las expresiones de la Federal Aviation Agency y Kirpich (Gericke & Smithers, 2014) se obtiene un valor de 23 minutos que comparado con la mediana de la misma microcuenca (**Figura 3.6.** Boxplots de los tiempos de concentración para las diferentes microcuencas.Figura 3.6), resulta ser superior, lo cual para el caso de la obtener C_{RATE} lo hubiera distorsionado aumentando su valor.

Con respecto a la información para representar la humedad del suelo permeable de todas la microcuencas, se contó con el reflectómetro H1, ubicado en un espacio verde particular (Figura 2.4). La toma de datos se efectuó entre abril y mayo del 2017 (Figura 3.7), provocándose un desfase respecto de la de levantamiento lluvias y escorrentía, aspectos que se ocasiona por asuntos de logística con los equipos.

Por otra parte, hay que mencionar que por problemas con los equipos la medición de la humedad en la estación H1 sufrió discontinuidades por breves periodos de tiempo, a pesar de esto, la información que se levantó pudo ser analizada.

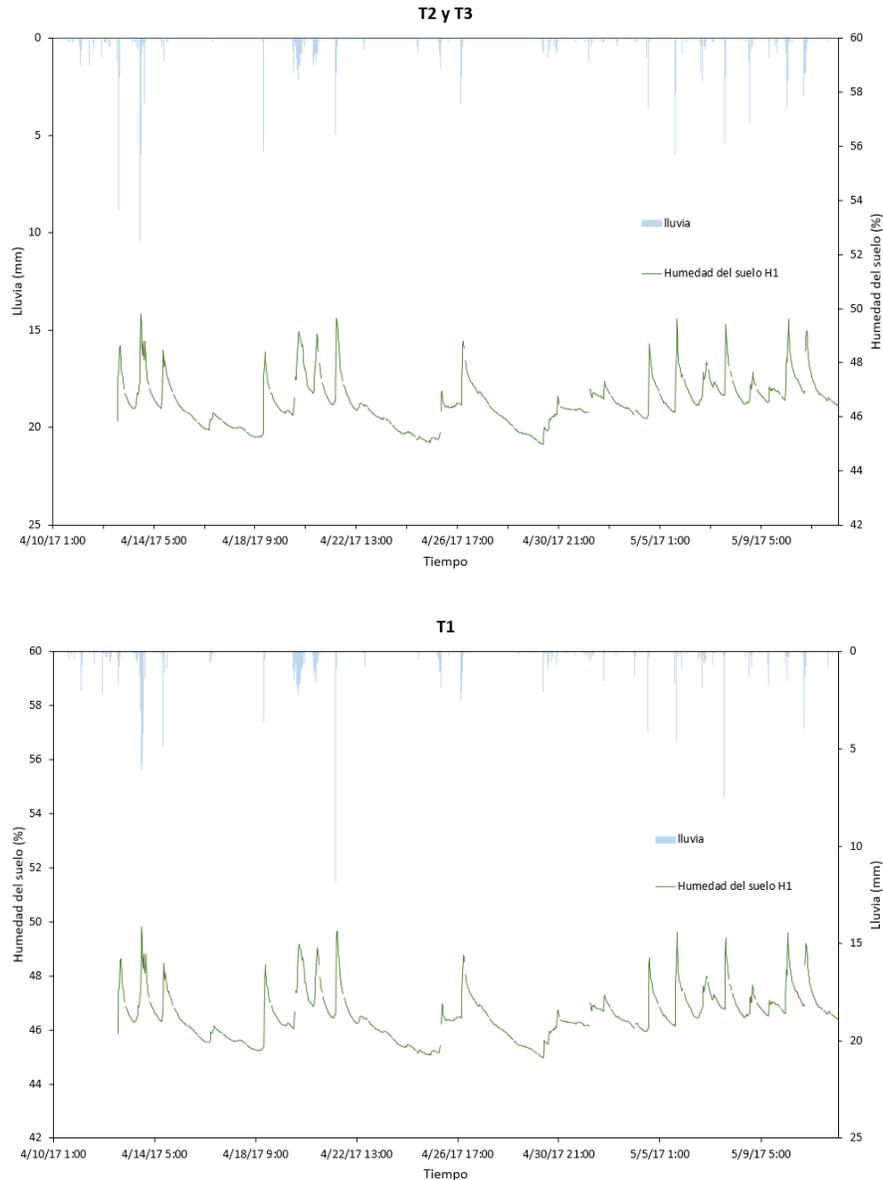


Figura 3.7. Hietogramas y variación de la humedad para la microcuencas de estudio entre abril y mayo del 2017

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

En la Figura 3.7 se puede observar que para los suelos permeables durante el periodo de monitoreo la humedad promedio para H1 se encuentra en alrededor de un 46%, mientras que el rango de variación de humedad fluctúa entre el 45% y 50%. Por otro lado, también se puede apreciar una sensibilidad de la humedad ante los eventos de lluvia más grandes.

3.2 Estimación de C_{TEOR} , C_{VOL} y C_{RATE}

Para la estimación del C_{TEOR} para cada una de las microcuencas analizadas se calculó un coeficiente de escorrentía compuesto utilizando los resultados de los tipos de superficie obtenidos mediante clasificación supervisada (Figura 3.8) y los valores del coeficiente según la literatura reportada (Tabla 2.2). En la Figura 3.8 se muestra el tipo de superficie que se obtuvo para las microcuencas y los resultados obtenidos de C_{TEOR} se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de C_{TEOR} obtenido utilizando clasificación supervisada de la ortofoto y sus índices de fiabilidad

Microcuenca	Area	Superficie impermeable	Superficie permeable	Indice de precisión general	Indice Kappa	C_{TEOR} min	C_{TEOR} med	C_{TEOR} max
	(Ha)	(%)	(%)	(%)	-	(-)	(-)	(-)
T1	18.1	82.98	17.02	84.5	0.8	0.61	0.73	0.84
T2	19.45	60.17	39.83	84.62	0.82	0.49	0.59	0.69
T3	56	81.96	18.04	85.1	0.8	0.62	0.73	0.83

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

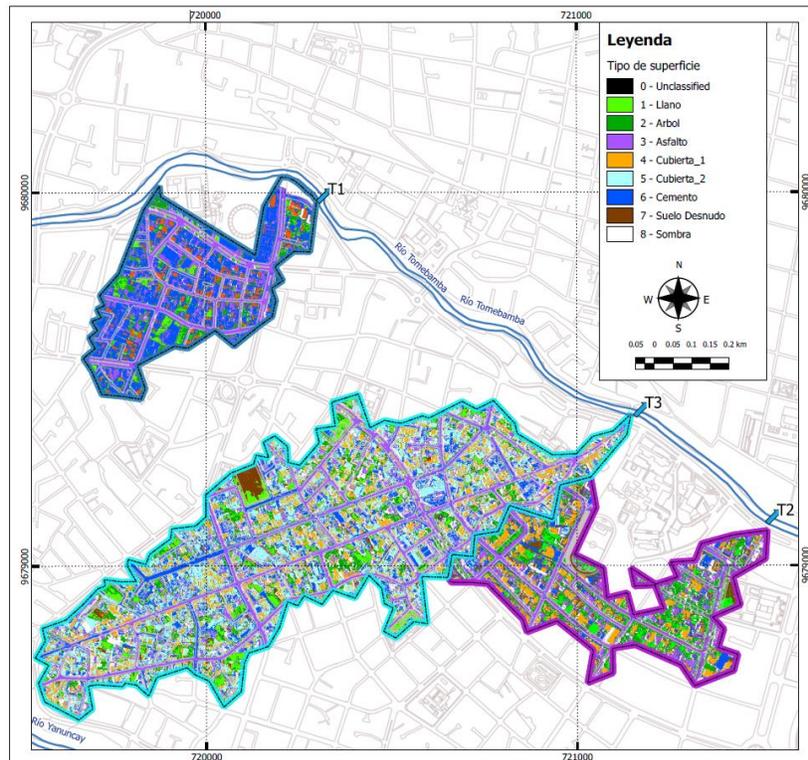


Figura 3.8. Tipos de superficie de las microcuencas en estudio usando la clasificación supervisada de la ortofoto.

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020



Los resultados de la clasificación supervisada (Figura 3.8), se presentan confiables (Tabla 3.2) ya que cumplen los criterios de confiabilidad. En cuanto al resultado de la clasificación se observó que en general que las tres áreas analizadas tienen características claramente urbanas, ya que se evidenciaron superficies impermeables mayores al 60%. En el caso de T1 y T3 se identificó que esta característica alcanzó alrededor de un 82% lo cual se clasificó zona desarrollada de alta intensidad; mientras que T2 se clasificó como urbanizada de mediana intensidad considerando la Base de Datos Nacional de Cobertura del Suelo (NLCD2011) U.S. Geological Survey (2011).

Como consecuencia de que T1 y T3 poseen valores muy semejantes de impermeabilidad en su área de aporte (Tabla 3.2), el coeficiente C_{TEOR} promedio es el mismo para estas microcuencas (0.73), mientras que al tener una mayor área permeable el C_{TEOR} promedio de T2 es menor (0.59) comparado con los valores de sus pares.

De acuerdo con los resultados que se obtienen del análisis de confiabilidad del proceso de clasificación supervisada y su validación se cumple con los indicadores requeridos, sin embargo, hay que indicar que debido a que la resolución radiométrica de la ortofoto se había editado, el proceso de clasificación se tornó complejo dando como resultado que la cantidad de píxeles mal clasificados sea mayor que el esperado al utilizar ortofotos con gran resolución espacial y cuatro bandas.

Se debe señalar también que la presencia de vegetación alta afecta los resultados de clasificación ya que su dosel se superpone a otras superficies, por ejemplo, lo que sucede en la microcuenca T2 donde en varios lugares las copas cubre las vías pavimentadas y veredas. Esta situación afecta al resultado del coeficiente de escorrentía debido a que sobre este traslape de coberturas en la realidad se provoca un efecto combinado del coeficiente de escorrentía.

Por otro lado, mediante los procedimientos detallados en el capítulo precedente se determinó el C_{RATE} y el C_{VOL} de todos los eventos lluvia-escorrentía para cada una de las microcuencas analizadas. En la Tabla 3.3 se presenta un resumen de los resultados estadísticos encontrados para el set de datos analizados y en la Figura 3.9 se observa el comportamiento de los diferentes coeficientes en las tres microcuencas.

Tabla 3.3. Resumen estadístico de los valores de C_{RATE} y C_{VOL} para las diferentes microcuencas.

Estadístico	Microcuenca	Coeficientes de escorrentía	
		C_{RATE} (-)	C_{VOL} (-)
Media		0.6	0.63
Mediana		0.61	0.61
Desviación estándar	T1	0.27	0.2
Máximo		1.33	0.87
Mínimo		0.06	0.14
Media		0.41	0.54
Mediana		0.39	0.47
Desviación estándar	T2	0.17	0.2
Máximo		0.77	0.98
Mínimo		0.14	0.31
Media		0.92	0.63
Mediana		0.7	0.65
Desviación estándar	T3	0.5	0.2
Máximo		1.66	0.97
Mínimo		0.45	0.28

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

De la Tabla 3.3 se observa que hay variación entre los resultados de C_{RATE} de las diferentes microcuencas, y sus valores de media y mediana son mayores para las áreas que tienen mayor impermeabilidad, sin embargo, a pesar de que las microcuencas T1 y T3 presentan prácticamente el mismo grado de impermeabilidad los resultados C_{RATE} entre estas tanto para la media como la mediana son disímiles al contrario de lo que se verifica con el C_{VOL} y el C_{TEOR} .

Sobre la desviación estándar de los datos que se muestra en la Tabla 3.3 para C_{RATE} y C_{VOL} , hay que mencionar que para el primer coeficiente este valor es mayor comparado con el segundo, lo cual indica para este coeficiente hay una mayor dispersión de datos y que los datos de C_{VOL} son más homogéneos.

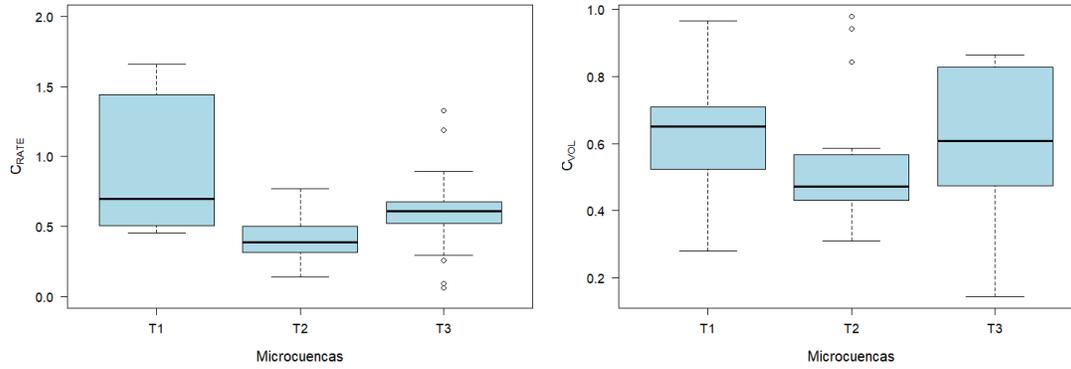


Figura 3.9. Boxplots de C_{RATE} (izquierda) y C_{VOL} (derecha) en las diferentes microcuencas.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

3.3 Evaluación de los coeficientes de escorrentía

Para la contextualización de los resultados obtenidos tanto para C_{RATE} y C_{VOL} se planteó un análisis individual respecto del C_{TEOR} mínimo y máximo, ya que en la práctica estos últimos son considerados para las diferentes aplicaciones. Para este fin se examinaron las curvas de distribución acumuladas (CDA) de cada uno considerando todos los eventos de las tres microcuencas estudiadas (Figura 3.10).

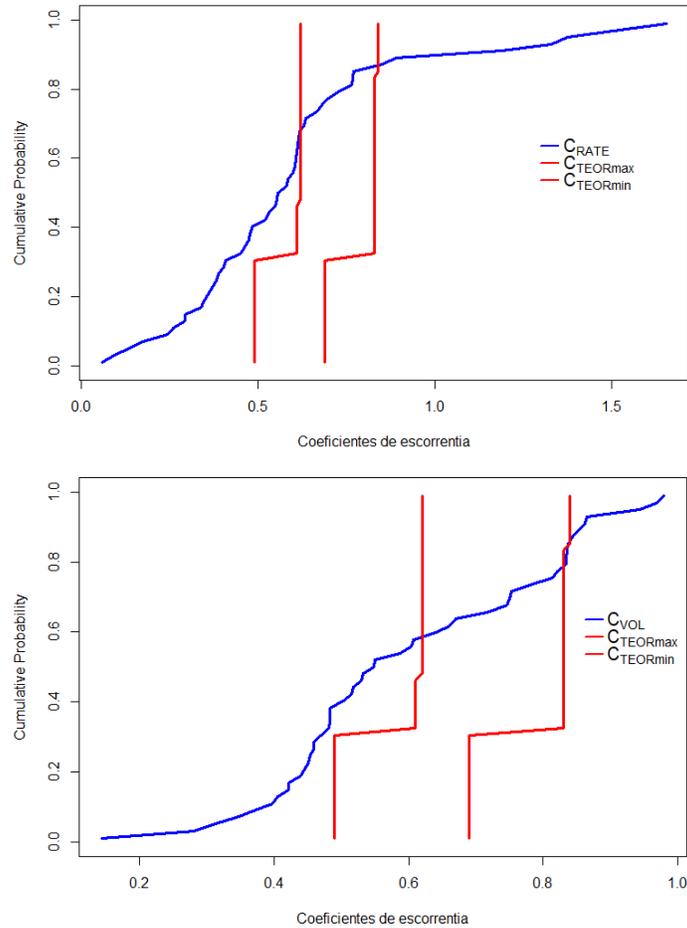


Figura 3.10. Curvas de distribución acumulada C_{RATE} vs $C_{TEOR\ min}$ y $C_{TEOR\ max}$ (arriba) C_{VOL} vs $C_{TEOR\ min}$ y $C_{TEOR\ max}$ (abajo).

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

En la Figura 3.10, se aprecia que el 38% de los valores de C_{RATE} superó el $C_{TEOR\ min}$, y el 18 % hicieron lo mismo con el $C_{TEOR\ max}$. De la misma figura, analizando C_{VOL} se encontró que el 40% de sus eventos fueron mayores que $C_{TEOR\ min}$ mientras que el 21% superaron a $C_{TEOR\ max}$. Asimismo, se observa que cuando el valor del coeficiente de escorrentía es menor que 0.82, $C_{TEOR\ max}$ es mayor tanto para C_{VOL} como para C_{RATE} .

Al examinar los resultados de los C_{VOL} y C_{RATE} frente $C_{TEOR\ máximo}$ se observa que los dos coeficientes de escorrentía tienen valores que superan el $C_{TEOR\ max}$, lo que significa que para los eventos que se estudian, incluso si se considera el valor máximo del C_{TEOR} este se encuentra subvalorado en un 18% para C_{RATE} y un 21% para C_{VOL} (Figura 3.10). Resultados similares se identificaron por Dhakal et al. (2013) y Young et al. (2009) para C_{RATE} , mientras que para C_{VOL} Dhakal et al. por (2011).

Para la evaluación de C_{VOL} en función de la respuesta hidrológica de las microcuencas, se realiza un análisis de este coeficiente respecto de cada una de

las variables que determinan la misma, como son la intensidad, lluvia total, la cobertura del suelo y su humedad.

Para iniciar la búsqueda de las relaciones entre las variables de la respuesta hidrológica y el C_{VOL} , se analizó la información de las alturas de lluvia y las de escorrentía de las diferentes microcuencas (Figura 3.11), encontrándose una relación cuadrática entre estas variables.

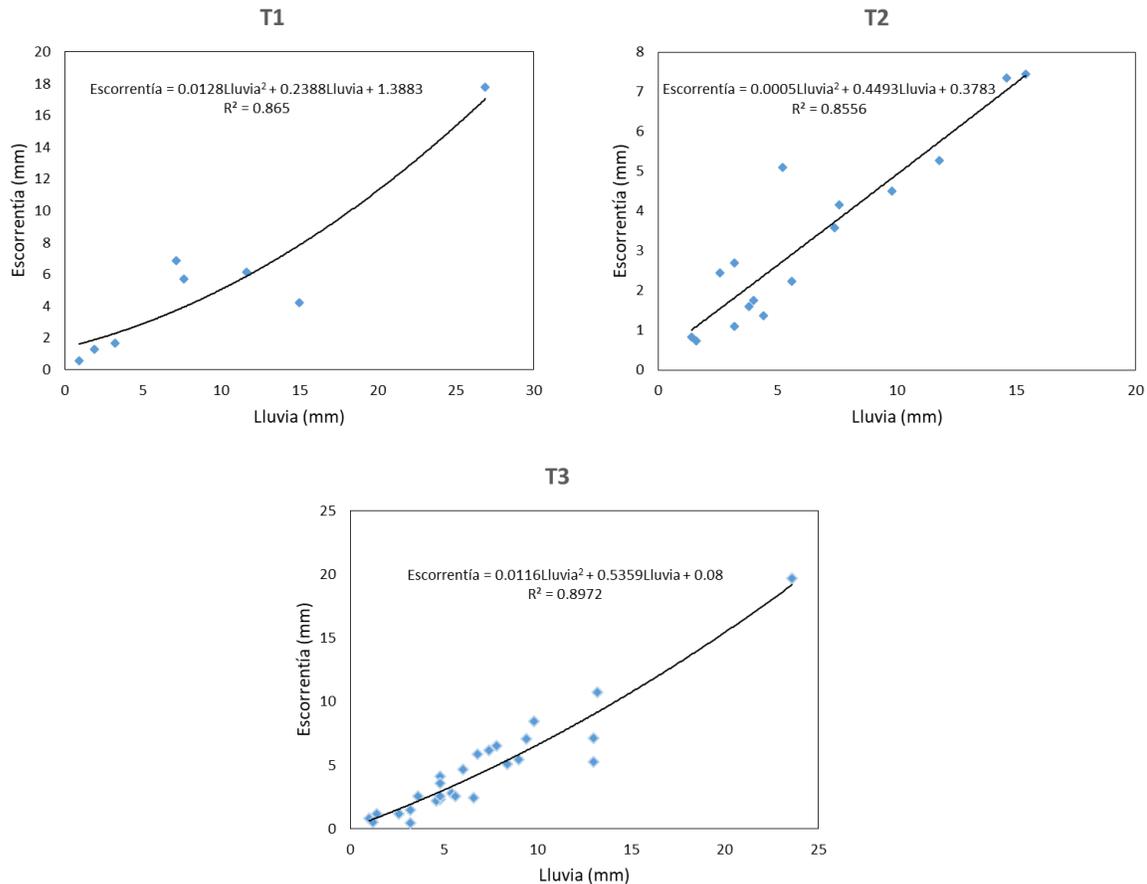


Figura 3.11. Lluvia versus escorrentía en las diferentes microcuencas.

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Con respecto a la ecuación de regresión que representa la relación lluvia-escorrentía, se puede estimar el valor de C_{VOL} que es creciente conforme aumenta la altura de lluvia que cae sobre un área, lo cual también ha sido comprobado por Yang et al. (2016) (Figura 3.11). El aumento de C_{VOL} sugiere que las pérdidas hidrológicas van perdiendo su capacidad de aumentar, es decir se va perdiendo la capacidad de infiltración en las superficies permeables mientras que lo mismo sucede con la capacidad de almacenamiento en las depresiones superficiales del suelo impermeable.

Para la evaluación de C_{VOL} se muestran la Figura 3.12 y Figura 3.13, donde se presentan gráficas que relacionan el C_{VOL} con la humedad y con la intensidad de 30 minutos (I_{30}) respectivamente.

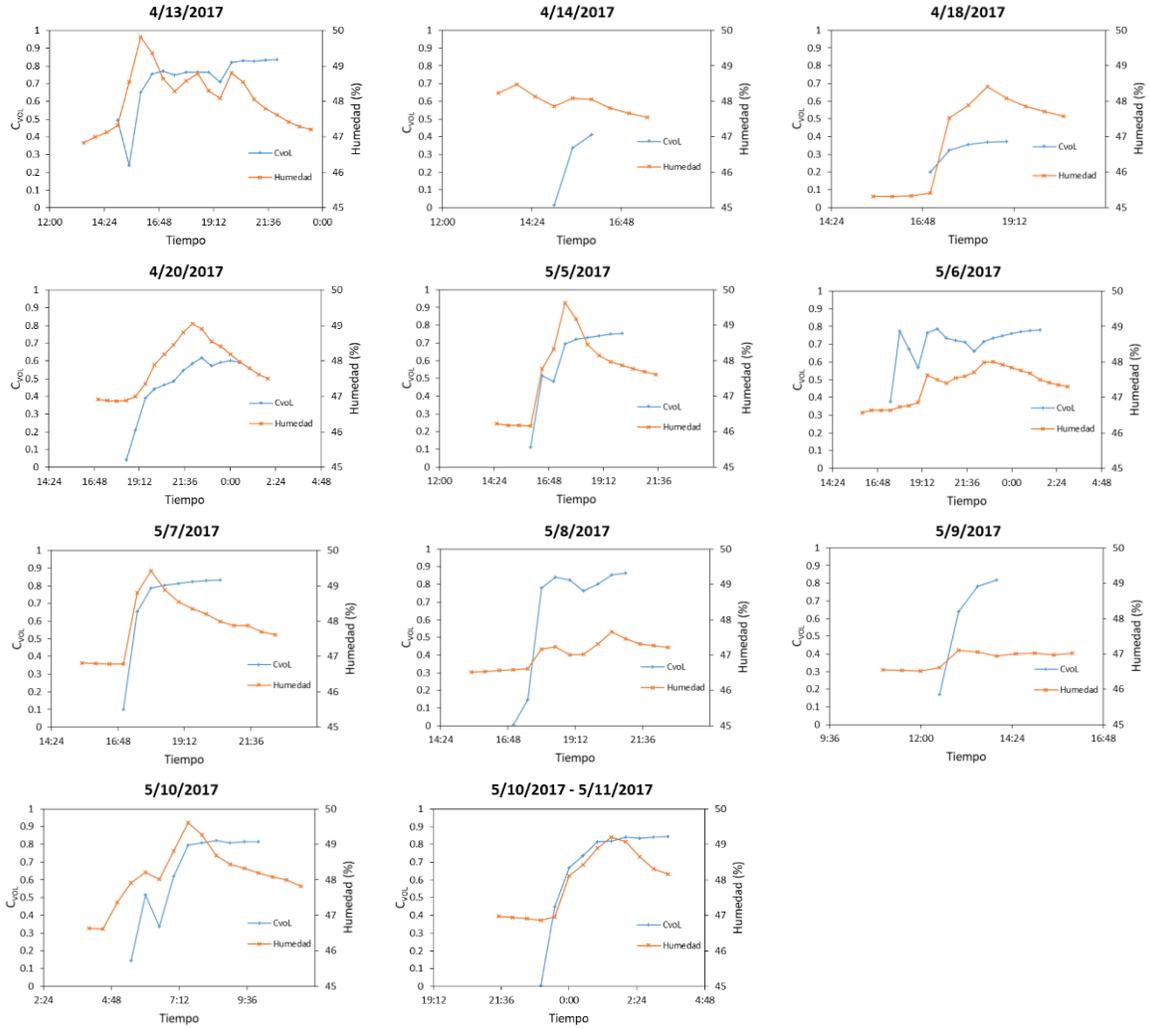


Figura 3.12. Relaciones entre el C_{VOL} y la humedad del suelo cada 30 minutos.
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

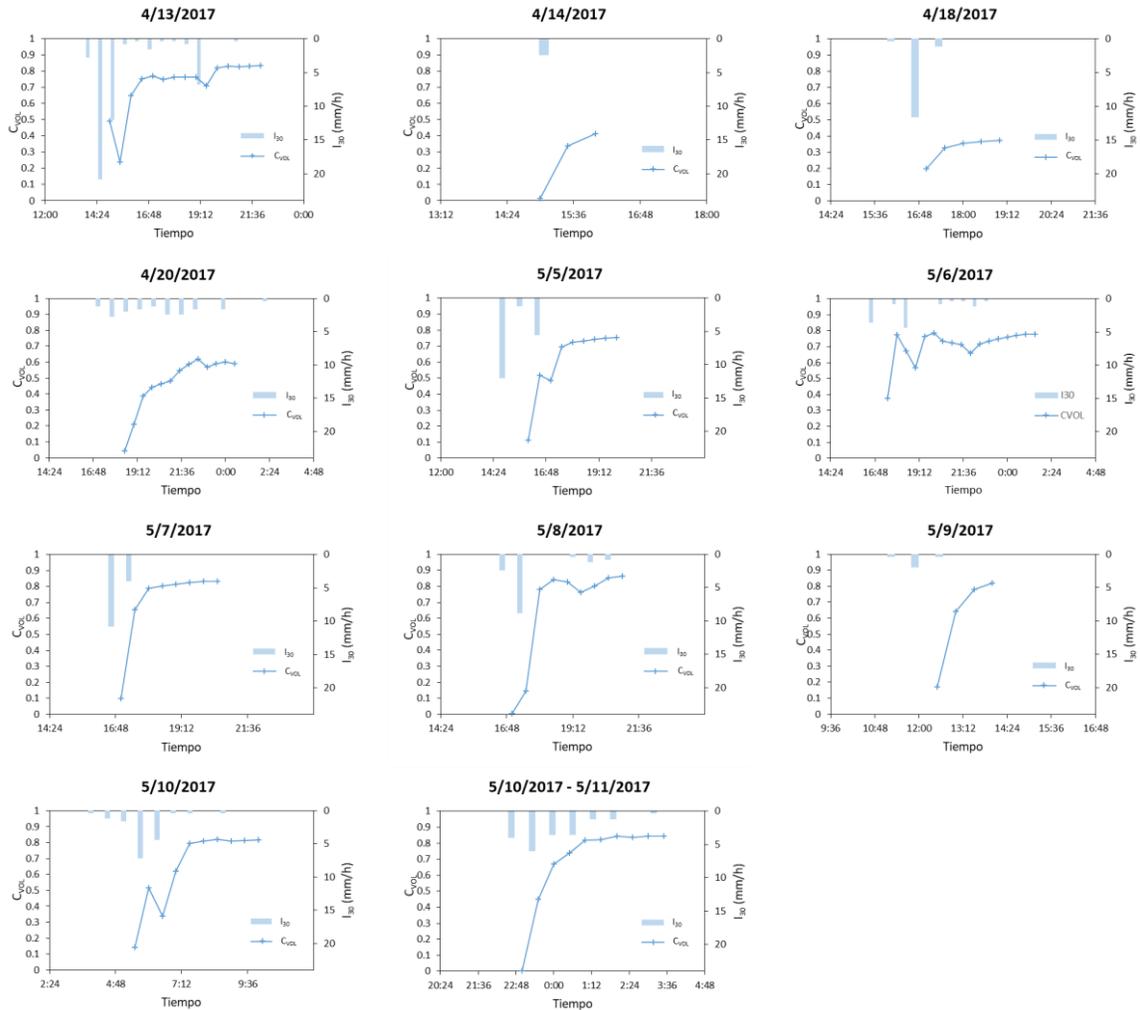


Figura 3.13. Relaciones entre I_{30} y C_{VOL} .
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Al revisar la Figura 3.12 se puede colegir que al finalizar los eventos lluvia-escorrentía, entre los meses de abril y mayo la humedad del suelo permeable se incrementó respecto de su valor previo a iniciar estos eventos, a pesar de que durante el desarrollo de estos se observó que la humedad tiene una fase ascendente y una descendente.

Analizando con más detalle la información, se encontró que el rango de humedad entre el inicio del evento lluvia-escorrentía y su valor máximo es en promedio el 1.9%, mientras que la humedad entre el inicio y el fin de los eventos lluvia-escorrentía alcanza a subir en promedio un 1%.

Por otro lado, se aprecia también que mientras la humedad está en su rama ascendente C_{VOL} también está en aumento y cuando esta empieza a decaer el coeficiente deja de aumentar y empieza a estabilizar su valor.

En cuanto a la búsqueda de una relación causal entre la I_{30} y C_{VOL} (Figura 3.13) se visualizó que ante la presencia de intensidades altas el coeficiente aumenta su tasa de crecimiento notablemente y este efecto es aún más notable cuando hay varias intensidades altas dentro de un mismo evento.

Para confirmar lo indicado anteriormente se realizó un análisis exploratorio mediante el Análisis de componentes principales entre las variables I_{30} , Caudales de 30 minutos (Q_{30}), Humedad y C_{VOL} , para buscar una relación causal entre estas variables

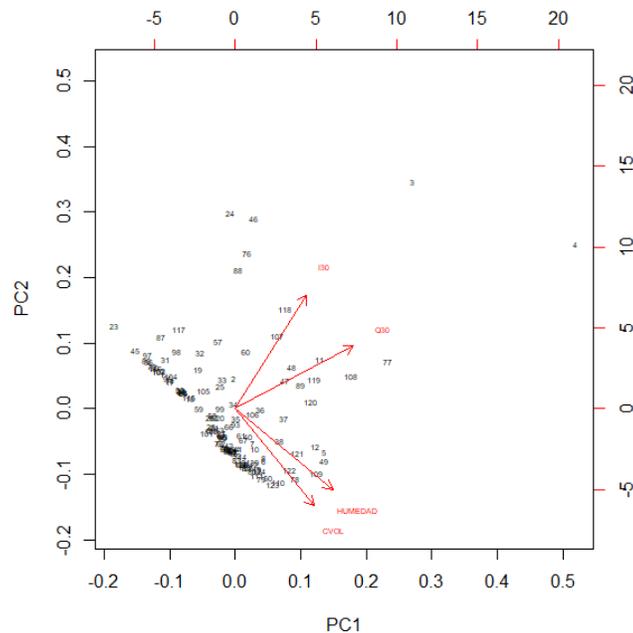


Figura 3.14. Biplot del Análisis de componentes principales entre la humedad, I_{30} y Q_{30} .
Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

Al revisar los resultados del gráfico biplot (Figura 3.14) se comprobó que efectivamente hay una correlación lineal positiva entre la humedad y el C_{VOL} debido a la coincidencia de los ángulos de los respectivos vectores; mientras que entre I_{30} y C_{VOL} no se evidencia correlación lineal. Vale la pena indicar también que se observa que hay correlación en Q_{30} e I_{30} .

Los resultados del análisis del comportamiento de la humedad del suelo permeable con respecto al C_{VOL} muestran que hay una correlación lineal positiva entre estas variables, confirmando lo encontrado en otros estudios (Sriwongsitanon & Taesombat, 2011) (Figura 3.14). Esto indica que durante un evento lluvia-escorrentía si hay ascenso de la humedad en el suelo el C_{VOL} también subirá hasta que la tasa de infiltración del suelo supere la tasa de incremento de la humedad Figura 3.12.

En cuanto al comportamiento de los suelos permeables de acuerdo con Cristiano et al. (2017), estos actúan como suelos semi-impermeables a causa del proceso de

compactación que sufren en los diferentes procesos de urbanización, lo cual con los resultados encontrados se confirma al tener un rango de incremento de la humedad entre el inicio y el fin de los eventos lluvia escorrentía de solo el 1% como promedio.

Sobre al análisis de la intensidad de lluvia, de acuerdo con Yang et al. (2016) esta es una variable a la que la respuesta hidrológica de una cuenca es muy sensible, por tanto, es importante que sea relacionada con el coeficiente de escorrentía.

Al analizar el comportamiento de la intensidad de lluvia en el presente trabajo se observa que ante un pulso relativamente alto se produce un cambio súbito en la tasa de crecimiento del C_{VOL} y cuando la intensidad se mantiene constante o disminuye durante el evento el coeficiente no presenta grandes incrementos (Figura 3.13). Con este antecedente se busca si hay una correlación lineal entre la intensidad y el C_{VOL} , lo que no se verifica. Este resultado no es ilógico ya que por concepto el C_{VOL} evalúa el balance hídrico de los eventos de tormenta y, además, esto no quiere decir que no haya correlación entre estas variables, sino que puede existir otro tipo de correlación diferente a la lineal (Figura 3.14).

Finalmente, para analizar la relación entre C_{VOL} y la cobertura del suelo, dado que de un análisis de correlación entre estos parámetros se obtuvo un coeficiente de correlación de $r=0.96$ se plotearon la mediana del coeficiente de cada microcuenca versus su correspondiente porcentaje de área impermeable (Figura 3.15).

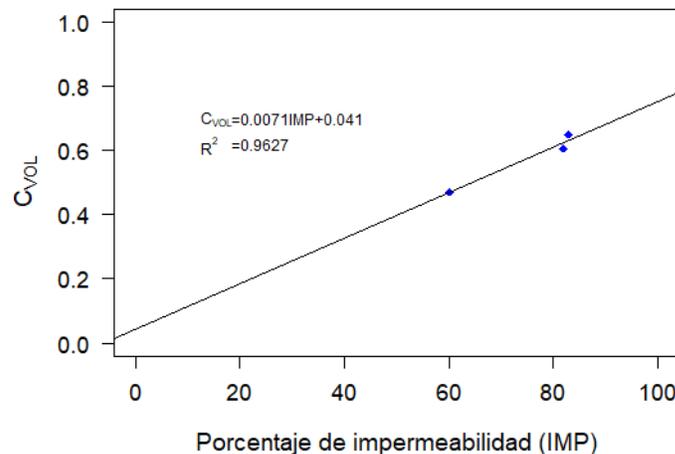


Figura 3.15. C_{VOL} versus porcentaje de área impermeable de las microcuencas.

Elaboración: Ricardo Rubio, 2020

La ecuación de regresión lineal obtenida para estos datos tiene un buen ajuste ($R^2=0.96$), pero de acuerdo con el análisis de las características de regresión los valores de significancia son del 10% para el término independiente y del 85% para la pendiente.



En relación a los efectos de la cobertura de la superficie sobre el coeficiente de escorrentía C_{VOL} , esto ha sido ampliamente estudiado y se ha determinado que el coeficiente de escorrentía se incrementa cuando se aumenta el porcentaje de área impermeable (Dhakal et al., 2011; Tucci & others, 2001), en el presente caso esta tendencia se comprueba y se verifica ya que los datos presentan una correlación lineal positiva ($r=0.96$) (Figura 3.15).

Por otro lado, el análisis de la relación de C_{VOL} con la impermeabilidad Dhakal et al. (2011) al estudiar 45 cuencas urbanas encontró una relación polinómica cúbica para estimar C_{VOL} , en el presente estudio con la información disponible se establece que la relación es lineal entre la impermeabilidad y el C_{VOL} . A pesar de la bondad del ajuste que se consigue con la regresión lineal ($R^2=0.96$) al revisar las características de la regresión se observa que ni el intercepto ni la pendiente tienen buenos valores de significancia, esto se considera que es debido a que el número de datos usados para la regresión lineal es muy pequeño. Además, si se realiza el ejercicio de estimar el C_{VOL} para una impermeabilidad del 100% el resultado es diferente de uno que es lo que se debería tener, siendo necesario incrementar el número de puntos para estudiar esta relación.



4 CAPITULO IV

Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones y observaciones

Al respecto de la estimación de los coeficientes de escorrentía se puede concluir que mediante los diferentes enfoques (C_{RATE} y C_{VOL}) se obtuvieron valores razonables acordes con el grado de impermeabilidad que presenta cada microcuenca estudiada.

Al contrastar los valores de C_{RATE} y C_{VOL} con $C_{TEORmax}$, en los eventos estudiados los primeros, son superiores en 18% y 21% de los valores a $C_{TEORmax}$.

El potencial que tiene la percepción remota para generar cartografía de coberturas de suelo facilita y mejora los resultados de los coeficientes de escorrentía C_{TEOR} .

En relación al comportamiento del C_{VOL} frente a las variables que determinan la respuesta hidrológica, se encontraron correlaciones lineales positivas con la humedad del suelo permeable y con la superficie impermeable, no así para la intensidad de la lluvia a pesar de que se evidenció una respuesta de C_{VOL} incrementos súbitos de intensidad.

La ecuación que relaciona el C_{VOL} con la impermeabilidad de las cuencas es un primer intento para la relacionar estos parámetros y se considera adecuada si se la utiliza en cuencas que se con características similares a las analizadas, sin embargo, para tener una relación mucho más confiable es necesario continuar realizando este tipo de estudios en otras microcuencas para contar con mayor número de datos.

Es relevante indicar que la presente investigación se ha visto limitada por no contar con datos de campo relativos al coeficiente de rugosidad (n), al Q_{SAN} y el caudal de infiltración del sistema de evacuación de aguas lluvias para poder representar de mejor manera el comportamiento del área de estudio, además de no contar con un periodo más largo de información de la humedad del suelo permeable de las microcuencas. Sin embargo, se considera que, con las pautas establecidas en la metodología aplicada, las limitaciones indicadas y cualquier error que se pueda haber derivado a partir del sistema empleado para la medición del Q_{OVER} provoca que los resultados que se han obtenido puedan ser considerados confiables.



4.2 Recomendaciones

Para mejorar los resultados de las estimaciones de C_{RATE} y C_{VOL} , se recomienda incluir un análisis mediante software especializado que permita valorar el impacto que tiene el volumen de almacenamiento en la red de evacuación de agua lluvia.

Se recomienda que para la aplicación del método racional se usen los valores de C_{RATE} , ya que estos se corresponden con el concepto inherente a esta metodología de cálculo de caudales pico y que para las determinaciones de pérdidas hidrológicas, modelaciones hidrológicas y para propósitos de diseño de volumen de escorrentía de control de calidad de aguas pluviales se utilice C_{VOL} .

Se recomienda analizar un mayor número de microcuencas para validar y mejorar la ecuación que relaciona a C_{VOL} con el porcentaje de impermeabilidad de las microcuencas.

De la misma manera que para C_{VOL} , se debe ampliar el número de análisis para obtener un coeficiente C_{RATE} promedio en función del área permeable e impermeable de las microcuencas mediante la metodología que plantea (Tucci et al., 2001) y sean representativos de la realidad local.

Es importante indicar que este trabajo es una primera aproximación a la estimación de los coeficientes de escorrentía en una cuenca urbana y su evaluación, por lo que se es recomendable y necesario contrastar los resultados obtenidos con resultados de otras cuencas y realizar el monitoreo un mayor periodo de tiempo.

5 Referencias

- Ahm, M., Thorndahl, S., Rasmussen, M. R., & Basso, L. (2013). Estimating subcatchment runoff coefficients using weather radar and a downstream runoff sensor. *Water Science and Technology*, 68(6), 1293–1299. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.371>
- Ávila, H. (2012). Perspectiva del manejo del drenaje pluvial frente al cambio climático - caso de estudio: ciudad de Barranquilla, Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 54–59. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=87049763&lang=es&site=ehost-live>
- BID CE3. (2014). *Cambio Climático, Riesgos Naturales y Crecimiento Urbano en ciudades emergentes y sostenibles 13-024. Estudio CE 3 Crecimiento urbano en la Ciudad de Cuenca*. Cuenca Ecuador.
- Blume, T., Zehe, E., & Bronstert, A. (2007). Rainfall—runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 843–862. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.52.5.843>
- Bos, M.; Boiten, W.; Pitlo, R.; de Vries, A.; Kraijenhoff van de Leur, D.; Oostinga, H.; Wijidiéks, J. (1989). Discharge measurement structures. In M. G. Bos (Ed.), *ILRI Publication (3. rev. ed)*. Wageningen, Nederl: ILRI.
- Carrión, F. (2001). Las nuevas tendencias de la urbanización en América Latina. *La Ciudad Construida. Urbanismo En América Latina*, 7–23. Retrieved from <https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/7097/7128/7129/83555.pdf#page=7>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada (Primera ed). Retrieved from <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=librosslp.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=002691>
- Clemmens, A. J., Bos, M. G., & Replogle, J. A. (1984). RBC broad-crested weirs for circular sewers and pipes. *Global Water: Science and Engineering The Ven Te Chow Memorial Volume*, 68(1), 349–368. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90220-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90220-8)
- Congedo, L. (2016). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 6.0.1.1*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- Cristiano, E., ten Veldhuis, M., & van de Giesen, N. (2017). Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas – a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3859–3878. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3859-2017>



Dhakai, N., Fang, X., Asquith, W. H., Cleveland, T. G., & Thompson, D. B. (2013). Rate-Based Estimation of the Runoff Coefficients for Selected Watersheds in Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(12), 1571–1580. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000753](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000753)

Dhakai, N., Fang, X., Cleveland, T. G., Thompson, D. B., Asquith, W. H., & Marzen, L. J. (2011). Estimation of Volumetric Runoff Coefficients for Texas Watersheds Using Land-Use and Rainfall-Runoff Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 43–54. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000368](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000368)

Dunkerley, D. (2008). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024–5036. <https://doi.org/10.1002/hyp.7122>

ETAPA EP, U. (2015). *Análisis de la demanda de agua potable*. Cuenca.

Gericke, O. J., & Smithers, J. C. (2014). Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 1935–1971. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712>

Grimaldi, S., & Petroselli, A. (2014). Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, 60(1), 67–77. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.880546>

Guo, J. C. Y. (2017). *Urban Flood Mitigation and Stormwater Management*. <https://doi.org/10.1201/b21972>

INEC. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Retrieved May 10, 2018, from <http://redatam.inec.gob.ec/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010&MAIN=WebServerMain.inl>

Larsen, M. L., & Teves, J. B. (2015). Identifying Individual Rain Events with a Dense Disdrometer Network. *Advances in Meteorology*, 2015, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2015/582782>

Marsalek, J., Cisneros, B. J., Karamouz, M., Malmquist, P.-A., Goldenfum, J. A., & Chocat, B. (2008). *Urban Water Cycle Processes and Interactions: Urban Water Series-UNESCO-IHP* (Vol. 2). Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=UXJXJgQCVUwC&oi=fnd&pg=PP1&dq=urban+water+cycle+processes++and+interactions&ots=2Yefk455Qr&sig=7HZXo618EREr8Cg2Rd9BL71ZVyo>

Mays, L. W. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook* (First edit; McGraw-Hill Education, Ed.). <https://doi.org/10.10360071354719>

Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban



- catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414002856>
- Mora, D., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). *Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22094>
- Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L.-P., Gires, A., Pina, R. D., Reinoso-Rondinel, R., Bruni, G., ... ten Veldhuis, M.-C. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. *Journal of Hydrology*, 531, 389–407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.035>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- ONU. (2015, November 16). Ciudades y Comunidades Sostenibles. *Desarrollo Sostenible*. Retrieved from <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1993). Flood runoff. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology* (pp. 9.1-9.42). New York: New York, McGraw-Hill.
- Ravagnani, F., Pellegrinelli, A., & Franchini, M. (2009). Estimation of urban impervious fraction from satellite images and its impact on peak discharge entering a storm sewer system. *Water Resources Management*, 23(10), 1893–1915. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9359-0>
- Rey-Valencia, D., & Zambrano, J. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. *Assessment of Runoff Response in San Luis - Palogrande Small Urban Mountain Watershed.*, 17(1), 115–125. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=127317708&lang=es&site=ehost-live>
- Robinson, M., & Ward, R. C. (2017). *Hydrology : principles and processes* (First). London: IWA Publishing.
- Rose, S., & Peters, N. (2001). Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach. *Hydrological Processes*, 15(8), 1441–1457. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.218/abstract>
- Sriwongsitanon, N., & Taesombat, W. (2011). Effects of land cover on runoff coefficient. *Journal of Hydrology*, 410(3–4), 226–238.



<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.021>

- Tucci, C. E. M. (2007). Urban flood management. *WMO and Capnet*. Retrieved from [http://www.apfm.info/publications/manuals/Cap-Net WMO Urban Flood Management.pdf](http://www.apfm.info/publications/manuals/Cap-Net%20WMO%20Urban%20Flood%20Management.pdf)
- Tucci, C. E. M., & others. (2001). Urban drainage in humid tropics. *MAKSIMOVIC, C. Urban Drainage in Specific Climates. Paris: UNESCO, 1.*
- U.S. Geological Survey. (2011). National Land Cover Database 2011 (NLCD2011) Legend | Multi-Resolution Land Characteristics (MRLC) Consortium. Retrieved January 18, 2020, from <https://www.mrlc.gov/data/legends/national-land-cover-database-2011-nlcd2011-legend>
- Urban Drainage Standards Committee of the Standards Development Council of the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers. (2006). Standard Guidelines for the Design of Urban Stormwater Systems. In *American Society of Civil Engineers (ASCE)*. Reston, Va: American Society of Civil Engineers.
- Vaes, G., Willems, P., & Berlamont, J. (2005). Areal rainfall correction coefficients for small urban catchments. *Atmospheric Research, 77*(1–4), 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.015>
- Valbuena, M. (2016). *Rehabilitación de redes de alcantarillado mediante técnicas LID, usando SWMM5 en un caso real*. Retrieved from <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/99124>
- Vélez, J. J., & Botero, A. (2011). Estimación Del Tiempo De Concentración Y Tiempo De Rezago En La Cuenca Experimental Urbana De La Quebrada San Luis, Manizales. *Dyna, 78*(165), 58–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622372006>
- Visessri, S., & McIntyre, N. (2016). Regionalisation of hydrological responses under land-use change and variable data quality. *Hydrological Sciences Journal, 61*(2), 302–320. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1006226>
- Wai, K. M., Wang, X. M., Lin, T. H., Wong, M. S., Zeng, S. K., He, N., ... Wang, D. H. (2017). Observational evidence of a long-term increase in precipitation due to urbanization effects and its implications for sustainable urban living. *Science of the Total Environment, 599–600*, 647–654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.014>
- Wang, J., Fisher, B. L., & Wolff, D. B. (2008). Estimating Rain Rates from Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 25*(1), 43–56. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA895.1>
- Water Resources Civil Engineers American Society of Research Council Urban Federation, W. E. (1992). *Design and construction of urban stormwater management systems*. Retrieved from American Society of Civil Engineers ;



Water Environment Federation website:

<http://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780872628557>

World Meteorological Organization, (WMO). (2008). Guía de prácticas hidrológicas Volumen I Hidrología – De la medición a la información hidrológica. In *WMO* (6a ed.). Retrieved from <http://www.whycos.org/hwrp/guide/index.php>

Wright, D. B., Smith, J. A., & Baeck, M. L. (2014). Critical Examination of Area Reduction Factors. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4), 769–776. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000855)

Yang, L., Smith, J. A., Baeck, M. L., & Zhang, Y. (2016). Flash flooding in small urban watersheds: Storm event hydrologic response. *Water Resources Research*, 52(6), 4571–4589. <https://doi.org/10.1002/2015WR018326>

Yao, L., Wei, W., & Chen, L. (2016). How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? *Ecological Indicators*, 60, 893–905. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X15004732>

Young, C. B., McEnroe, B. M., & Rome, A. C. (2009). Empirical Determination of Rational Method Runoff Coefficients. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(12), 1283–1289. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000114)

Zambrano, N. (2015). *Recolección de aguas residuales* (Primera ed; U. del C. Lemoine Editores, Ed.). Popayán.