



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Desarrollo de un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de
Loja, empleando datos radar.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Capa Salinas, José Vicente

DIRECTOR: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, Dr.

LOJA – ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Doctor

Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Desarrollo de un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja, empleando datos radar**, realizado por **Capa Salinas José Vicente**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2017

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Capa Salinas José Vicente declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Desarrollo de un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja, empleando datos radar, de la Titulación Ingeniería Civil, siendo Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f).....

Autor: Capa Salinas José Vicente

Cédula: 1106005505

DEDICATORIA

El presente trabajo de fin de titulación está dedicado a todas aquellas personas que alguna vez pensaron en claudicar, en dejarse vencer pero que al final tomaron un segundo aliento y siguieron. A todos aquellos que escucharon a alguien decir que eran inútiles, que deberían rendirse, que sus sueños eran irrealizables; pero que al día siguiente se levantaron con ganas de demostrar a sí mismos que estaban equivocados.

Se lo dedico a todas esas personas maravillosas que he conocido y a las que todavía no, que luchan cada día por cambiar este mundo.

Lo sueños pueden llegar a ser tan grandes como uno lo desee.

Y se cumplen.

Para aquellos que luchan.

AGRADECIMIENTO

Mi primer agradecimiento siempre será a Dios, por guiar mi accionar y permitirme conocer personas maravillosas y vivir momentos excepcionales que me han formado como ser humano.

En una carta dirigida hacia el científico Robert Hooke, Isaac Newton citaba a Bernardo de Chartres diciendo que "si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes". Aquí el nombre de algunos gigantes:

A mi mamá Aura, que con su apoyo incondicional, paciencia y amor de madre me guía siempre por el buen camino, me da fuerzas para continuar cuando más lo necesito y se preocupa de cada aspecto de mi vida.

A mi papá Marcelo, que con su constante sacrificio y entrega, me demuestra siempre el verdadero ejemplo de un buen padre. Agradecerle también porque es el único que sin preguntar dos veces accede ayudarme a instalar un nodo sobre un río.

A mi hermanita Andrea, mi primera amiga y confidente, con quién puedo contar hasta en mis más descabelladas ideas, por demostrarme lo que es capaz alguien que lucha por sus sueños hasta que los consigue. Has sido una verdadera inspiración para mí.

Al Dr. Fernando Oñate Valdivieso, quien con su paciencia y conocimiento dio forma a este Trabajo de Fin de Titulación; siendo más que un profesor un amigo, a quien agradezco por el tiempo dedicado en sus revisiones y sus sabios consejos.

Al Ing. Manuel Quiñones, Gabriela Mendieta y Darío Valarezo, quienes desinteresadamente me ayudaron con la configuración, instalación y actualización del nodo usado para la calibración del modelo.

Al Ing. Franz Pucha, por su colaboración con la calibración de las imágenes del radar LAWR.

Al Ing. Santiago Quiñones, por el tiempo empleado en la implementación del modelo en el Hydrovlab y por sus sugerencias en cuanto a la programación.

A Arianna Oñate, mi amiga incondicional en la vida universitaria y social, por ser una acompañante en mis ideas, aventuras y por ayudarme incluso cuando no sabía que lo hacía. Finalmente, a la Universidad Técnica Particular de Loja, quien me acogió con puertas abiertas, a su planta docente, administrativa y de servicio, los cuales formaron mi segundo hogar por estos últimos años.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....	5
1.1. Modelo lluvia escorrentía.....	6
1.2. Radar LAWR.....	9
1.3. Modelo lluvia escorrentía con datos de Radar.....	11
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	12
2.1. Zona de estudio	13
2.2. Modelo Lluvia Escorrentía	14
2.3. Precipitación total.....	16
2.4. Precipitación efectiva.....	17
2.5. Hidrograma Unitario Sintético Adimensional del Soil Conservation Service.....	17
2.5.1. Parámetros hidrológicos aplicados al Hidrograma Unitario Sintético.....	18
2.6. Hidrograma de Crecida.....	20
2.7. Método Muskingum – Cunge.....	20
2.7.1. Tramos determinados para el tránsito de avenidas.....	20
2.7.2. Parámetros K y X del Método Muskingum – Cunge.....	21
2.7.3. K y X como variables dependientes.....	24
2.7.4. Altura del agua mediante tanteos.....	26
2.7.5. Constantes del Método Muskingum – Cunge.....	26

2.7.6.	Ecuación del Caudal Transitado - Método Muskingum – Cunge.	27
2.7.7.	Principio de superposición de causas, efectos y Tránsito de Hidrogramas. .	27
2.7.8.	Calibración del modelo.	27
2.7.9.	Aforos.....	29
2.7.10.	Extrapolación de la Curva de Descarga.....	29
2.7.11.	Ajustes al modelo.....	32
2.8.	Programación del modelo lluvia escorrentía para Hydrovlab.	32
2.8.1.	Generalidades de la programación	32
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN		34
3.1.	Hidrogramas de Subcuencas e Intercuencas	35
3.2.	Número de la Curva.....	35
3.3.	Parámetros Hidrológicos	35
3.4.	Hidrograma de Crecida.....	36
3.5.	Método Muskingum – Cunge.....	37
3.5.1.	Altura de agua registrada por el nodo.....	37
3.5.2.	Aforos.....	37
3.5.3.	Extrapolación de la Curva de Descarga	38
3.5.1.	Flujo Base.....	39
3.5.2.	Comparación y calibración	39
3.6.	Implementación del modelo lluvia escorrentía en Hydrovlab.	41
CONCLUSIONES.....		44
RECOMENDACIONES		45
BIBLIOGRAFÍA.....		46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Abscisas y ordenadas del hidrograma adimensional del SCS.	18
Tabla 2. Coordenadas de inicio y fin de tramos de Tránsito	20
Tabla 3. Referencia de ubicación de tramos a transitar	21
Tabla 4. Relaciones de resistencia $q = ah^{\beta}$ para el flujo superficial	22
Tabla 5. Coordenadas de inicio	35
Tabla 6. Coeficiente de	36
Tabla 7. Detalle de aforos realizados	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación de la zona de estudio.....	13
Figura 2. Subcuencas y Aportes de la hoya de Loja.....	14
Figura 3. Mapa Topológico de la secuencia usada en el modelo lluvia escorrentía.....	14
Figura 4. Esquema de Aportes y tránsito de hidrogramas de la hoya de Loja (parte 1).....	15
Figura 5. Esquema de Aportes y tránsito de hidrogramas de la hoya de Loja (parte 2).....	15
Figura 6. Interfaz del software usado para procesamiento de imágenes radar – Evento de Precipitación.....	16
Figura 7. Interfaz del software usado para procesamiento de imágenes radar – Ausencia de Lluvia.....	16
Figura 8. Sección típica de estudio en tramos obtenido mediante topografía.....	25
Figura 9. Ubicación del nodo – Puente Calle Daniel Armijos entre Av. Orillas del Zamora y Velasco Ibarra, lado norte. Coordenadas WGS 1984: Latitud -3.974636, Longitud -79.202961.....	28
Figura 10. Representación gráfica de los datos registrados por el nodo.....	37
Figura 11. Curva de Descarga en la sección de estudio.....	38
Figura 12. Comparación Caudal medido versus Caudal obtenido – Evento 1.....	39
Figura 13. Comparación Caudal medido versus Caudal obtenido – Evento 2.....	40
Figura 14. Comparación Caudal medido versus Caudal obtenido – Evento 3.....	40
Figura 15. Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrovlab.....	41
Figura 16. Interfaz del Modelo Lluvia Escorrentía.....	42
Figura 17. Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrovlab.....	42
Figura 18. Página Administrador Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrovlab.....	43

RESUMEN

Se desarrolla un modelo lluvia escorrentía para la ciudad de Loja, aplicando datos obtenidos y calibrados del radar LAWR que monitorea la zona. Determinados los datos morfológicos de las cuencas así como del cauce principal, se procede a determinar hidrogramas unitarios sintéticos y factores requeridos para el tránsito de avenidas. Aplicando los valores de precipitación proporcionados por las imágenes radar, se obtiene hidrogramas específicos para cada subcuenca, se transita y se obtiene el hidrograma de salida de la zona de estudio. Los resultados presentan un modelo lluvia escorrentía con la capacidad de simular el comportamiento de las subcuencas que conforman la hoya de Loja durante un evento de precipitación, calibrado de manera satisfactoria para los datos de altura de agua obtenidos mediante un nodo que utiliza tecnología SODAQ y GPRS, y aplicando aforos de la sección de estudio. Se replica el modelo matemático en lenguaje de programación y se presenta como nueva herramienta en el Laboratorio Virtual de Hidrología (Hydrovlab).

PALABRAS CLAVES: Modelo lluvia escorrentía. Radar LAWR. Tránsito de Avenidas. Hidrogramas. Placa SODAQ. GPRS. Hydrovlab.

ABSTRACT

It is developed a rainfall runoff model for the city of Loja, applying data obtained and calibrated from the LAWR radar that monitors the area. Determined the morphological data of the basins as well as the main channel, it is determined synthetic unit hydrograms and factors required for channel flood routing. Applying the precipitation values provided by the radar images, specific hydrographs are obtained for each subbasin, which they are routed and it is obtained an exit hydrograph from the study area. The results show a rainfall runoff model with the ability to simulate the behavior of the subbasins that structure the Loja basin during a rainfall event, satisfactorily calibrated for the water height data obtained through a node that used SODAQ and GPRS technology and applying gauges from the study section. It is replicated the mathematical model in programming language and is presented as a new tool in the Virtual Hydrology Lab (Hydrovlab).

KEYWORDS: Rainfall runoff model. LAWR radar. Flood Routing. Hydrograms. SODAQ board. GPRS. Hydrovlab.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene por finalidad el desarrollo de un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja, el cual emplea datos proporcionados por imágenes del radar LAWR de la Universidad Técnica Particular de Loja.

El desconocer el comportamiento de la precipitación de la hoya de Loja a distintas horas del día ha imposibilitado el poseer una aproximación a un sistema de alerta temprana ante inundaciones y otros fenómenos naturales relacionados con la hidrología. No conocer el impacto real de la precipitación en eventos y sus características hidrológicas ha impedido por años el avance y desarrollo de métodos más aproximados y sofisticados para el diseño de obras civiles.

Se ha detectado que la bibliografía carece de información sobre características lluvia escorrentía de las subcuencas de la hoya de Loja, así como también de un método de determinación de parámetros de precipitación de la hoya de Loja. Sumado a ello, las redes de monitoreo dispuestas para la zona poseen información poco eficiente, ya que continúan usando pluviómetros. Estos dispositivos, si bien brindan datos aproximados de puntos fijos de la zona de estudio, el error aumenta al tratar de aplicar dicha información a grandes zonas donde el pluviómetro únicamente representa un determinado punto.

Dependiendo de la topografía del terreno en estudio, el problema se agudizará, incluso con el uso de una red densa de pluviógrafos, los cuales no representan adecuadamente la distribución espacial de las tormentas (Fattorelli, Casale, Borga, & Da Ros, 1995).

En la presente investigación se desarrolla un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja, el cual emplea datos proporcionados por imágenes de radar para determinado período de tiempo en la zona de estudio delimitada.

Se ha planteado como objetivo general: Desarrollo de un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja, empleando datos radar; y como objetivos específicos:

- Calibrar imágenes de radar y estaciones de aforo automáticas.
- Determinar características lluvia escorrentía de las subcuencas de la hoya de Loja.
- Desarrollar herramienta de modelo lluvia escorrentía de evento empleando datos radar en el Laboratorio Virtual de Hidrología (HydroVlab).

La presente investigación pretende ser el inicio del desarrollo de un sistema de alerta temprana que involucre nuevas tecnologías para la mejora del pronóstico de los fenómenos atmosféricos. Como hipótesis, se consideró que el uso de radares LAWR para la determinación de la precipitación total, combinado con un modelo lluvia escorrentía, permite determinar los caudales de crecida en una cuenca hidrográfica en tiempo pseudo real.

La metodología de la presente investigación es variada. Se destaca inicialmente su ámbito experimental, que permite obtener los mejores parámetros de calibración para mayor exactitud del modelo. Se denota la presencia de dos variables, una independiente que son los datos de precipitación proporcionados por el radar LAWR y una dependiente, que es el modelo lluvia escorrentía, el cual se ve afectado directamente por la precipitación, así como las características propias de las subcuencas y del tramo donde ocurrirá el tránsito de avenidas. Se tiene como alcance la utilización de la precipitación obtenida en imágenes radar proporcionada por el Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil como datos de entrada para el modelo lluvia escorrentía desarrollado para la zona de estudio. Por ello, se ha empleado información del radar previamente calibrada y adaptada a dicha zona.

En el Capítulo I: Estado del Arte, se presenta generalidades de algunos modelos lluvia escorrentía desarrollados a la fecha y su importancia en la ingeniería. En el Capítulo II: Materiales y Métodos, se delimita la zona de estudio, la subdivisión de dicha zona en determinadas subcuencas e intercuencas, la ubicación del radar a emplear y se presenta la metodología del Hidrograma Unitario Sintético, precipitación total, precipitación efectiva, Método Muskingum – Cunge, calibración del modelo y programación para su ejecución en Hydrovlab. En el Capítulo III: Resultados y Discusión, se presenta los resultados de la investigación, en lo referente a hidrogramas de cada subcuenca e intercuenca, coeficientes de rugosidad, K y X de los tramos y el hidrograma de salida de la zona de estudio. Se presenta el modelo como una herramienta integrada del Laboratorio Virtual de Hidrología (Hydrovlab). Para finalizar, en Conclusiones y Recomendaciones se brinda las ideas principales derivadas de la presente investigación, el resultado satisfactorio obtenido con el modelo lluvia escorrentía y sus aplicaciones a futuras investigaciones.

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE

1.1. Modelo lluvia escorrentía

Un modelo de lluvia escorrentía es una representación matemática que describe las relaciones lluvia escorrentía de un área de aporte, una cuenca de drenaje o una cuenca hidrográfica (Galkate, Jaiswal, Thomas, & Nayak, 2011)

Para diversos diseños en ramas de la ingeniería, por décadas se ha venido aplicando modelos lluvia escorrentía para las zonas de estudio que permita simular características particulares que afectan a las estructuras a edificar. En un principio, estos modelos resultaron muy complejos y engorrosos de desarrollar, mucho más si el ingeniero únicamente tenía como herramienta las técnicas convencionales planteadas a mediados del siglo XIX (Abhinanda & Reeba, 2016). El problema se complicaba más, si para desarrollar este modelo únicamente se trabajaba con el caudal y tiempo pico, sin conocer el comportamiento de la tormenta. De ahí que (Sherman, 1932) propone el concepto de hidrograma unitario. Posteriormente, investigadores como Horton, 1933; Mockus, 1957, entre otros, brindaron sus propias propuestas.

El hidrograma unitario de una cuenca hidrográfica se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de un volumen unitario de exceso de lluvia de intensidad constante y distribuido uniformemente en la zona de drenaje (Ramírez, 2000). El volumen unitario suele considerarse asociado con 1 cm (1 mm o 1 pulgada) de precipitación efectiva distribuida uniformemente sobre el área de la cuenca (Ramírez, 2000).

Los hidrogramas unitarios son de gran utilidad para: el desarrollo de hidrogramas de inundación para magnitudes pluviales extremas (aplicado al diseño de estructuras hidráulicas), extensión de registros de flujo de inundación basados en registros de precipitaciones, desarrollo de sistemas de previsión y alerta basados en precipitaciones, entre otros (Subramanya, 2008).

Sin embargo, como muchos de los sitios donde se requiere el hidrograma unitario carecen de datos de lluvia, aparece como solución el hidrograma unitario sintético. Se denomina 'sintético' ya que se ha derivado de las características de la cuenca (longitud del cauce principal, área de la cuenca, pendiente del cauce principal) y no de los datos de escorrentía de la lluvia (Abhinanda & Reeba, 2016).

El Hidrograma Unitario Sintético Adimensional se basa en las características propias de la subcuenca o intercuenca. Es usado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos de América (NRCS por sus siglas en inglés: Natural Resources Conservation Service) y fue originalmente desarrollado por Víctor Mockus (Mockus, 1957). Se derivó de muchos hidrogramas unitarios naturales de cuencas que varían ampliamente en tamaño y localizaciones geográficas.

Existen dos parámetros importantes determinados en este método: tiempo de retraso y caudal pico. El tiempo de retraso, también denominado en la literatura como: tiempo de rezago, tiempo de retardo (lag time, en inglés), resulta de la expresión (Aparicio Mijares, 1992):

$$tr = 0.6 * tc \quad (1)$$

tr: tiempo de retraso, en horas.

tc: tiempo de concentración, en horas.

Varios han sido los autores que han investigado el comportamiento de las cuencas y su tiempo de retraso, entre ellos: Anderson, 1970; Becker, 1990; Bhat et al, 2007, Bohman, 1992, Franklin and Losey, 1984; Meierdiercks et al, 2010. El Watershed Modelling System del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos aplica en su modelo algunas de las fórmulas del tiempo de retardo (Haan, Barfield, & Hayes, 1994). Como referencia, se tiene a la fecha un total de 37 métodos y ecuaciones para el cálculo de este parámetro (Granato, 2012). Por cuestiones de calibración del modelo, para la presente investigación se ha tomado la ecuación desarrollada por Putnam (1972).

La idea del hidrograma unitario fue propuesta por Sherman (1932) y posteriormente mejorada por otros autores: Mockus, 1957; Snyder, 1938. A lo largo de los años se ha propuesto otros métodos, los cuales no han tenido la acogida que tuvo el del Soil Conservation Service, desarrollado originalmente por Mockus (1957). De dicho hidrograma, el caudal pico representa el 37,5% de su volumen, lo que equivale a un factor de pico adimensional fijo $\beta = 0,75$ o PRF = 484 en unidades "inglesas" (Lopes da Silveira, 2015), que es el equivalente al factor 0,208 de la ecuación 8 de caudal pico en unidades del sistema internacional (Lopes da Silveira, 2015). De donde β es un factor pico determinado por el Soil Conservation Service para la ecuación 8 del caudal pico y PRF es el mismo factor pico, pero en unidades inglesas (Lopes da Silveira, 2015).

Pese a que el mismo Soil Conservation Service ya advirtió que el factor pico "inglés" podría variar de "aproximadamente de 600 en áreas declives a 300 en terrenos planos y pantanosos" (Natural Resources Conservation Services, 1972), dicho hidrograma unitario sintético se popularizó con el uso del PRF = 484 (WATER RESOURCES COUNCIL, 1981).

Es a principios de la década de 1980 cuando se renovó el interés por el factor pico, pues no siempre el valor de 484 se ajustaba a la realidad de la cuenca donde se aplicaba, evidenciado en un sinnúmero de trabajos (Woodward, Welle, & Moody, 1980; McCuen & Bondelid, 1983).

Varios han sido los autores que mediante sus investigaciones han realizado propuestas para distintas cuencas en donde se aplicara el método del Hidrograma Unitario Sintético (Díaz, 1987; Eagleson, 1962; Fang et al, 2005; Linsley, Kohler e Paulhus, 1949), los cuales han llegado a deducir las zonas similares donde puede ser usado y el número de cuencas a los

cuales se ha enfocado la investigación. El aplicado en este trabajo involucra un factor $\beta = 0,89$ deducido por Lopes da Silveira (2015).

El modelo lluvia escorrentía permite relacionar las características propias de escorrentía que posee cada una de las subcuencas que conforman la zona de estudio con la precipitación en determinado período de tiempo. Para el tránsito de avenidas en el cauce principal, el método Muskingum (1964) es uno de los más populares. Previamente establecido sobre la base de la ecuación de almacenamiento de canales bajo hipótesis empíricas, y con aplicaciones muy generales, este método ha captado el interés de investigación de los hidrólogos. No menos de mil trabajos de investigación sobre el método de Muskingum han sido publicados en revistas académicas de todo el mundo (Xiaofang, Fanggui, & Mei, 2008).

El método de Muskingum se basa en la asunción de una relación lineal entre la entrada (I), la salida (O), y el almacenamiento de alcance (V), con la ecuación (Ponce & Yevjevich, 1978):

$$V = K(X * I + (1 - X) * O) \quad (2)$$

K: constante de almacenamiento, en segundos.

X: factor adimensional del método Muskingum, que oscila entre 0.0 a 0.5 (Ponce & Yevjevich, 1978).

I: parámetro de entrada del método.

O: parámetro de salida del método.

V: almacenamiento de alcance.

Es una verdad universalmente aceptada que el flujo de agua a través del suelo o de un canal, como es el caso de ríos, es un proceso distribuido, ya que sus parámetros importantes como la velocidad, profundidad y caudal varían conforme recorre y atraviesa la cuenca. Un modelo de tránsito distribuido de crecientes permite estimar los caudales o niveles de agua en puntos importantes de sistemas de canales (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

El aplicar el método de tránsito de avenidas permite simular de mejor manera la atenuación del hidrograma que ocurre en determinado tramo, desde su punto de inicio en la primera subcuenca hasta cualquier punto específico de la zona de estudio.

Es común encontrar que la mayor parte de modelos lluvia escorrentía apliquen los datos obtenidos por pluviómetros. Estos dispositivos, si bien brindan datos aproximados de puntos fijos de la zona de estudio, introducen un error, el mismo que se incrementa cuando se trata de extrapolar dicha información a zonas más extensas. Es decir, el pasar del punto al área (Fattorelli, Casale, Borga, & Da Ros, 1995).

Esto se da particularmente en el caso de tormentas en zonas planas o con pequeñas irregularidades donde el aire asciende por diferencia de temperatura a causa de calentamiento local (convección), y en donde incluso redes densas de pluviógrafos pueden no representar

adecuadamente la distribución espacial de las tormentas (Fattorelli, Casale, Borga, & Da Ros, 1995).

En la presente investigación se desarrolla un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja, el cual emplea datos proporcionados por imágenes de radar para determinado período de tiempo en la zona de estudio delimitada.

1.2. Radar LAWR

El radar es un sistema de detección y ubicación de objetos que aplica múltiples tipos de ondas para establecer el intervalo, dirección y velocidad de elementos dentro de su alcance (Radescan, 2017). Puede ser utilizado para detectar aviones, barcos, naves espaciales, seres humanos, vehículos, entre muchas otras aplicaciones (Radescan, 2017).

El conocer datos de lluvia en tiempo y espacio es importante no sólo para la predicción de eventos, sino también para el desarrollo de modelos que permitan una correcta estimación hidrológica. Sin embargo, no sería correcto aplicar el mismo análisis si la zona de estudio es urbana o rural. El modelado de la escorrentía urbana requiere alta resolución de la entrada de precipitación, en contraste con el de las zonas rurales. La resistencia en las zonas urbanas es baja, ya que el sistema está diseñado para transportar el agua de lluvia eficientemente lejos de dichas superficies (Schilling, 1991).

Los radares meteorológicos se consideran un suplemento valioso para el pluviómetro en el campo del drenaje urbano, ya que miden la precipitación espacialmente y cubren grandes áreas (Einfalt, Jessen, & Mehlig, 2005).

Acorde a las necesidades de los investigadores se han desarrollado radares meteorológicos aplicados a diversas ramas de la ingeniería. Uno de ellos, y del cual se hace uso en esta investigación es el Radar Meteorológico de Área Local.

El Radar Meteorológico de Área Local (LAWR por sus siglas en inglés) es un radar marino modificado, el cual registra la reflectividad del radar transmitiendo pulsos de microondas. El sistema rastrea la fase de esos pulsos y mide el cambio entre un impulso transmitido y un eco recibido (National Weather Service, s.f.), particularmente entre el envío de la onda y su choque con las partículas de lluvia, por lo que capta la presencia o ausencia de precipitación en recuentos adimensionales.

El Radar registra la reflectividad (Z) en imágenes con recuentos adimensionales de 0 (sin reflectividad) a 254 (reflectividad más alta) (Jensen N. E., 2004). El proceso de calibración convierte dichos valores de precipitación en milímetros. La confiabilidad de dichos datos aumenta si se toma en cuenta que para la calibración de las imágenes se coteja la información del radar con la obtenida por las estaciones hidrológicas de la Universidad Técnica Particular de Loja, distribuidas en toda la hoy de Loja.

El costo por instalación del radar LAWR es menos de una sexta parte de los sistemas de radar meteorológico de vanguardia. En comparación con los sistemas convencionales de banda X, el radar LAWR es técnicamente menos exigente y es adecuado para la instalación y operación en áreas remotas con fuertes limitaciones debido a las duras condiciones ambientales y una fuente de alimentación restringida (Rollenbeck & Bendix, 2006).

El radar LAWR se basa en el radar marino FURUNO 1525 Mk. III con una potencia de salida de 25 kW. La frecuencia de transmisión es de 9410 +- 30 MHz con un ancho de banda de 3 MHz y la longitud del impulso es de 1,2 μ s a una frecuencia de repetición de 600 Hz (Rollenbeck & Bendix, 2006). La longitud de onda relativamente corta en esta banda de frecuencias, permite obtener una resolución bastante alta en la proyección de imagen del radar, para la identificación y discriminación del blanco (Academic, s.f.).

El radar, manufacturado por DHI (Dansk Hydrolosk Institut), es operado por la Universidad Técnica Particular de Loja, instalado en el cerro El Tiro (2850 msnm) y abarca las partes este y norte de la provincia andina de Loja, así como la parte norte de la provincia amazónica de Zamora Chinchipe (Radar Network South Ecuador, s.f.). Posee varios rangos de resolución de imagen, pero el utilizado en la presente investigación es 100 m.

Debido a la simplicidad del sistema LAWR, el radar puede desplegarse para una sola cuenca urbana y ser operado por el municipio de dicha ciudad o una empresa de servicios públicos (Jensen & Oveergard, 2002).

Han sido múltiples los autores que han aplicado radares LAWR a sus investigaciones, debido a su versatilidad y confiabilidad en sus resultados: Goormans, 2011; Jensen N. E., 2005; Thorndahl & Rasmussen, 2012. Trabajos que han ido desde calibración de datos de precipitación con un radar LAWR con un alcance típico de 60 km, resolución aérea de 500 x 500 m y 253 niveles de reflexión (Jensen N. E., 2002), estudio de la variabilidad de la lluvia aplicando datos radar (Jensen N. E., 2005), calibración del radar identificando factores importantes que afectan la calibración (Pendersen, Jensen, & Madsen, 2010).

Se ha empleado el sistema de alcantarillado de Winksele-Herent-Wijgmaal como caso de estudio para determinar si un Radar Meteorológico de Área Local de Ciudad (LAWR, DHI, DK), podría ser un activo valioso en proporcionar datos de entrada de lluvia a un modelo de alcantarillado (Goormans, 2011).

Se ha comparado datos de radar y datos de pluviómetro de cinco eventos de lluvia en North Rhine - Westphalia, Alemania; obteniendo resultados satisfactorios con el radar LAWR empleado (Einfalt, Jessen, & Mehlig, 2005).

En una aplicación del radar LAWR, investigadores de Technical University of Denmark, llegaron a concluir que los datos calibrados dinámicos del radar de banda X trabajan de manera similar que un pluviómetro situado en la misma zona de estudio (Borup, Grum, Linde, & Mikkelsen, 2009).

En el estudio más reciente realizado aplicando radares, en 2012 se comparó tres métodos de calibración de imágenes de radar con datos de pluviómetro, mostrando resultados similares de volúmenes de precipitación pero mayor diferencia entre datos de intensidades máximas de lluvia (Thorndahl & Rasmussen, 2012).

El estudio más cercano geográficamente, aplicado a la misma zona de estudio de esta investigación, en la que catedráticos alemanes analizaron la calibración del radar LAWR presente en el pico más alto de acceso del Cerro del Consuelo, a unos 15 km al este de la capital provincial de Loja. Dicha calibración se realiza suponiendo una relación lineal entre la salida del radar y la precipitación, según lo recomendado por el fabricante del sistema. La intercomparación de los datos del pluviómetro y del dispersómetro con las precipitaciones radar calibradas revela un buen desempeño del enfoque de calibración desarrollado (Rollenbeck & Bendix, 2006).

1.3. Modelo lluvia escorrentía con datos de Radar

El desarrollo de modelos lluvia escorrentía que utilice datos radar se está volviendo la mejor alternativa de aplicación en pronóstico de crecientes. La Universidad de Padua, Italia, ha realizado estudios comparativos utilizando datos de pluviógrafos y datos de radar. Su investigación ha intentado dar una rápida visión de los desarrollos y de algunas investigaciones en curso sobre la estimación de lluvias utilizando sensores remotos (Fattorelli, Casale, Borga, & Da Ros, 1995).

La literatura presenta pocos modelos que utilicen datos similares al de la presente investigación, aunque sí presenta múltiples aplicaciones de los radares en otras áreas de la ingeniería.

El presente trabajo es un aporte a las aplicaciones de los radares LAWR en la hidrología, con el desarrollo de un modelo lluvia escorrentía de evento para la ciudad de Loja cuyo dato principal de entrada son los datos obtenidos de las imágenes de dicho radar.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El área de estudio está ubicada en el sur del Ecuador en un rango altitudinal comprendido entre 800 y 3600 msnm (Richter, 2003), en la ciudad de Loja, con coordenadas geográficas: 03° 39' 55" y 04° 30' 38" de latitud Sur; 79° 05' 58" y 79° 05' 58" de longitud Oeste (Instituto Geográfico Militar-Ecuador, s.f.).

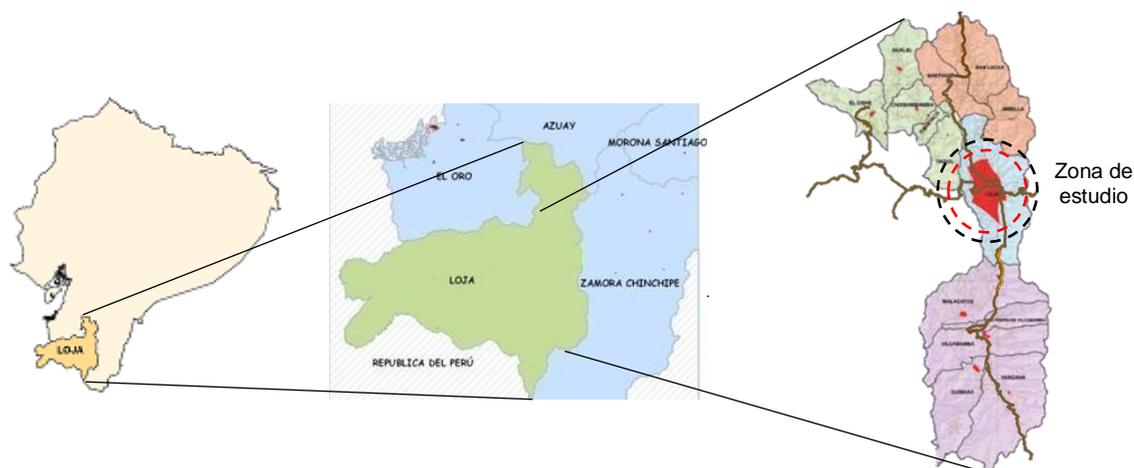


Figura 1. Delimitación de la zona de estudio.

Fuente: Recuperado de: <https://goo.gl/UjviNX>, 2008; <https://goo.gl/YdwQza>, 2012; <https://goo.gl/APsRJs>, 2009.

Elaboración: <https://goo.gl/UjviNX>, 2008; <https://goo.gl/YdwQza>, 2012; <https://goo.gl/APsRJs>, 2009.

La región cubierta por el radar también abarca las laderas orientales húmedas de los Andes, que se caracterizan por bosques tropicales de hasta 1800 msnm y bosques nubosos de hoja perenne tropical, así como las cuencas y valles relativamente secos al oeste de la principal Cordillera Oriental de los Andes, parcialmente cubierta por vegetación xerotropical (Richter, 2003).

La orografía de la hoya de Loja es muy diversa y se encuentra atravesada por ríos y pequeños cauces determinados por la topografía de la zona. Para la presente investigación, se ha usado la metodología de demarcación de las subcuencas hidrográficas mediante el trazo del *divortium aquarum*, o la divisoria de aguas. De esta manera se delimita el área que drena todas las aguas precipitadas hacia el río de interés (Aparicio Mijares, 1992).

La zona de estudio tiene un total de 9 subcuencas hidrográficas (Figura 2, numeradas del 1 al 9), 7 intercuenas (Figura 2, numeradas del 10 al 16) y 8 puntos del cauce principal de interés (Figura 2, numerados del T1 al T8).

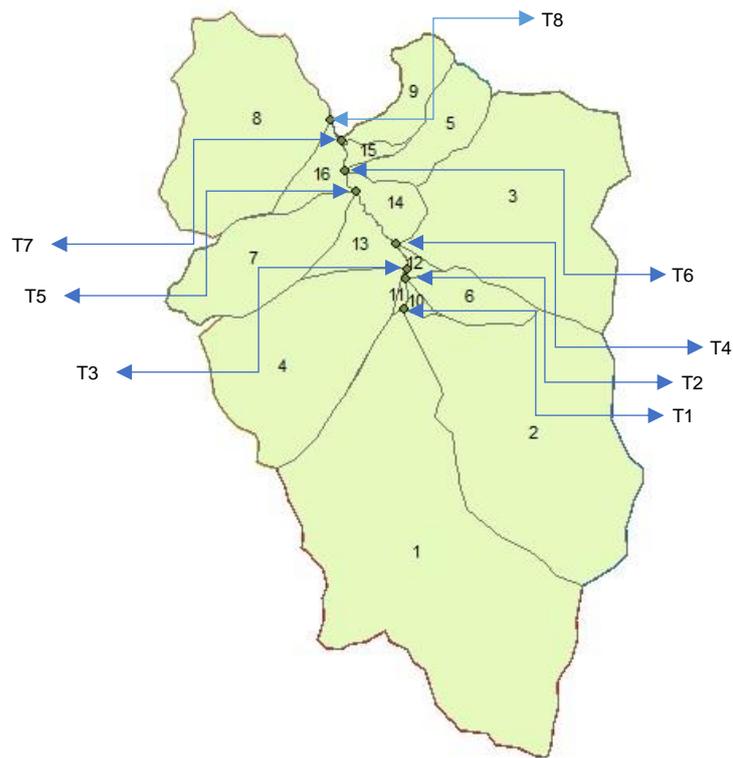


Figura 2. Subcuencas y Aportes de la hoya de Loja.
Fuente: Elaboración propia.

2.2. Modelo Lluvia Escorrentía

El modelo lluvia escorrentía desarrollado es dedicado a la zona de estudio y se desarrolla mediante un proceso secuencial y ordenado, el cual se presenta en el siguiente mapa topológico. El nombre de las subcuencas e intercuencas está basado en la Figura 3.

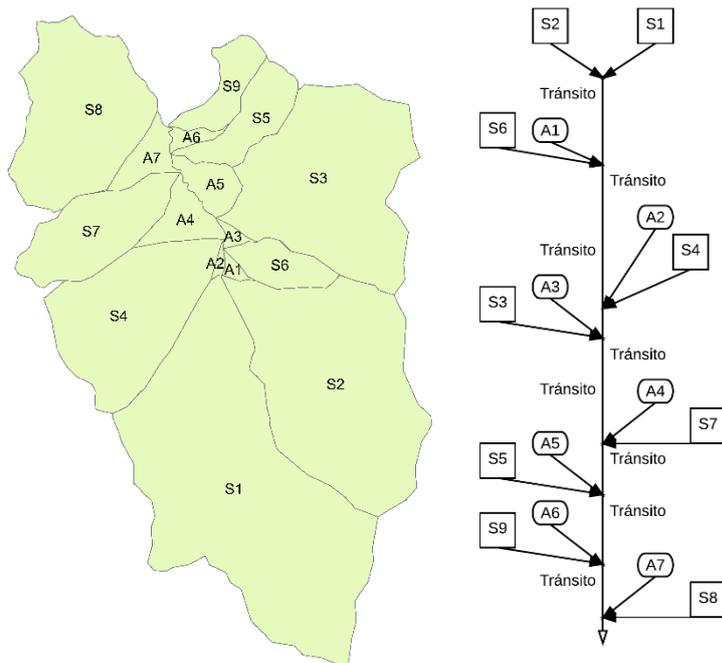


Figura 3. Mapa Topológico de la secuencia usada en el modelo lluvia escorrentía.
Fuente: Elaboración propia.

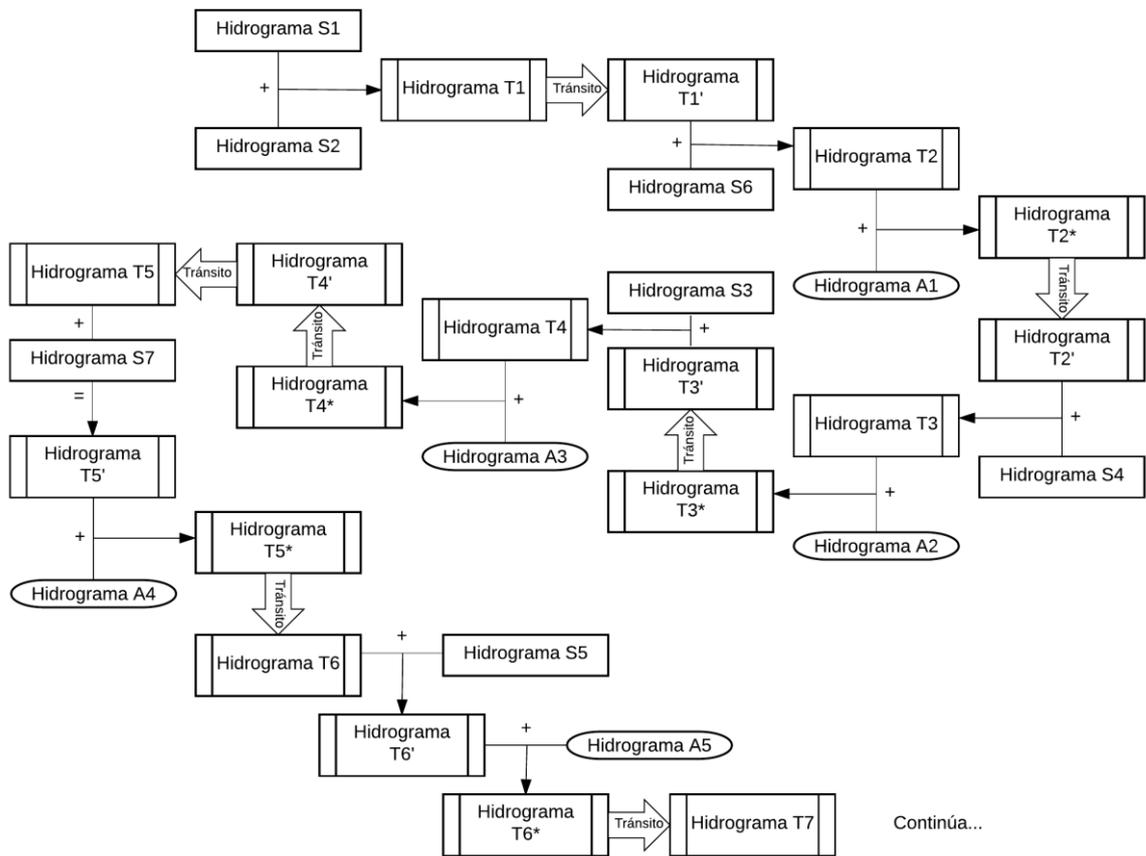


Figura 4. Esquema de Aportes y tránsito de hidrogramas de la hoya de Loja (parte 1).
Fuente: Elaboración propia.

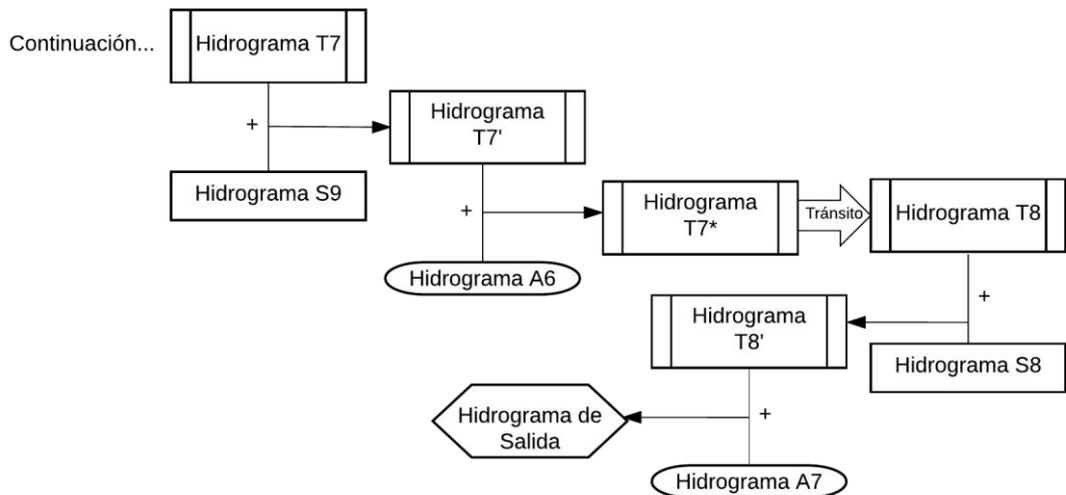


Figura 5. Esquema de Aportes y tránsito de hidrogramas de la hoya de Loja (parte 2).
Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 4 y 5 presentan el diagrama del proceso ejecutado por el modelo lluvia escorrentía. Los elementos que constituyen el modelo se describen a continuación.

2.3. Precipitación total.

En la presente investigación, los datos de precipitación se obtuvieron empleando un radar meteorológico LAWR, el cual obtiene imágenes cada 5 minutos representando la precipitación o su ausencia en valores numéricos que van de 0 a 254 con una resolución de píxel de 100 m. En las Figura 6 se evidencia una imagen radar en un evento de precipitación y en la Figura 7 la ausencia de lluvia.

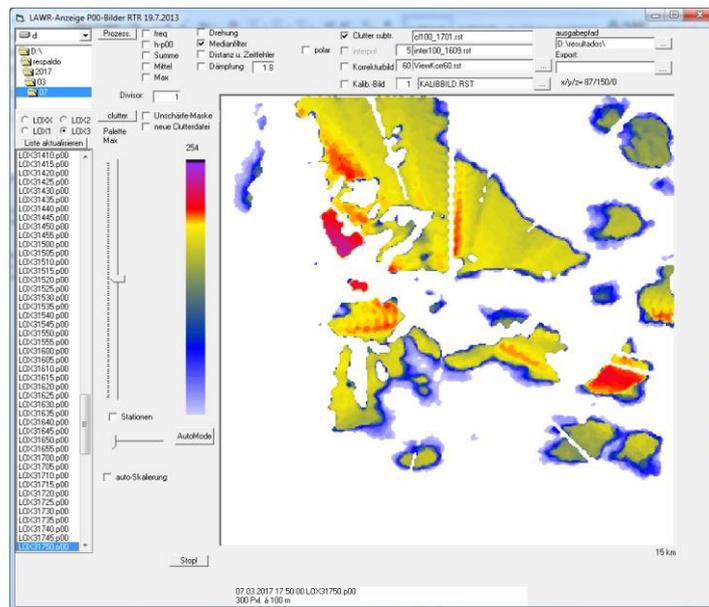


Figura 6. Interfaz del software usado para procesamiento de imágenes radar – Evento de Precipitación.

Fuente: Colaboración Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil.
Elaboración: Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil.

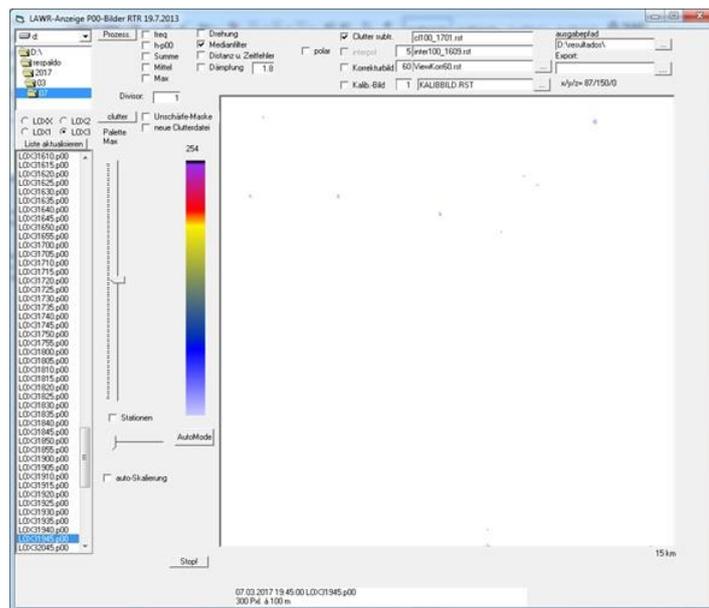


Figura 7. Interfaz del software usado para procesamiento de imágenes radar – Ausencia de Lluvia

Fuente: Colaboración Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil.
Elaboración: Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil.

Las imágenes ya calibradas fueron proporcionadas para su uso en la presente investigación por el Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil. El proceso de calibración emplea mediciones de pluviómetros ubicados dentro de la cuenca. A diferencia de los radares meteorológicos convencionales que poseen un receptor lineal, el radar LAWR tiene un receptor logarítmico. Esto sugiere que la transformación convencional del ratio reflectividad / lluvia debe de ser lineal. Una vez establecido el ratio entre la lluvia acumulada medida y la reflectividad medida se obtiene los nuevos valores de precipitación en milímetros (DHI, 2010). La precipitación total para cada sección es la precipitación (en milímetros) obtenida de dichas imágenes y dividida en 16 secciones, para 9 subcuencas y 7 intercuencas, de acuerdo a la Figura 3.

2.4. Precipitación efectiva.

Cada subcuenca e intercuenca presenta sus características únicas de cobertura y uso del suelo. Esto provoca que no todo lo precipitado se dirija hacia los cauces. Esta relación la determinó el Soil Conservation Service con el Número de la Curva (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Teniendo en cuenta que cada una de las 16 subcuencas e intercuencas posee el tipo, uso de suelo y considerando su área, se pondera y se determina el número de la curva.

Con ello, para cada sección se aplica la ecuación de precipitación efectiva propuesta por el SCS (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5,08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20,32} \quad (3)$$

Pe: precipitación efectiva, en milímetros.

P: precipitación total, en milímetros.

CN: número de la curva, valor adimensional establecido por el Soil Conservation Service y se puede estimar en base al grupo hidrológico y uso del suelo de acuerdo a lo propuesto por Chow, Maidment, & Mays, 1994, Tabla 5.5.2.

2.5. Hidrograma Unitario Sintético Adimensional del Soil Conservation Service

El hidrograma unitario sintético utilizado, que permite transformar los datos de lluvia en escorrentía, es el desarrollado por el Soil Conservation Service (1957, ahora denominado Natural Resources Conservation Service). Este hidrograma adimensional curvilíneo, tiene sus valores de ordenadas expresados en una relación adimensional q/q_p (caudal sobre caudal pico) y sus valores abscisas como t/t_p (tiempo sobre tiempo pico), como se muestra en la Tabla 1 (Natural Resources Conservation Services, 1972).

Tabla 1. Abscisas y ordenadas del hidrograma adimensional del SCS.

t/tp	q/qp
0	0,000
0,1	0,030
0,2	0,100
0,3	0,190
0,4	0,310
0,5	0,470
0,6	0,660
0,7	0,820
0,8	0,930
0,9	0,990
1	1,000

t/tp	q/qp
1,1	0,990
1,2	0,930
1,3	0,860
1,4	0,780
1,5	0,680
1,6	0,560
1,7	0,460
1,8	0,390
1,9	0,330
2	0,280
2,2	0,207

t/tp	q/qp
2,4	0,147
2,6	0,107
2,8	0,077
3	0,055
3,2	0,040
3,4	0,029
3,6	0,021
3,8	0,015
4	0,011
4,5	0,005
5	0,000

Fuente: Natural Resources Conservation Services, 1972.

Elaboración: Natural Resources Conservation Services, 1972

Las ecuaciones propuestas en National Engineering Handbook (1971, Apéndice 16A) requieren la determinación de los siguientes parámetros hidrológicos para cada una de las subcuencas y aportes:

- Longitud del cauce principal.
- Pendiente del cauce principal.
- Área de la subcuenca.
- Duración efectiva de la tormenta: cálculo detallado en el apartado 2.5.1.

Los tres primeros se determinaron mediante el uso de una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) empleando la topografía y red hídrica de la zona de estudio.

2.5.1. Parámetros hidrológicos aplicados al Hidrograma Unitario Sintético.

Entre ellos, tenemos:

Duración efectiva de la tormenta.

El método desarrollado por el Soil Conservation Service (1957) utiliza el tiempo real en el que se desarrolló la tormenta, también conocido como duración efectiva. Para la presente investigación, dicho tiempo se lo obtuvo en base al análisis de los eventos de precipitación de las imágenes proporcionadas por el radar. Visualmente, se determinó el tiempo de duración de la tormenta en la zona de estudio mediante el análisis de las imágenes en intervalos de 5 minutos, teniendo un total de 288 imágenes que conforman la imagen de 24 horas. El tiempo acumulado de duración de la tormenta fue el aplicado como duración efectiva.

Duración en exceso.

Resulta de la expresión (Aparicio Mijares, 1992):

$$de = 2\sqrt{tc} \quad (4)$$

de: duración en exceso, en horas.

tc: tiempo de concentración, en horas.

Tiempo de retraso.

Resultado de las experiencias de varios modelos de regresión lineal, determinado por la siguiente ecuación (Putnam, 1972):

$$tr = 0,49 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0,50} * I^{-0,57} \quad (5)$$

tr: tiempo de retraso, en horas.

L: longitud del cauce principal, en millas.

S: pendiente del cauce principal, en pie/milla.

I: tasa que relaciona la cobertura impermeable y el total del área de drenaje. En la práctica, para zonas urbanas y rurales puede tomar valores de entre 0 hasta 0,1. Para la presente investigación, se adopta un valor de 0,02 para zonas que presentan condiciones menores de impermeabilidad frente al área total de la cuenca de estudio (Putnam, 1972).

Tiempo pico.

Se expresa como (Aparicio Mijares, 1992):

$$tp = \frac{de}{2} + tr \quad (6)$$

tp: tiempo pico, en horas.

de: duración en exceso, en horas.

tr: tiempo de retraso, en horas.

Caudal pico.

Se expresa como (Aparicio Mijares, 1992):

$$qp = \frac{0,208 * A}{tp} \quad (7)$$

qp: caudal pico, en m³/s/mm.

A: área de la cuenca, en km².

tp: tiempo pico, en horas.

Para la zona de estudio, se adoptó un PRF "inglés" de 575, es decir $\beta = 0,89$, valor máximo que se recomienda para zonas urbanas que también contengan en la zona de estudio zonas rurales (Lopes da Silveira, 2015).

Para la conversión a unidades del sistema internacional, $K = 2,78$ en la siguiente ecuación (Lopes da Silveira, 2015):

$$PRF = \frac{K\beta}{10} = \frac{2,78 * 0,89}{10} = 0,247 \quad (8)$$

El cual genera la ecuación aplicada:

$$qp = \frac{0,247 * A}{tp} \quad (9)$$

Coordenadas del Hidrograma Unitario Sintético.

Por último, el Hidrograma Unitario Sintético se forma de la siguiente manera:

- Tiempo, en horas: resulta de multiplicar el tiempo establecido por el SCS (Tabla 1) por el tiempo pico.
- Caudal, en m³/s/mm: resulta de multiplicar el caudal establecido por el SCS (Tabla 1) por el caudal pico.

De esa manera, se obtiene 9 hidrogramas unitarios sintéticos de las subcuencas y 7 de las intercuenas de la zona de estudio.

2.6. Hidrograma de Crecida

Teniendo un hidrograma por cada subcuenca e intercuenca formado por dos columnas: t/tp (tiempo unitario) y q/qp (caudal unitario), todos los valores de la columna caudal unitario se multiplican por la precipitación efectiva correspondiente a dicha subcuenca, convirtiendo el caudal unitario en caudal (m³/s) y generando un hidrograma de crecida por cada subcuenca.

2.7. Método Muskingum – Cunge

2.7.1. Tramos determinados para el tránsito de avenidas.

Teniendo como referencia la Figura 3, y considerando el proceso del tránsito de las Figuras 4 y 5, se determinó los tramos por los cuales se transitarán las avenidas para la zona de estudio:

Tabla 2. Coordenadas de inicio y fin de tramos de Tránsito

Tramo 1	X 699045.15 m	Y 9562967.22 m
Ubicado entre	Y 9561094.60 m	Punto 6
Punto 0	Tramo 4	X 697893.06 m
X 699593.74 m	Ubicado entre	Y 9563630.96 m
Y 9559274.92 m	Punto 3	Tramo 7
Punto 1	X 699045.15 m	Ubicado entre
X 699602.46 m	Y 9561094.60 m	Punto 6
Y 9560221.50 m	Punto 4	X 697893.06 m
Tramo 2	X 698085.56 m	Y 9563630.96 m
Ubicado entre	Y 9562200.43 m	Punto 7
Punto 1	Tramo 5	X 697822.06 m
X 699602.46 m	Ubicado entre	Y 9564578.03 m
Y 9560221.50 m	Punto 4	Tramo 8
Punto 2	X 698085.56 m	Ubicado entre
X 699276.26 m	Y 9562200.43 m	Punto 7
Y 9560933.46 m	Punto 5	X 697822.06 m
Tramo 3	X 698245.33 m	Y 9564578.03 m
Ubicado entre	Y 9562967.22 m	Punto 8
Punto 2	Tramo 6	X 697435.05 m
X 699276.26 m	Ubicado entre	Y 9565197.44 m
Y 9560933.46 m	Punto 5	
Punto 3	X 698245.33 m	

Fuente: Elaboración Propia

Como referencia, se tiene:

Tabla 3. Referencia de ubicación de tramos a transitar

Tramo	Referencia
1	Unión de los dos ríos, entre calle Guaranda y Tulcán hasta Puente de la Avenida Isidro Ayora, por la Unidad Educativa Calasanz.
2	Puente de la Avenida Isidro Ayora, por la Unidad Educativa Calasanz hasta el Parque Jipiro, en su unión con el río Jipiro.
3	Parque Jipiro, unión con el río Jipiro hasta el Puente Jaime Roldós, a nivel de Servientrega e Industrias Guapán.
4	Puente Jaime Roldós, a nivel de Servientrega e Industrias Guapán hasta Azud y Compuerta, antes de llegar al Kartodromo Municipal.
5	Azud y Compuerta, pasando Kartodromo Municipal hasta a nivel de Adelca Loja y CNT-EP.
6	Pasando Kartodromo Municipal, a nivel de Adelca Loja y CNT-EP hasta a nivel del Parque Industrial Loja, por el Colegio Militar Lauro Guerrero.
7	A nivel del Parque Industrial Loja, por el Colegio Militar Lauro Guerrero hasta calle Henry de Toulouse Lautrec, por Escuela "Pompilio Reinoso Jaramillo".
8	Calle Henry de Toulouse Lautrec, por Escuela "Pompilio Reinoso Jaramillo" hasta el final del Sendero Parque La Banda, por Vía Antigua Cuenca - Loja, pasando puente de madera.

Fuente: Elaboración Propia

2.7.2. Parámetros K y X del Método Muskingum – Cunge.

En el método convencional de Muskingum, los parámetros K y X se determinan calibrando el modelo mediante el uso de hidrogramas medidos a la entrada y salida de la zona de estudio. En la versión Muskingum – Cunge, K y X se calculan usando las fórmulas derivadas por Cunge (Ponce & Yevjevich, 1978).

K es la constante de almacenamiento, en segundos; mientras que X es un factor que expresa la influencia relativa del caudal de entrada y el almacenamiento, adimensional y cuyos valores oscilan entre 0.0 a 0.5 (Ponce V. M., 1989).

Cálculo de K.

Este parámetro se calcula con la expresión (Ponce & Yevjevich, 1978):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (10)$$

Δx : longitud del tramo, en m.

c: celeridad de la onda de flujo, en m/s.

La celeridad depende de la velocidad del flujo, y resulta de la expresión (Julien, 2002):

$$c = \beta v \quad (11)$$

v: velocidad del tramo, en m/s.

β (beta) es un coeficiente que depende del tipo de flujo para el cual se está aplicando la ecuación. $\beta = 3$ en flujo laminar, en el cual las ondas pueden formarse teóricamente cuando Fr (Froude) $> 0,5$. $\beta = 5/3$, en flujos turbulentos, donde las ondas se desarrollan en canales lisos muy empinados bajo flujos supercríticos ($Fr > 1,5$) (Julien, 2002). El valor de $\beta = 5/3$ lo define Julien (2002) como un factor propio de la ecuación de Manning y el cual puede ser aplicado a la mayoría de ríos, como se detalla a continuación:

Tabla 4. Relaciones de resistencia $q = ah^b$ para el flujo superficial

Flow Type	Resistance Coefficient	α	β	t_e
Laminar	$k_t = \text{constant}$	$\frac{8gS}{k_t v}$	3	$\left(\frac{k_t v L}{8gS_i^2}\right)^{1/3}$
Turbulent				
Darcy-Weisbach	$f = \text{constant}$	$\sqrt{\frac{8gS}{f}}$	1.5	$\left(\frac{f L^2}{8gS_i}\right)^{1/3}$
Chézy	$C = \text{constant}$	$C S^{1/2}$	1.5	$\left(\frac{L^2}{C^2 S_i}\right)^{1/3}$
Manning (S.I. units)	$n = \text{constant}$	$S^{1/2}/n$	1.67	$\left(\frac{nL}{S^{1/2} 1^{0.667}}\right)^{0.6}$

Fuente: River Mechanics, Tabla 3.3, pág. 57 (Julien, 2002).
Elaboración: Julien, 2002.

Velocidad mediante la ecuación de Manning.

Se aplica las respectivas expresiones para la determinación de la velocidad por el método propuesto por Manning (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (12)$$

$$Q = AV \quad (13)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (14)$$

V: velocidad, en m/s

R: radio hidráulico, en m.

S: pendiente media del cauce, en m/m.

Q: caudal, en m³/s.

A: área hidráulica, en m².

P: perímetro hidráulico, en m.

n: coeficiente de rugosidad de Manning, adimensional.

Mediante topografía realizada al río de estudio y sus taludes, comprendido entre las subcuencas delimitadas, se obtuvieron los valores que son propios de los tramos a transitar.

Coefficiente de rugosidad de Manning.

El coeficiente de rugosidad propuesto por Manning para su ecuación depende de muchos factores que influyen el caudal que recorrerá por un elemento hídrico. Al ser empírico, puede existir diversidad de criterio en cuanto al valor más apropiado para determinadas situaciones.

En 1989, George J. Arcement, Jr. y Verne R. Schneider en cooperación con el Departamento de Transporte de EE.UU., Administración Federal de Carreteras, prepararon una guía para seleccionar el coeficiente de rugosidad para canales naturales y llanuras de inundación. Para ellos, el valor de n es una ecuación determinada por (Arcement & Schneider, 1989):

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (15)$$

n_b : valor base para n de un canal recto, uniforme y liso en materiales naturales.

n_1 : factor de corrección para el efecto de irregularidades en la superficie.

n_2 : valor para las variaciones de forma y tamaño de la sección transversal del canal.

n_3 : valor para las obstrucciones.

n_4 : valor para la vegetación y las condiciones de flujo.

m : factor de corrección para los meandros del canal.

La facilidad del método implica que cada uno de estos valores pueden ser estimados en el 'Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains' (1989, Tablas 1 y 2).

Para la determinación del factor n_b y con el fin de mejorar la precisión del modelo, en esta investigación se ha usado lo propuesto por Limerinos en 1970. Este investigador relacionó el radio hidráulico y el tamaño de partículas en base a muestras de 11 canales teniendo en el fondo material de lecho, que va desde pequeñas gravas hasta bloques de tamaño mediano. Las partículas tienen tres dimensiones: longitud, ancho y grosor, estando orientadas de modo que la longitud y el ancho sean paralelos al plano del lecho del río. Limerinos (1970) relacionó el valor de n con el diámetro mínimo (espesor) y con el diámetro intermedio (anchura). Su ecuación que aplica el diámetro intermedio parece ser la más útil ya que esta dimensión es la más fácil de medir en el campo o caso contrario de estimar a partir de fotografías (Limerinos, 1970).

$$n = \frac{(0,0926)R^{\frac{1}{6}}}{1,16 + 2,0 \log\left(\frac{R}{d_{84}}\right)} \quad (16)$$

R: radio hidráulico, en pies

d_{84} : diámetro de las partículas, en pies, que es igual o superior al diámetro del 84 por ciento de las partículas. Este diámetro podrá ser estimado en base al diámetro intermedio (ancho) medido u observado en campo o en fotografías (Limerinos, 1970).

Cálculo de X.

Este parámetro se calcula con la expresión (Ponce & Yevjevich, 1978):

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_0c\Delta x} \right) \quad (17)$$

B: ancho de la superficie del agua, en m.

S_0 : pendiente media del cauce, en m/m.

Δx : longitud del tramo, en m.

c: celeridad de la onda de flujo, en m/s.

Q: caudal, en m³/s.

2.7.3. K y X como variables dependientes.

Por las variables que intervienen en el cálculo del K y X, se evidencia que estos parámetros dependen de las características propias del tramo de estudio, lo cual las hace únicas e inutilizables para otras zonas. Sumado a ello, ya que el modelo lluvia escorrentía considera la variabilidad de los parámetros hidrológicos, es lógico pensar que elementos como: velocidad, caudal, secciones, perímetros, etc., cambian conforme existe mayor o menor aporte de las cuencas a los ríos. Esta variación puede llegar a ser significativa en eventos de precipitaciones en cortos períodos de tiempo, por lo cual K y X deberá variar conforme el volumen de agua que circule por el río.

Con el fin de considerar dicho efecto, se tomó la altura del agua como variable independiente, la cual se calcula mediante tanteos, mientras que todos los demás parámetros se los expresó en función de dicha altura.

Para la posterior aplicación del método sección pendiente, se ha considerado dos secciones por cada tramo: sección 1 correspondiente al inicio del tramo y sección 2 correspondiente al final del tramo, la cual será igual a la sección 1 del tramo siguiente. Además, se asumió que cada sección posee forma de trapecio, lo cual compensará irregularidades en la solera de la sección y en sus taludes.

Por cada sección se determinó mediante topografía:

- Lado menor de la sección trapezoidal.
- Pendiente de la pared izquierda de la sección.
- Pendiente de la pared derecha de la sección.
- Cota de la sección.

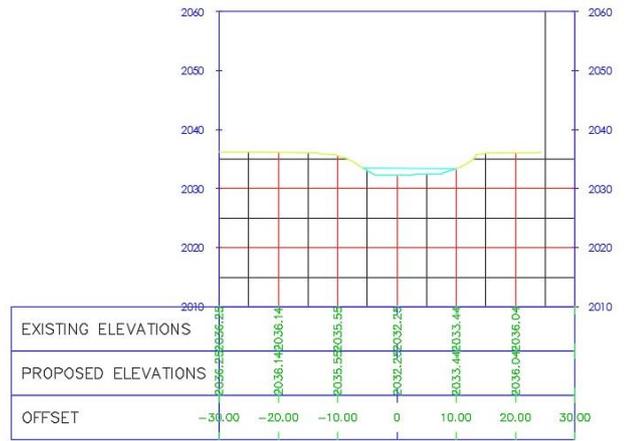


Figura 8. Sección típica de estudio en tramos obtenido mediante topografía.
Fuente: Elaboración propia

Con ello, se determinó para cada sección:

- Talud de la pared izquierda y derecha por cada sección, mediante relaciones geométricas:

$$z_i = \frac{1}{m_i} \quad (18)$$

m_i : Pendiente de la pared izquierda o derecha de la sección.

- Ancho de la superficie del agua (espejo de agua), por cada sección:

$$B_i = b_i + (z_1 + z_2) * h \quad (19)$$

b_i : lado menor de la sección trapezoidal.

z_1 y z_2 : taludes de la pared izquierda y derecha por cada sección.

h : altura del agua (mediante tanteos).

- Área mojada, por cada sección:

$$A_i = \left(b_i + \left(\frac{z_1 + z_2}{2} \right) * h \right) * h \quad (20)$$

- Perímetro mojado, por cada sección:

$$P_i = b_i + \left(\sqrt{1 + z_1^2} + \sqrt{1 + z_2^2} \right) * h \quad (21)$$

- Coeficiente de conducción, por cada sección (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$K_{di} = \frac{A_i * R_i^{2/3}}{n_i} \quad (22)$$

Con dichos parámetros, para cada tramo se determina:

- Diferencia en elevación:

$$\Delta y = Z_1 - Z_2 \quad (23)$$

Z_1, Z_2 : cota de cada sección.

- Factor b, que depende de las áreas (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$\text{Si } A_1 > A_2; b = 2. \text{ Si } A_2 > A_1; b = 4 \quad (24)$$

- Coeficiente de conducción medio en el tramo, calculado como promedio geométrico de los coeficientes de conducción en los extremos del mismo (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

$$\bar{K}_d = \sqrt{K_{d1} * K_{d2}} \quad (25)$$

2.7.4. Altura del agua mediante tanteos.

Una vez determinados los parámetros del tramo en función de la altura del agua, sea cualquiera el valor de partida de la altura del agua (h), se calcula el caudal del tramo con el método sección pendiente, aplicando la siguiente expresión (Chow, Maidment, & Mays, 1994):

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{\Delta y}{L}}}{\sqrt{\frac{1}{\bar{K}_d^2} - \frac{1}{bgL} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right)}} \quad (26)$$

Dicho caudal deberá ser igual al caudal de entrada para su respectivo tramo.

Caudal de entrada

Un tramo puede recibir escorrentía de distintas subcuencas o intercuenas de la zona de estudio. El caudal de entrada resulta ser el caudal máximo para el inicio del tramo, el cual se obtiene como el mayor de todos los caudales del hidrograma de entrada.

Tanteos

Conocido el caudal de entrada, se compara con el caudal obtenido por el método sección pendiente y se aumenta el valor de altura del agua lo necesario para que el caudal de entrada sea igual al caudal obtenido con el método sección pendiente. Conseguida la igualdad, este caudal se usa para el posterior cálculo del K y X definitivo, usando el proceso anteriormente descrito.

Es así que para determinado evento, se obtiene la respuesta hidrológica de cada uno de los tramos y sus respectivos parámetros hidrológicos.

2.7.5. Constantes del Método Muskingum – Cunge.

Para cada tránsito se determina (Ponce & Yevjevich, 1978):

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \quad (27)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t} \quad (28)$$

$$C_3 = \frac{2K(1 - X) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t} \quad (29)$$

C1, C2 y C3: constantes del Método Muskingum – Cunge. La suma de las tres es igual a 1.

Δt : intervalo de tiempo o tiempo de direccionamiento. Su rango varía de acuerdo al autor: algunos consideran que debe estar comprendido entre K y $2KX$ (Wanielista, 1997), (Singh, 1992) o entre K y $K/3$ (Viessman & Lewis, 1995). En cualquier caso, mientras menor sea, mayor será la precisión del método (Sánchez, 2013). Para la presente investigación se ha tomado siempre el menor de las tres expresiones.

2.7.6. Ecuación del Caudal Transitado - Método Muskingum – Cunge.

Para el nuevo hidrograma transitado, cada caudal se calcula mediante la siguiente ecuación (Ponce & Yevjevich, 1978):

$$Q_{i+1}^{j+1} = C_1 Q_i^{j+1} + C_2 Q_i^j + C_3 Q_{i+1}^j \quad (30)$$

Q_{i+1}^{j+1} : caudal del hidrograma de salida para el tiempo del caudal de salida.

Q_i^{j+1} : caudal del hidrograma de entrada para el tiempo del caudal de salida.

Q_i^j : caudal del hidrograma de entrada para el tiempo anterior al del caudal de salida.

Q_{i+1}^j : caudal del hidrograma de salida para el tiempo anterior al del caudal de salida.

2.7.7. Principio de superposición de causas, efectos y Tránsito de Hidrogramas.

Por el principio de superposición de causas y efectos, el hidrograma que resulta de un periodo de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de periodos lluviosos precedentes (Germán, 2006). Esto permite fácilmente la “suma” de los hidrogramas de subcuencas y aportes en su punto de unión.

Al inicio del tramo, se evidencia la unión de los aportes de las subcuencas 1 y 2, ríos conocidos como: Zamora y Malacatos. Ambos hidrogramas se suman en uno sólo, el cual hasta el próximo aporte avanza varios cientos de metros. Por ello, se aplica el tránsito de avenidas anteriormente descrito. Realizado el tanteo para determinar la altura del agua, se aplica el K y el X obtenido en todos los tramos objeto del tránsito.

2.7.8. Calibración del modelo.

Para la verificación y posterior calibración del modelo lluvia escorrentía se ha usado un dispositivo prototipo denominado nodo, el cual fue desarrollado por estudiantes de la titulación de Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja (2017).

El nodo aplica tecnología de ondas de ultrasonido, las cuales son enviadas a determinado intervalo de tiempo, chocan contra un objeto y regresan a él. Esto permite determinar la longitud recorrida por dicha onda.

El nodo fue implementado con Placa SODAQ, la cual permite ejecutar el código desarrollado en la plataforma ARDUINO (SODAQ, 2017). ARDUINO posee un Entorno de Desarrollo Integrado que permite desarrollar e implementar el código en la Placa. El código fue programado de tal manera que cada 30 segundos se obtiene una medida de distancia, luego

cada 10 minutos se promedia todos los datos registrados en dicho intervalo de tiempo y se almacena dicho dato único. Al nodo también se ha implementado un placa denominada GPRS Bee, la cual proporciona una manera de utilizar la red de telefonía celular GSM / GPRS para transmitir o recibir datos desde una ubicación remota. Los mensajes SMS y la comunicación por Internet GPRS son la función básica de la GPRS Bee (Seeed, s.f.), y es usado para enviar mediante el uso de internet móvil la variable obtenida hacia una plataforma específica para recibir este tipo de variables, este caso: Ubidots. Ubidots es una plataforma que permite albergar proyectos de Internet de las Cosas, Internet of Things en inglés, la cual de acuerdo a su página web procesa millones de lecturas de sensor por día (Ubidots, s.f.).

Se colocó el nodo en un puente sobre un punto estratégico del cauce principal de la hoya de Loja y del tránsito (Coordenadas WGS 1984: Latitud -3.974636, Longitud -79.202961), identificado en la Figura 9, el cual constantemente registró datos de distancia entre el sensor y la superficie del agua. Conocida la distancia entre el sensor y el fondo del río en dicho punto, se pudo determinar la altura del agua a determinado intervalo de tiempo.

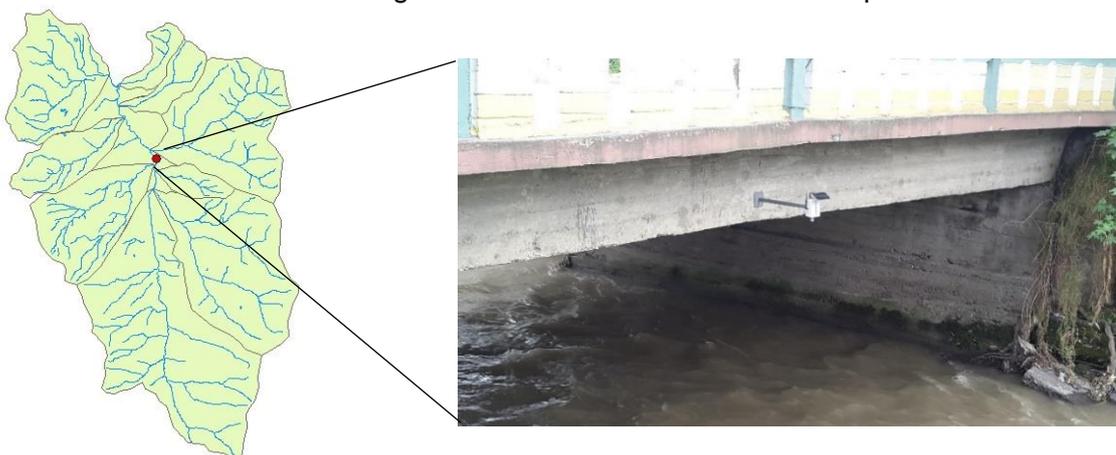


Figura 9. Ubicación del nodo – Puente Calle Daniel Armijos entre Av. Orillas del Zamora y Velasco Ibarra, lado norte. Coordenadas WGS 1984: Latitud -3.974636, Longitud -79.202961. Fuente: Elaboración propia.

Para su correcta aplicación, se adaptó un soporte para la estructura del nodo que recibió el panel solar formando 30° con el plano horizontal. De esta manera, estuvo protegido contra las condiciones de la zona y recibió la mayor exposición de luz durante el día. El nodo fue instalado el 03 de marzo de 2017 a las 15:36 y recolectó datos hasta el 01 de abril de 2017 a las 23:57.

Además de la variable: altura del agua, el nodo también adjuntaba en cada envío datos de la batería y del panel solar, implementado para suplir las necesidades de energía que la batería por sí sola no podían cumplir. Esto permitió brindarle gran independencia energética.

Los datos recolectados en el período de operación del nodo permitieron determinar el flujo base de la zona de estudio, que se define como la porción del flujo que es generado por las aguas subterráneas y fluyen hacia el cauce principal (Salas, Macedo, Paz, Ortíz, & Palacios,

2015). Este fue evidenciable y estimable del cálculo del caudal para todas las alturas de agua recolectadas en períodos largos de ausencia de precipitación.

2.7.9. Aforos

Se ha procedido a realizar cinco aforos representativos en el mismo punto de análisis escogido para la instalación del nodo. Aplicando el método numérico de determinación de caudales, el cual relaciona el caudal parcial como el producto entre la velocidad media para la abscisa de medición, la profundidad media y el ancho; y acumulando dicho caudal dio como resultado el caudal medido en el aforo (Sánchez, 2013).

Para la velocidad media, se aplicó el promedio de las velocidades en cada punto de dicha sección, la cual resulta de una ecuación brindada por el fabricante del molinete empleado: Rickly Hydrological Company. Para el equipo usado, las ecuaciones son:

Menor a 40 revoluciones:

$$v = (n * 2,18 + 0,02) * 0,3048 \quad (31)$$

Mayor a 40 revoluciones:

$$v = (n * 2,17 + 0,03) * 0,3048 \quad (32)$$

Dónde:

v: velocidad para el punto requerido, en m/s.

n: relación entre las revoluciones dadas y el tiempo en segundos.

2.7.10. Extrapolación de la Curva de Descarga

Para las alturas en las cuales no fue posible realizar los aforos, se realiza la extrapolación de la curva de descarga. Se aplicó tres metodologías:

Método Analítico de Primer Orden

Luego del análisis de varias curvas de descarga, varios autores dedujeron que una parábola de orden superior se adapta muy bien al comportamiento de todas ellas. De ahí, se deduce el siguiente procedimiento de cálculo (Vera Hernández, 2003):

- Se supuso una altura (h_0) la cual corresponde al nivel de agua del cauce cuando los caudales son nulos. Se tomó un valor cercano a las alturas aforadas.
- Se aplicó las siguientes ecuaciones para cada altura de agua (h) y su respectivo caudal aforado (Q):

$$x = \log(h - h_0) \quad (33)$$

$$y = \log Q \quad (34)$$

$$x^2; x * y; y^2 \quad (35)$$

- Se determinó el factor r, mediante la ecuación:

$$r = \frac{n * \sum(x * y) - (\sum x * \sum y)}{((n * \sum(x^2)) - (\sum x)^2) * (n * \sum(y^2) - (\sum y)^2)}^{0.5} \quad (36)$$

n: número de aforos realizados.

- Mediante tanteos se procuró lograr el mejor valor de h_0 en el cual r sea igual a 1 o cercano a 1. Luego, se procedió a determinar α , β y a :

$$\alpha = \frac{(\sum y * \sum(x^2)) - (\sum x * \sum(x * y))}{(n * \sum(x^2)) - (\sum x)^2} \quad (37)$$

$$\beta = \frac{(n * \sum(x * y)) - (\sum x * \sum y)}{(n * \sum(x^2)) - (\sum x)^2} \quad (38)$$

$$a = 10^\alpha \quad (39)$$

- Finalmente, para cualquier altura de agua, el valor de caudal es igual a:

$$Q = a * (h - h_0)^\beta \quad (40)$$

Método de la Ecuación de Manning

Para la estimación de un caudal para una altura de agua también se puede aplicar la ecuación de Manning, así (Hersch, 1995):

- Para cada altura de agua y caudal aforado, se determinó el área (A), perímetro (P) y radio hidráulico (R). Para ello se hizo uso del ancho de la solera del cauce, así como de sus taludes.
- Manning determinó que el caudal es el producto de dos factores: el factor geométrico y el factor hidráulico. Para cada caudal aforado se obtuvo el factor geométrico, de la ecuación:

$$FG = A * R^{2/3} \quad (41)$$

- Se realizó una gráfica de altura versus Factor Geométrico. Uniendo los puntos se obtuvo una ecuación por regresión lineal, que representa la línea formada y quedando de la siguiente forma:

$$FG = \frac{h - b}{a} \quad (42)$$

a y b : factores obtenidos mediante regresión lineal y representan la recta.

- El Factor Hidráulico fue determinado por:

$$FH = \frac{\sqrt{s}}{n} \quad (43)$$

s : pendiente del cauce, en m/m.

n : factor de rugosidad de Manning.

- Finalmente, el caudal se da mediante la expresión:

$$Q = FH * FG \quad (44)$$

Método Ruso

Varios estudios en la República de Rusia han logrado determinar una constante denominada: Factor de Cauce (M) (Vera Hernández, 2003):

- Al igual que el Método de Manning, se calculó el área y el perímetro para cada caudal aforado.
- Se determina para cada caudal aforado el Factor de Cauce, el cual debería comportarse de manera constante ya que a diferentes niveles de agua, este factor no muestra cambios significativos (Vera Hernández, 2003):

$$M = \frac{\frac{A_n}{a_c} * g * a_c^{0,25}}{Q_n^{0,5}} \quad (45)$$

An: área de cada punto aforado, en m².

a_c: ancho del cauce, en m.

g: aceleración de la gravedad, en m/s².

Q_n: caudal de cada punto aforado, en m³/s.

- El Factor de Cauce final resulta del promedio de todos los factores calculados.
- Para la altura deseada, se calculó el área específica del cauce.
- Para dicha área, se determinó el caudal del método:

$$Q = \left(\frac{\frac{A}{a_c} * g * a_c^{0,25}}{M} \right)^2 \quad (46)$$

Una vez aplicadas las ecuaciones anteriormente descritas, es necesario escoger un valor definitivo de caudal, que puede ser el obtenido por una fórmula en particular o el promedio de ellos. Para la presente investigación, se ha introducido un parámetro estadístico importante denominado puntuación Z.

El puntaje o puntuación Z es un puntaje estandarizado que transforma los valores de una distribución normal con el objetivo de analizar su distancia respecto al promedio, en unidades de desviación estándar (Tripod, s.f.). La expresión utilizada es:

$$z = \frac{x - u}{\sigma} \quad (47)$$

z: valor transformado a unidades de desviación estándar.

x: valor a transformar, en sus propias unidades.

u: promedio de la distribución de datos original, en sus propias unidades.

σ: desviación estándar de la distribución de datos original.

Cada método permite obtener un valor de caudal, por lo que se tiene para cada altura tres valores de caudal. El método facilita escoger el caudal a aplicar al transformar dichos valores

a unidades de desviación estándar y se establece como regla promediar únicamente aquellos valores cuyo valor z se encuentre dentro del rango -0,8 hasta 0,8 (en unidades de desviación estándar); es decir, los caudales que se encuentren cercanos entre sí.

2.7.11. Ajustes al modelo.

Establecidas las herramientas de comparación y calibración del modelo (nodo que almacena alturas de agua y aforos), se procedió a variar el número de la curva hasta ajustar el hidrograma determinado por el modelo con el real producido por la tormenta. Los demás parámetros aplicados se ajustaron de manera satisfactoria a la zona de estudio.

2.8. Programación del modelo lluvia escorrentía para Hydrovlab.

Una vez desarrollado y calibrado el modelo lluvia escorrentía se procedió a desarrollar el código de programación y depurarlo.

Para esta investigación, se aplicó el lenguaje de programación orientado a objetos Visual Basic .NET, la última generación del lenguaje Visual Basic, el cual permite crear de manera fácil y rápida aplicaciones .NET, como servicios Web XML y aplicaciones Web (Microsoft, Lenguaje Visual Basic, 2017). Se escogió este lenguaje, debido a su versatilidad entre los lenguajes orientados a objetos, que permitió manipular la información de ingreso para la obtención de resultados específicos de egreso.

Para su correcta compilación y desarrollo, se aplicó el software gratuito Visual Studio .NET, en su versión Express, el cual comprende un conjunto de herramientas de desarrollo para la construcción de aplicaciones Web ASP, servicios Web XML, aplicaciones para escritorio y aplicaciones móviles (Microsoft, Introducción a Visual Studio .NET, 2017). Además, se ha complementado la revisión del código con el software gratuito de Microsoft: Visual Studio Code.

2.8.1. Generalidades de la programación

La eficacia del código radicó en la declaración correcta y ordenada de las variables involucradas. Por facilidad, el código se ha dividido en varias partes y se destaca las más importantes:

- Entrada de datos, las cuales podrán ser modificadas en trabajos posteriores, con la finalidad de redireccionar la toma de datos desde un servidor, una carpeta local o la nube. De cualquier manera, las variables de entrada se resumen en: duración efectiva de la tormenta y las precipitaciones totales sobre las subcuencas.
- Hidrograma unitario sintético: se cargó la información del Hidrograma Unitario Sintético del Soil Conservation Service en un Datatable (tabla de datos). Luego, el código realiza los cálculos y rellena las filas con el comando Rows e Item.
- Declaración de datos morfológicos e hidrológicos del tránsito.
- Se declaró la Precipitación Efectiva por el Número de la Curva.

- Seguidamente, se escribió el código a usarse en el caso de existir una suma de hidrogramas: Cada nuevo hidrograma generado se declara como una copia del anterior con el comando Copy(), y se rellena los datos como la suma de los hidrogramas que lo forman, con un For To - Next para replicarlo por cada fila.
- Los tanteos para la obtención de la altura (h) implicaron la declaración de variables morfológicas para cada tramo y la ejecución de una rutina Do Until – Loop, la cual prueba valores de h para las condiciones descritas en esta metodología. Las variables declaradas en esta rutina son exclusivas de ellas, por lo cual únicamente se declaró en su interior las no necesarias para su posterior uso.
- Encontrado el h, con una precisión de 0,000001, se determina K, X y las constantes c_1 , c_2 y c_3 . El relleno de datos para el nuevo hidrograma se desarrolla en una porción de código parecida a la usada en la “suma”, con la diferencia que se introduce para cada fila la fórmula del Método Muskingum – Cunge.
- Las partes del código de la suma y el tránsito se replican cada vez que sea necesario en el modelo. Es importante denotar que al construirse un hidrograma por cada evento, el usuario puede llamar a la pantalla cualquier hidrograma que desee en cualquier momento de desarrollo del código, siempre y cuando esta rutina ya se haya ejecutado.

Además de los comandos mencionados, también se ha aplicado condicionales If Then – End If para la decisión de variables, como la usada en el Método Sección Pendiente, códigos operacionales como Math.Round (para redondear), Math.Min (cálculo del valor mínimo), Math.Sqrt (raíz cuadrada), Math.Abs (valor absoluto), entre otras.

Para mejora en la operatividad del modelo y de economía en consumo de memoria, las variables numéricas se las ha declarado como tipo de dato Single, ya que únicamente ocupa 32-bit (4-byte) de memoria.

Desarrollada la programación, se ingresa el código al Hydrovlab. El Laboratorio Virtual de Hidrología es una iniciativa académica que tiene por finalidad proporcionar a estudiantes y profesionales un medio que permita observar, experimentar y comprender el comportamiento de un sistema hidrológico y la interrelación de las variables en éste involucradas (Oñate-Valdivieso, 2010).

Finalmente, considerando que algunos parámetros implementados en el modelo pueden ser objeto de actualización, la plataforma en Hydrovlab presenta una sección de Administrador, la cual facilita al investigador la variación de los parámetros determinados en esta investigación.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Hidrogramas de Subcuencas e Intercuencas

La metodología desarrollada permite determinar un nuevo hidrograma por cada subcuenca e intercuenca cada vez que la precipitación total sobre la zona de estudio cambie. Esto necesariamente deberá ir enlazado con las imágenes proporcionadas por el radar y que deberán encontrarse calibradas para representar su información en unidades de precipitación (milímetros).

Los hidrogramas obtenidos para determinado evento son únicos y dependen de las características de las subcuencas así como de la precipitación efectiva.

3.2. Número de la Curva

En la etapa de desarrollo del modelo, se realizó una primera estimación del número de la curva. Luego de la comparación de los resultados del modelo con las condiciones reales proporcionadas por la curva de descarga y los aforos de la sección de estudio, se procedió a realizar un ajuste a este parámetro. A continuación se presenta el número de la curva para cada subcuenca e intercuenca delimitada en la presente investigación.

Tabla 5. Coordenadas de inicio y fin de tramos de Tránsito

Número de la Curva	
Subcuenca 1	62,49
Subcuenca 2	62,73
Subcuenca 3	60,49
Subcuenca 4	61,85
Subcuenca 5	57,89
Subcuenca 6	58,18
Subcuenca 7	65,52
Subcuenca 8	64,93
Subcuenca 9	58,87
Intercuenca 1	61,14
Intercuenca 2	62,56
Intercuenca 3	61,25
Intercuenca 4	62,43
Intercuenca 5	57,41
Intercuenca 6	59,37
Intercuenca 7	68,02

Fuente: Elaboración Propia

3.3. Parámetros Hidrológicos

De menor impacto en el modelo, como son los datos del cauce por el cual se transitan los hidrogramas, así como datos de solera y cotas, poseen poca probabilidad de cambiar en los próximos meses. Sin embargo, los taludes sí se verán influenciados por la ocurrencia de fenómenos naturales a lo largo de los cauces a transitar los hidrogramas.

El coeficiente de rugosidad de Manning se obtuvo para cada sección inicial y final de los tramos del tránsito, estimándolo con las características propias del cauce de estudio. Se presenta un cuadro resumen del mismo.

Tabla 6. Coeficiente de rugosidad de Manning para los tramos de la zona de estudio

Tramo 1	
Sección 1	0,055
Sección 2	0,035
Tramo 2	
Sección 1	0,035
Sección 2	0,066
Tramo 3	
Sección 1	0,066
Sección 2	0,052
Tramo 4	
Sección 1	0,052
Sección 2	0,093
Tramo 5	
Sección 1	0,093
Sección 2	0,076
Tramo 6	
Sección 1	0,076
Sección 2	0,061
Tramo 7	
Sección 1	0,061
Sección 2	0,062
Tramo 8	
Sección 1	0,062
Sección 2	0,074

Fuente: Elaboración Propia

Es probable que en un futuro, este coeficiente cambie para determinados puntos de los tramos, en lo referente a vegetación y obstrucciones ocasionadas por la propia naturaleza y sus fenómenos. Por este motivo, se ha previsto la posibilidad de actualizar este parámetro a través de la interfaz del Hydrovlab.

3.4. Hidrograma de Crecida

Un único hidrograma, en horas y en m³/s, es generado por cada subcuenca e intercuenca, que representa el comportamiento de dicho elemento durante una tormenta. Cada variación de precipitación total genera un nuevo hidrograma, diferente a sus antecesores y preparado para su respectiva “suma” y tránsito en la zona de estudio.

3.5. Método Muskingum – Cunge

Los parámetros K y X incluidos en el modelo, se recalculan cada vez que se posee nueva información de precipitación. Además, este recálculo implica una operación de tanteos entre el caudal de entrada y el calculado, siendo el K y X a usar el obtenido con la última iteración, en la que los caudales llegan a ser similares,

Tomando como referencia el evento de precipitación analizado del 09 de marzo de 2017, se aprecia que los valores obtenidos en K son mayores, cuanto mayor es la longitud del tramo del tránsito, además que todos los valores del factor X oscilan de 0,45 a 0,48, con excepción del tercer tramo, que es de 0,36.

Culminado el proceso de suma de aportaciones de las subcuencas e intercuencas, así como su respectivo tránsito, a la salida de la zona de estudio se obtiene un hidrograma de salida, que refleja las condiciones finales de los ríos de la hoya de Loja. Los resultados de este hidrograma final dependen de la calibración realizada a todo el modelo, a la precipitación recibida y a la morfología aguas arriba. Revisados los datos previos a la salida de este hidrograma y luego de la calibración y ajuste del modelo, se aprecia resultados satisfactorios del modelo, que reflejan condiciones hidrológicas similares a las reales en la zona de estudio.

3.5.1. Altura de agua registrada por el nodo.

En la Figura 10, se presentan todos los datos de altura registrados por el nodo en todo el mes en el que se encontró operativo. Es notoria la variación de altura de agua como consecuencia de los eventos de precipitación suscitados en el mes de marzo de 2017.



Figura 10. Representación gráfica de los datos registrados por el nodo
Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Aforos

Aplicando el método numérico, se determina el caudal registrado en cada uno de los aforos realizados, lo que permite graficar la curva de descarga, caudal versus altura de agua.

El detalle de fechas de los aforos representativos realizados se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Detalle de aforos realizados

#	Fecha de Aforo	Hora de Inicio	Hora de Culminación
1	2017-03-16	07:45	08:24
2	2017-03-17	14:55	15:20
3	2017-03-18	15:20	16:15
4	2017-04-01	17:33	18:20
5	2017-04-02	11:40	12:30

Fuente: Elaboración Propia

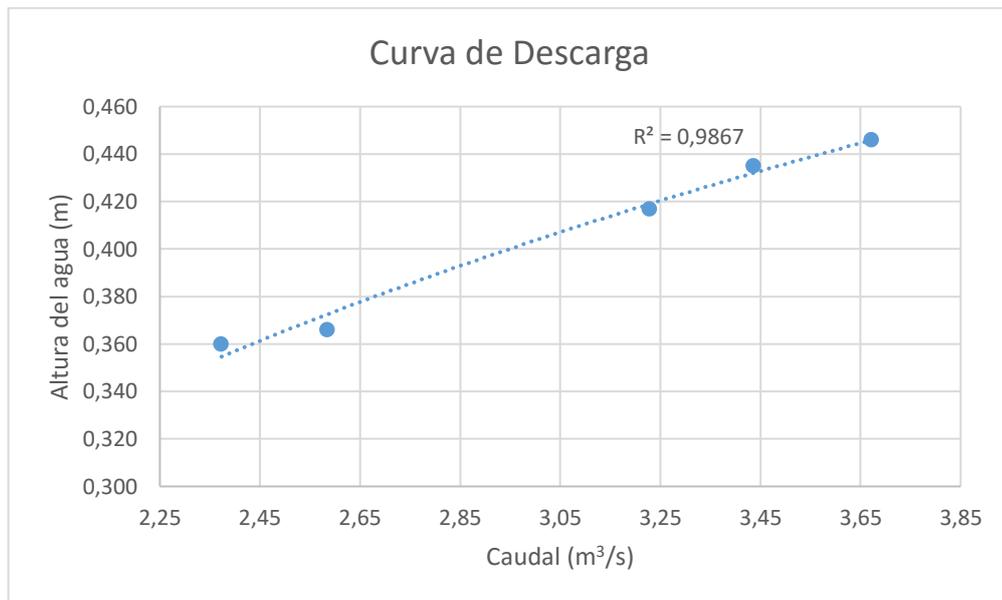


Figura 11. Curva de Descarga en la sección de estudio

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Extrapolación de la Curva de Descarga

Aplicados los métodos descritos, se obtiene:

Para el Método Analítico de Primer Orden, la ecuación resulta:

$$Q = 30,401 * (h - 0,287)^{0,514} \quad (48)$$

Para el Método de la Ecuación de Manning:

$$Q = 2,478 * \frac{h - 0,1621}{0,0951} \quad (49)$$

Para el Método Ruso:

$$Q = \left(\frac{\frac{A}{11,276} * 9,81 * 11,276^{0,25}}{4,484} \right)^2 \quad (50)$$

Donde el Área para la sección de estudio es igual a:

$$A = \left(11,276 + \left(\frac{1,66 + 2,48}{2} \right) * h \right) * h \quad (51)$$

La experiencia en la aplicación de las diferentes ecuaciones empíricas ha demostrado que en casos particulares algunos métodos brindan resultados similares y en otros pueden ser totalmente distintos. En el Método de la Ecuación de Manning, para alturas de agua mayores a 1,00 metro, brinda valores de caudal muy alejados a los proporcionados por el Método Analítico de Primer Orden y el Ruso. Es ahí que se denota la importancia de aplicar el método puntuación Z en el código, el cual descartará del promedio los valores lejanos de los demás.

3.5.1. Flujo Base

Aplicando los datos del nodo, se separó el flujo base de la escorrentía directa, determinándose un valor de 2,64 m³/s. Este será el aplicado para cada hidrograma presentado en el modelo lluvia escorrentía.

3.5.2. Comparación y calibración

Para determinada altura y en determinado evento captado por el nodo, el caudal determinado por el modelo debe ser similar al extrapolado mediante la curva de descarga. Debido a la eficacia en la aplicación del modelo, fue únicamente necesario la calibración de los valores correspondientes al número de la curva los que se requirió ajustar a fin de lograr el correcto desarrollo del modelo lluvia escorrentía.

Para la calibración se analizó:

- Figura 12: evento del 08 de marzo de 2017, iniciado a las 23:44 hasta el 10 de marzo de 2017, a las 03:18. Este evento fue usado para la calibración general del modelo mediante el ajuste del número de la curva y revisión de ecuaciones empíricas.

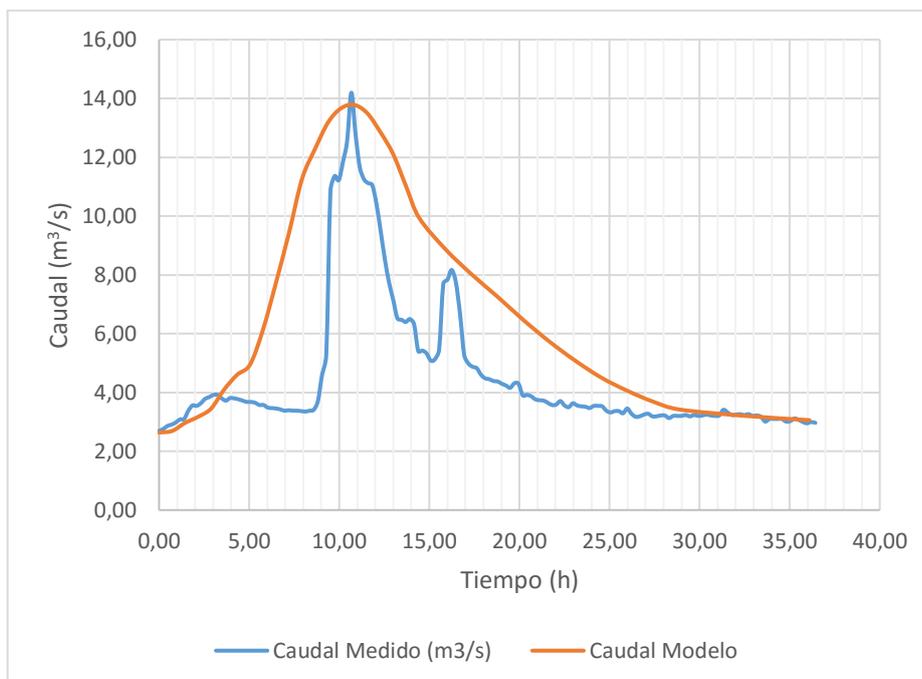


Figura 12. Comparación Caudal medido versus Caudal obtenido – Evento 1
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 refleja un evento de precipitación de gran magnitud propio de la época invernal. En lo referente a caudales principales, son modelados de una manera satisfactoria. Si bien es cierto, la figura no sigue la forma compleja del comportamiento de la tormenta en determinados puntos, estos son mayorados hasta alcanzar el caudal pico y desciende hasta llegar a determinado tiempo en el que el caudal modelado y el real coinciden.

- Figura 13: evento del 07 de marzo de 2017, iniciado a las 05:19 hasta el 07 de marzo de 2017, a las 23:48. Evento usado para ajustes del modelo.

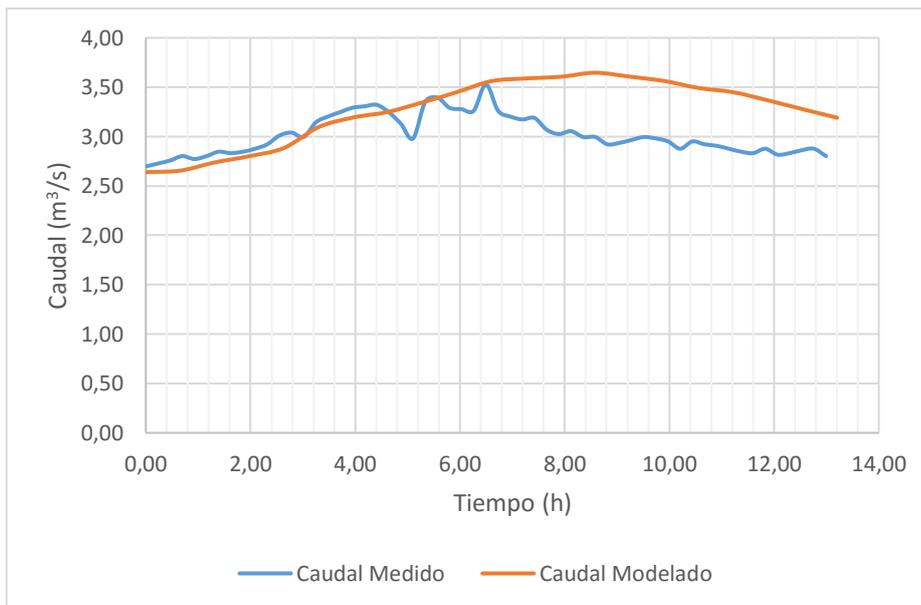


Figura 13. Comparación Caudal medido versus Caudal obtenido – Evento 2
Fuente: Elaboración propia

- Figura 14: evento del 08 de marzo de 2017, iniciado a las 00:02 hasta el 08 de marzo de 2017, a las 23:17. Evento usado para verificación del modelo.

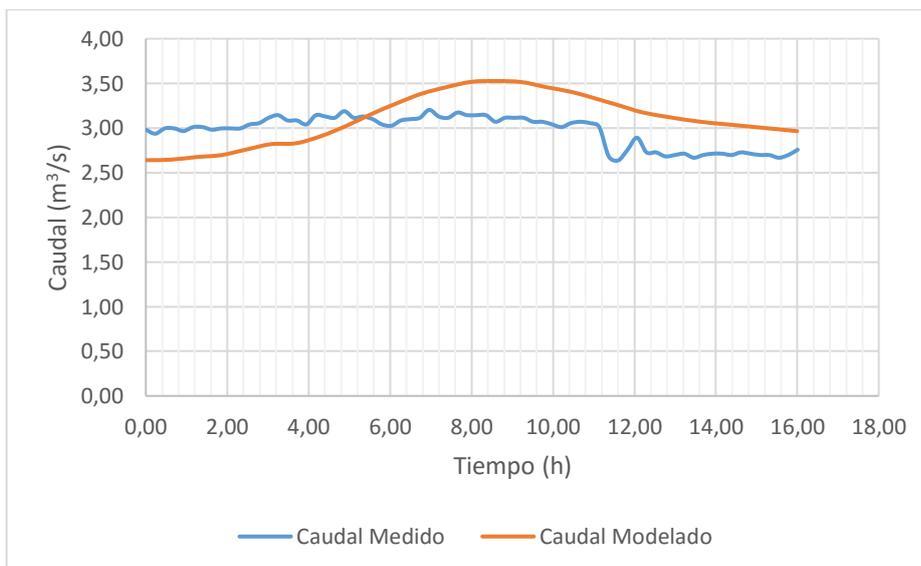


Figura 14. Comparación Caudal medido versus Caudal obtenido – Evento 3
Fuente: Elaboración propia

Es evidente que varias de las condiciones presentadas por los hidrogramas reales no se satisfacen por completo, ya que existen demasiadas variables involucradas bajo un evento hidrológico y la utilización de modelos empíricos aleja al diseñador de un modelado matemático perfecto.

3.6. Implementación del modelo lluvia escorrentía en Hydrovlab.

El Modelo Lluvia Escorrentía desarrollado en la presente investigación ha sido implementado en Hydrovlab, el cual trabaja satisfactoriamente con los datos radar proporcionados para el efecto y se encuentra disponible en el siguiente enlace: <https://goo.gl/sWU2p9>. También, se puede acceder entrando a: www.hydrovlab.utpl.edu.ec, en la pestaña Simulación, acceder a “Modelo de Lluvia Escorrentía” y clic en el apartado: “Modelo de Lluvia Escorrentía usando datos radar”.

A continuación se presentan capturas de pantalla del modelo en el Laboratorio Virtual de Hidrología.

The screenshot shows the Hydrovlab website interface. At the top, there are logos for Universidad Técnica Particular de Loja, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Universidad Nacional de Chimborazo, and CEDIA. The main header reads 'Laboratorio Virtual de Hidrología' with the subtext 'Proyecto financiado por CEDIA'. Below the header is a navigation menu with items: Bienvenidos, Simulación, Análisis, Diseño, Foros, Wiki, and Equipo. A breadcrumb trail shows 'Estás aquí: Admin > pLluviaEscorrentía' and 'Registro | Entrar' is visible on the right.

On the left side, there is a 'Categorías' sidebar with a list of topics including 'Análisis estocástico', 'Evapotranspiración', 'Hidráulica de Pozos', 'Infiltración', 'Lluvia escorrentía', 'Modelo de Lluvia Escorrentía', 'Producción de sedimentos', 'Simulación continua', 'Tránsito de Avenidas', and 'Transporte de sedimentos'.

The main content area is titled 'Aplicaciones Existentes' and contains a table with the following data:

Aplicación	Descripción
Modelo de Lluvia Escorrentía	Simula la escorrentía superficial, mediante el hidrograma unitario adimensional del S.C.s y el tránsito de avenidas por el método de Muskingum Cunge.
Modelo de Lluvia Escorrentía usando datos radar	Simula el comportamiento de las subcuencas que conforman la hoya de Loja durante un evento de precipitación, aplicando datos de radar LAWR, datos morfológicos de las cuencas, del cauce principal, hidrogramas unitarios sintéticos y tránsito de avenidas por el Método Muskingum - Cunge. Presenta hidrogramas específicos para cada subcuenca, e hidrogramas de entrada y salida de la zona de estudio.

At the bottom of the page, there is a footer with navigation links: BIENVENIDOS | ANÁLISIS | DISEÑO | SIMULACIÓN | FORUM | WIKI | EQUIPO. Below this, there are links for 'Declaración de Privacidad' and 'Términos de Uso', and a copyright notice: 'Copyright 2010 Laboratorio Virtual Hidrología (hydrovlab)'.

Figura 15. Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrovlab
Fuente: Elaboración propia

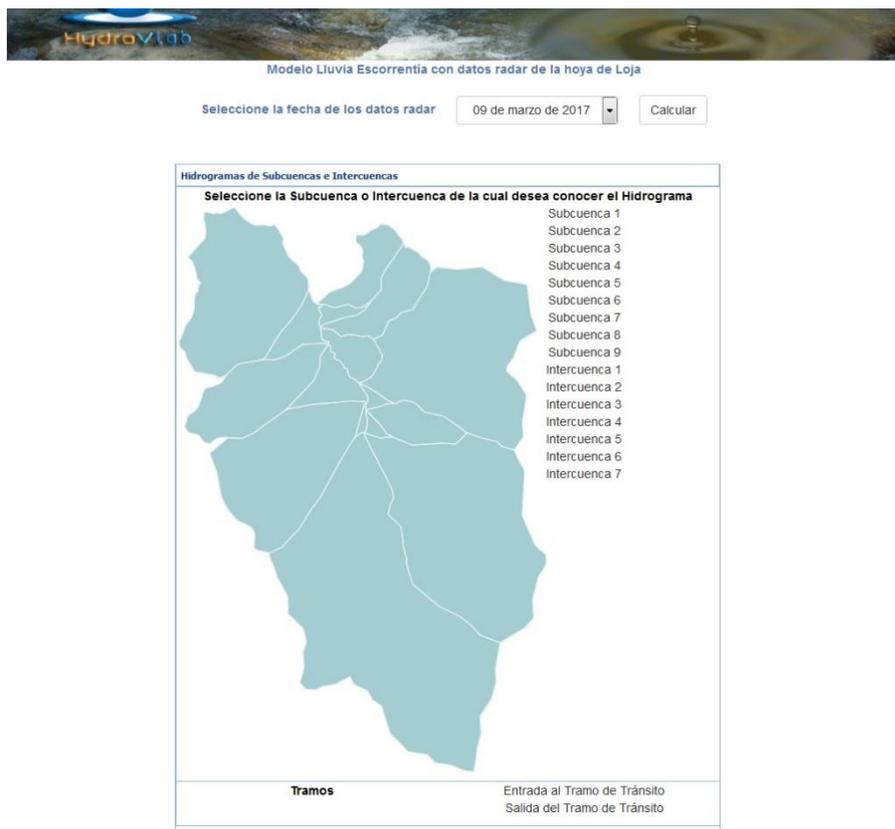


Figura 16. Interfaz del Modelo Lluvia Escorrentía
Fuente: Elaboración propia

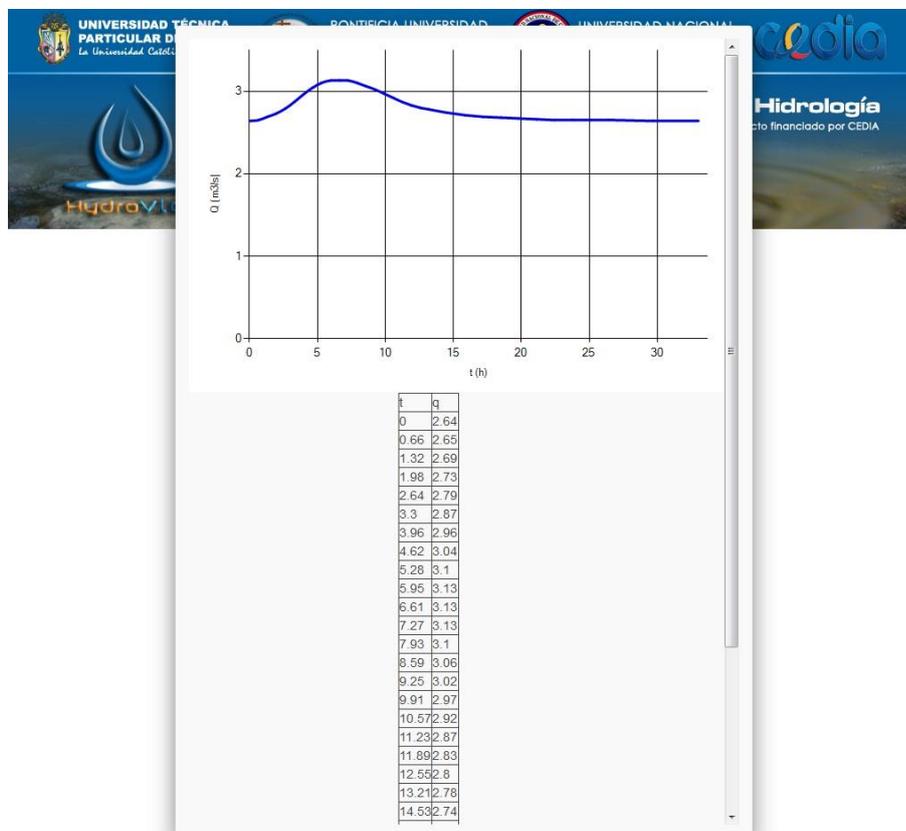


Figura 17. Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrolab
Fuente: Elaboración propia



Página Administrador del Modelo Lluvia Escorrentía con datos radar

Cargue los datos almacenados en el sistema

Datos ajustables que utiliza el Modelo Lluvia Escorrentía con datos radar	
Número de la Curva (16 líneas: 9 subcuencas y 7 intercuenas):	62.87
	62.84
	60.56
	62.33
	57.9
	58.68
	65.62
	64.99
	58.87
	63.14
	64.48
	63.21
	63.84
	57.97
59.63	
68.69	
n1 de Irregularidad para n de Manning (9 líneas: Línea 1 y 2 para Tramo 1 del Tránsito y las líneas siguientes para otros tramos):	0.008
	0.002
	0.007
	0.005
	0.006
	0.004
	0.003
	0.007
	0.003
	0.001
0.001	

Figura 18. Página Administrador Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrovlab
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado satisfactoriamente un modelo lluvia esorrentía que utiliza datos de radar LAWR y se ejecuta en lenguaje Visual Basic .NET en el Laboratorio Virtual de Hidrología, como un primer acercamiento a un modelo numérico meteorológico que permita a futuro desarrollar e implementar un sistema de alerta y pronóstico hidrológico
- Se ha identificado 9 subcuencas y 7 intercuencas en la hoya de Loja, las cuales contribuyen en la superposición de hidrogramas y el aumento de caudales en distintos puntos de la cuenca.
- Se ha obtenido 8 tramos de tránsito de avenidas, basados en el ingreso de aportes al cauce principal, cambios significativos de las condiciones morfológicas y en la longitud de avance de cada tramo.
- La herramienta Modelo Lluvia Escorrentía en Hydrovlab permite la determinación del hidrograma de salida de la zona de estudio, proporcionando cada determinado tiempo la duración efectiva de la tormenta y la precipitación, en milímetros, en cada subcuenca o intercuenca delimitada en la presente investigación.
- La diferencia existente entre la forma del hidrograma presentado y el evento real de precipitación se debe a que el planteamiento teórico de un hidrograma unitario supone que la precipitación e intensidad se encuentran distribuidas uniformemente sobre la cuenca de estudio durante la duración del exceso de lluvia. En la práctica, como se ha podido evidenciar, estas condiciones no se satisfacen por completo, ya que son muchísimas las variables involucradas bajo un evento hidrológico y la utilización de modelos empíricos aleja al diseñador de un modelado matemático perfecto.
- La implementación de sistemas que usen tecnologías radar, sistemas combinados de placa SODAQ y GPRS, en combinación con el modelo numérico de lluvia esorrentía permitirá obtener datos atmosféricos en tiempo real y mejorar el pronóstico de eventos de precipitación.
- Varias investigaciones anteriormente citadas se han enfocado en mejorar la precisión de los datos radar, su calibración y presentación; la presente investigación se ha orientado a la aplicación de datos radar, combinándolos con un modelo lluvia esorrentía para la hoya de Loja, calibrándolos con el uso de tecnología de ultrasonido permanente y haciéndolos disponibles en plataformas alimentadas de información en tiempo real.

RECOMENDACIONES

- Todos los parámetros establecidos en la presente investigación son aplicables únicamente a la zona de estudio. Cualquier análisis que se realice en otro escenario, deberá tener en cuenta sus características particulares. En situaciones similares, varios factores podrán usarse sin temor a una gran variación de resultados.
- Nuevas investigaciones deberán enfocarse en la determinación del flujo base particular para cada subcuenca, intercuenca y tramo a transitar. Esto permitirá brindar una mayor confiabilidad a los resultados del modelo lluvia escorrentía. Al haber sido determinado el flujo base de la presente investigación en temporada de altas crecidas y continuas precipitaciones, se recomienda la réplica de dicha metodología en períodos secos.
- Las fórmulas presentadas en la presente investigación han sido revisadas de acuerdo a las últimas actualizaciones presentes. Algunos cambios han sido introducidos en algunas de ellas, como por ejemplo la fórmula del SCS para el factor pico. Se invita al investigador a revisar bibliografías actualizadas y las ya citadas en esta investigación, y sólo de darse el caso de presentar similares condiciones con la presentada como zona de estudio deberá adoptarse dichos factores.
- Varios de los parámetros morfológicos e hidrológicos presentados en esta investigación difícilmente variarán con el tiempo, sin embargo, se alienta al investigador a revisar las condiciones de la zona de estudio antes de usar dichos parámetros para posteriores estudios. Sucesos excepcionales como el fenómeno de El Niño pueden influir en los resultados del modelo.
- Mayor acercamiento a tecnologías que involucren radares, con el fin de evaluar limitaciones y beneficios de su aplicación no sólo en actividades investigativas, sino también en el ámbito industrial y económico, que beneficie sectores populares así como empresariales en sus actividades cotidianas.
- La posterior automatización en la calibración de las imágenes radar permitirá obtener datos en tiempo real de caudales en determinados puntos de la zona de estudio, permitiendo un acercamiento al desarrollo de un sistema de alerta y pronóstico hidrológico.
- El modelo desarrollado puede considerarse como un primer paso de un proceso sucesivo para llegar al pronóstico hidrológico en nuestra ciudad y país. Futuras investigaciones deberán enfocarse en la determinación de parámetros hidrológicos con mayor precisión y revisión de las variables aplicadas en el modelo desarrollado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abhinanda, R., & Reeba, T. (2016). A Comparative Study On The Derivation Of Unit Hydrograph For Bharathapuzha River Basin. *Procedia Technology* 24, 62-69.
- Academic. (s.f.). *Academic*. Obtenido de Banda X: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/143180>
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México D.F.: Limusa.
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. Denver: Departamento de Transporte de EE.UU., Administración Federal de Carreteras.
- Borup, M., Grum, M., Linde, J. J., & Mikkelsen, P. S. (2009). Application of high resolution x-band radar data for urban runoff modelling: constant vs. dynamic calibration. *8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas*, 10-13.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá: McGRAW-HILL.
- DHI. (2010). Radar Local de Lluvias. *LAWR – Local Area Weather Radar*, 11.
- Einfalt, T., Jessen, M., & Mehlig, B. (2005). Comparison of radar and raingauge. *Water Science & Technology* 51(2), 95-201.
- Fattorelli, S., Casale, R., Borga, M., & Da Ros, D. (1995). *Integrating Radar and Remote Sensing Techniques of Rainfall*. Padua: The European Contribution: Perspectives and Prospects.
- Galkate, R. V., Jaiswal, R. K., Thomas, T., & Nayak, T. R. (2011). Rainfall Runoff Modeling Using Conceptual NAM Model. *National Institute of Hydrology*.
- Germán, M. S. (2006). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Goormans, T. (2011). *Analysis of Local Weather Radar Data in Support of Sewer System Modelling*. Lovaina: Katholieke Universiteit Leuven, Department of Civil Engineering.
- Granato, G. (2012). Estimating Basin Lagtime and Hydrograph-Timing Indexes Used to Characterize Stormflows for Runoff-Quality Analysis. *Scientific Investigations Report 2012–5110*, 1-58.
- Haan, C. T., Barfield, B. J., & Hayes, J. C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. *Academic Press Inc. United Kingdom*, 77.
- Hersch, R. W. (1995). *Streamflow Measurement*. Londres: CRC Press; Segunda Edición.
- Instituto Geográfico Militar-Ecuador. (s.f.). *Ubicación Geográfica - Loja*. Obtenido de <http://www.loja.gob.ec/contenido/ubicacion-geografica>
- Jensen, N. E. (2002). X-Band local area weather radar - Preliminary calibration results. *Water Science & Technology* 45(2), 135-138.
- Jensen, N. E. (2004). *Local Area Weather Radar Documentation*. Hoersholm: DHI Water and Environment.

- Jensen, N. E. (2005). Spatial variability of rainfall: variations within a single radar pixel. *Atmospheric Research* 77 (1-4), 269-277.
- Jensen, N. E., & Oveergard, S. (2002). Performance of small X-band weather radar. Western Pacific Geophysics meeting. Wellington New Zealand.
- Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. New York: Cambridge University Press.
- Limerinos, J. T. (1970). Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B*, 47.
- Lopes da Silveira, A. L. (2015). Fator de Pico para Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 21 no.1, 46-52.
- McCuen, R. H., & Bondelid, T. R. (1983). Estimating unit hydrograph peak rate factors. *J. Irrig. Drain Eng.*, v. 109, n. 2, 238-250.
- Microsoft. (2017). *Introducción a Visual Studio .NET*. Obtenido de [https://msdn.microsoft.com/es-es/library/aa291755\(v=vs.71\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/aa291755(v=vs.71).aspx)
- Microsoft. (2017). *Lenguaje Visual Basic*. Obtenido de [https://msdn.microsoft.com/es-es/library/aa903378\(v=vs.71\).aspx](https://msdn.microsoft.com/es-es/library/aa903378(v=vs.71).aspx)
- Mockus, V. (1957). *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application*. Sacramento: American Geophysical Union, Pacific Southwest Region.
- National Weather Service. (s.f.). *How Radar Works*. Obtenido de <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/doppler/how.html>
- Natural Resources Conservation Services. (1972). *National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology*. United States Department of Agriculture.
- Oñate-Valdivieso, F. (2010). *Presentación Laboratorio Virtual Hidrología (hydrovlab)*. Obtenido de <http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/>
- Pendersen, L., Jensen, N. E., & Madsen, H. (2010). Calibration of Local Area Weather Radar—Identifying significant factors affecting the calibration. *Atmospheric Research* 97 (1–2), 129-143.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology, Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Ponce, V., & Yevjevich, V. (1978). Muskingum-Cunge method with variable parameters. *Technical Notes*, 1663-1667.
- Putnam, A. (1972). Effect of Urban Development on Floods in the Piedmont Province of North Carolina. *U.S. Geological Survey*, 72-304.
- Radar Network South Ecuador. (s.f.). *Radar Network South Ecuador*. Obtenido de <http://www.radarnetsur.gob.ec/>
- Radescan. (2017). *Radescan*. Obtenido de ¿Qué es un Radar?: <https://goo.gl/3AqDWj>

- Ramírez, J. A. (2000). *Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics. Chapter 11 of Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities Eds. Ellen Wohl*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Richter, M. (2003). Using plant functional types and soil temperatures for eco-climatic interpretation in southern Ecuador. *Erdkunde* 57, 161-181.
- Rollenbeck, R., & Bendix, J. (2006). Experimental calibration of a cost-effective X-band weather radar for climate ecological studies in southern Ecuador. *Atmospheric Research* 79 (3-4), 296-316.
- Salas, V. M., Macedo, A., Paz, F., Ortíz, C., & Palacios, E. (2015). Modelación no lineal de la separación del flujo base en subcuencas de Chiapas, México. *Terra Latinoam vol.33 no.4*, 2-14.
- Sánchez, J. (2013). Tránsito de Hidrogramas. 10.
- Schilling, W. (1991). Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research* 27 (1-3), 5-21.
- Seed. (s.f.). Seed. Obtenido de <https://www.seedstudio.com/GPRS-Bee-w%26amp%3B-SIM-800-Module-p-1920.html>
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Eng. News Rec.* 108, 501-505.
- Singh, V. P. (1992). *Elementary Hydrology*. Prentice Hall.
- SODAQ. (04 de Mayo de 2017). *Introduction to programming SODAQ Boards*. Obtenido de <http://support.sodaq.com/sodaq-one/>
- Subramanya, K. (2008). *Engineering Hydrology*. New Delhi: McGraw-Hill.
- Thorndahl, S., & Rasmussen, M. R. (2012). Marine X-band weather radar data calibration. *Atmospheric Research* 103, 33-44.
- Tripod. (s.f.). *Tripod*. Obtenido de Puntaje Z: <http://aathosc.tripod.com/PuntajeZ22.htm>
- Ubidots. (s.f.). *Ubidots*. Obtenido de <https://ubidots.com/about>
- Vera Hernández, L. E. (2003). Análisis de Aforo de la Estación Hidrométrica Obrajillo - período 2000 - 2001. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 1-20.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (1995). *Introduction to Hydrology*. Harper Collins.
- Wanielista, M. (1997). *Hydrology and Water Quality Control*. Ed. Wiley.
- WATER RESOURCES COUNCIL. (1981). *Estimating peak flow frequencies for natural ungaged watersheds: a proposed nationwide test*. Washington, D.C.: U.S. Water Resources Council, Hydrology Committee.
- Woodward, D. E., Welle, P. I., & Moody, H. F. (1980). Urban stormwater management in coastal areas. *American Society of Civil Engineers*, 99-107.
- Xiaofang, R., Fanggui, L., & Mei, Y. (2008). Discussion of Muskingum method parameter X. *Water Science and Engineering*. 1 (3), 16-23.