



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CUENCA
HIDROGRÁFICA TROPICAL UTILIZANDO ÍNDICES
HIDROLÓGICOS. ESTUDIO DE CASO CUENCA DEL
RÍO PAUTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: FRANKLIN FABRICIO SARI GUAMBAÑA

DIRECTOR: ING. CARLOS MARCELO MATOVELLE BUSTOS

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA
TROPICAL UTILIZANDO ÍNDICES HIDROLÓGICOS. ESTUDIO DE CASO
CUENCA DEL RÍO PAUTE

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: FRANKLIN FABRICIO SARI GUAMBAÑA

DIRECTOR: ING. CARLOS MARCELO MATOVELLE BUSTOS

CUENCA– ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Franklin Fabricio Sari Guambaña portador de la cédula de ciudadanía N° **0107268997**. Declaro ser el autor de la obra: **“Análisis del comportamiento de una cuenca hidrográfica tropical utilizando índices hidrológicos. estudio de caso cuenca del río Paute”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

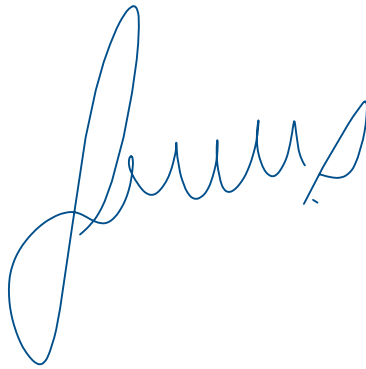
Cuenca, **12 de enero de 2022**

F: 

Franklin Fabricio Sari Guambaña
0107268997

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Franklin Fabricio Sari Guambaña,
bajo mi supervisión.



Ing. Carlos Marcelo Matovelle Bustos

DIRECTOR

Agradecimientos

A mi papá y mi mamá (Ángel y Luisa), que con su infinito esfuerzo y sacrificio siempre me han previsto de las cosas necesarias para poder haber llegado a este punto de mi vida: consejos, valores, ejemplos y regaños. No me va a alcanzar la vida para devolverles todo lo que han hecho por mí y mis hermanos, ruego a dios que me bendiga para que siempre sigan conmigo y seguir cumpliendo mis metas.

A mi alma mater, la UCAUCE y a todos los que conforman la Facultad de Ingeniería Civil, donde conviví a gusto y me desarrollo como persona y profesional, solo me resta decirles, Gracias.

RESUMEN

El trabajo a continuación analiza la cuenca del río Paute a través de la aplicación de los Índices de Alteración Hidrológica (IHA), para ello en primera instancia se ha empleado datos meteorológicos registrados por el INAMHI, dichos datos fueron homogeneizados y normalizados para luego desarrollar un modelo lluvia-escorrentía empleando el método SMA (Soil-Moisture Accounting), el cual deduce la precipitación que generará escorrentía.

Al modelo se ingresó la superficie de la cuenca, los causes y los valores de evapotranspiración, después el modelo fue calibrado haciendo uso de caudales observados de cuatro estaciones hidrológicas y el módulo “optimization trial” del programa HEC-HMS, de igual forma el modelo fue validado empleando las medidas de bondad de ajuste NSE y KGE, estas medidas compararon los caudales simulados y observados calificando el modelo de satisfactorio a bueno.

Con los caudales simulados se calcularon los IHA, estos índices caracterizaron a la cuenca del río Paute con una buena retención y regulación de la humedad ($IRH = 0.81$), la pendiente del tercio medio ($R2FDC = 0.46$) en la FDC reveló que la cuenca que tiene una buena regulación hidrológica, al igual que los valores de los índices SINDX, DAYPO y PVAR indican que la cuenca del río Paute posee una estacionalidad baja, es decir que la precipitación se reparte a lo largo de todo el año, entonces con una estacionalidad e intensidad baja de lluvia se produce caudales pequeños con variabilidad alta, ubicando a la cuenca en un estado hidrológico óptimo y exento de alteraciones.

Palabras clave: IHA, homogeneización, modelo lluvia-escorrentía, caudal simulado, comportamiento hidrológico

ABSTRACT

The following work analyzes the Paute river basin through the application of the Hydrological Alteration Indexes (HAI), for which meteorological data recorded by INAMHI were first used. These data were homogenized and normalized to then develop a rainfall-runoff model using the SMA (Soil-Moisture Accounting) method, which deduces the precipitation that will generate runoff.

The model was then calibrated using observed flows from four hydrological stations and the "optimization trial" module of the HEC-HMS program. The model was also validated using the NSE and KGE goodness-of-fit measures, which compared the simulated and observed flows and rated the model from satisfactory to good.

These indices characterized the Paute river basin with good retention and regulation of moisture ($IRH = 0.81$), the slope of the middle third ($R2FDC = 0.46$) in the FDC revealed that the basin has a good hydrological regulation, as well as the values of the SINDX, DAYPO, and PVAR indices indicate that the Paute river basin has a low seasonality, i.e. the precipitation is distributed throughout the year, so with a low rainfall seasonality and intensity, small flows with high variability are produced, placing the basin in an optimal hydrological state and free of alterations.

Keywords: HAI, homogenization, rainfall-runoff model, simulated flow, hydrologic behavior

ÍNDICE

CAPÍTULO I	9
Introducción	9
Antecedentes	10
Índices de Alteración Hidrológica (IHA).....	11
Objetivos del Proyecto	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos.....	14
Descripción del Área de Estudio.....	15
Ubicación geográfica.....	15
Cobertura y usos del suelo.....	16
Climatología	18
Precipitación	18
Temperatura.....	20
CAPÍTULO II.....	21
Metodología y Herramientas	21
Información Disponible.....	22
Climatol.....	24
Procedimiento de Homogeneización.....	27
Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP).....	27
Descripción del Modelo (HEC-HMS).....	28
Modelo de la Cuenca.....	29
Calibración y Validación	33
Curva de duración de caudal (FDC).....	37
Descripción de los Índices de Alteración Hidrológica.....	41
CAPÍTULO III	48
Procesamiento de la Información y Modelación en GIS.....	48
Homogeneización.....	51
Entrada de datos.....	51
Análisis exploratorio de las series	52
CAPÍTULO IV	59
Modelación Hidrológica.....	59
Calibración y Validación del modelo.....	62
Cálculo de los Índices de Alteración Hidrológica.....	63

CAPÍTULO V	65
Análisis de Resultados y Discusión	65
Calibración en el aforo H-0892.	65
Validación en el aforo H-0892.	66
Calibración en el aforo H-0896.	67
Validación en el aforo H-0896.	68
Calibración en el aforo H-0942	69
Validación en el aforo H-0942	70
Calibración en el aforo H-0895	71
Validación en el aforo H-0895	72
Análisis de los resultados de los IHA.....	73
Discusión.....	75
CAPÍTULO VI	77
Conclusiones	77
Recomendaciones.....	78
Estudios futuros.....	78
Referencias	79
Glosario	82

CAPÍTULO I

Introducción

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas empleadas como marco de referencia y objetivo del desarrollo sostenible, los resultados hidrológicos del análisis de la respuesta de una cuenca se utilizan para la gestión, planificación, desarrollo y la creación de políticas de mitigación y conservación (Egas, 2009).

El estudio de la afección integral de la variabilidad climática y actividades antrópicas en la ecología acuática (ríos, lagos y humedales) utiliza comúnmente varios modelos para la evaluación hidrológica, como: el modelo de balance hídrico, el modelo de balance dinámico de agua y sal, y los modelos numéricos basados en el método de diferencias finitas. No obstante, para cuantificar los impactos ecológicos, generalmente se emplea índices de alteración hidrológica (IHA) (Li et al., 2020).

Los IHA se pueden usar en todo el mundo debido a que emplea métodos estadísticos y analiza los indicadores hidrológicos asociados a los atributos biológicos para cuantificar cuánto se desvían las condiciones de flujo alteradas de las condiciones naturales (Zhang et al. 2019). En función de los IHA se desarrollaron una serie de métodos, como el método de rango de variabilidad (“RVA” Rango of Variability Approach) para evaluar cuantitativamente el grado de alteración hidrológica (Li et al. 2020).

Los resultados obtenidos a través de los índices de alteración hidrológica han permitido caracterizar las cuencas hidrográficas y generar políticas de protección y conservación, al mismo tiempo que se realiza el control de inundaciones, la generación de energía, el suministro de agua, entre otras funciones, lo que ha atraído la atención cada vez más de ecólogos, hidrólogos y políticos (Li et al. 2020).

Antecedentes

La cuenca del río Paute representa un espacio físico y tangible, pues permite la concurrencia de los distintos factores físicos, intereses humanos y actividades económicas; también constituye un instrumento valioso del estado y la sociedad para administrar su actividad, conciliar intereses, conservar la biodiversidad y permitir un uso sostenido de los recursos naturales, por ello la cuenca ha sido fuente de varios estudios.

Pozo (2018) analiza la vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del río Paute, donde determina que la cuenca se enfrenta al creciente cambio climático, ya que la temperatura aumenta 0.28 °C cada década, también se analiza los caudales donde indica que habrá un incremento en la escorrentía de las sub-cuencas dando volúmenes mayores de agua en la desembocadura de la cuenca, favoreciendo de cierta manera al proyecto Paute Integral. El aumento de caudales en términos de generación de energía eléctrica resulta beneficioso, sin embargo, al aumentar los caudales se produce mayor arrastre de sedimentos provocando un riesgo alto de colmatación e inundación en las zonas de menor altura.

Los Índices de alteración Hidrológica ya se han aplicado en la costa ecuatoriana, es así Giler et al. (2019) emplea los IHA para analizar el comportamiento hidrológico de 3 microcuencas en la provincia de Manabí donde determinó que la variabilidad de flujo y la capacidad de regulación son relativamente bajas, sin embargo, la pendiente del tercio medio de la FDC reveló que las microcuencas tienen buena regulación hidrológica.

De igual porfa, Ochoa (2019) aplica los IHA para analizar cuencas de páramo en los Andes tropicales, donde se emplea caudales registrados para determinar el impacto en el uso del suelo en la respuesta hidrológica, donde determinó que en general la intervención del hombre provoca el aumento de la variabilidad de caudal produciendo reducciones en la capacidad de regulación de la humedad.

El análisis de cuencas hidrográficas mediante índices permite pronosticar con cierta fiabilidad el comportamiento hidrológico de las cuencas, sin embargo, su utilización no ha sido frecuente en nuestro país y su aplicación ha estado restringido a ciertas zonas, por lo que su aplicabilidad e idoneidad de los mismos en las cuencas de la zona tropical del Ecuador no es muy conocida.

Índices de Alteración Hidrológica (IHA)

A los expertos se les atribuye el deber de determinar cuánta agua necesitan los ríos para conservar y mantener íntegros los ecosistemas ribereños y acuáticos (Taylor et al., 2003). La estabilidad de los regímenes hidrológicos mantiene la salud de los ecosistemas fluviales, por lo tanto, la evaluación de la alteración del régimen hidrológico es un requisito previo para la utilización, restauración y protección de los ríos (Zheng et al.2020).

Olden & Poff propusieron alrededor de 170 indicadores hidrológicos, sin embargo, existe una clara correlación y redundancia estadística entre ellos, Richter los simplificó a 33, estableciendo los Índices de Alteración Hidrológica (IHA), los IHA se dividen en cinco categorías: flujo medio mensual, magnitud y duración del flujo extremo anual, volumen y permanencia de temporadas extremas anuales, temporización de las condiciones extremas anuales del agua, presencia y permanencia de caudales altos y bajos, y tasa y periodicidad del cambio del estado del agua (Li et al. 2020).

El RVA analiza la alteración del régimen hidrológico comparando los IHA derivados de series de descargas en régimen natural y régimen alterado, el índice estimado en cada año se divide en tres rangos por cuartiles (por ejemplo, 33% y 67% o 25% y 75 %) que se denominan límites de RVA, el número de años que el índice cae en los dos límites de RVA se cuentan y la diferencia de la frecuencia en dos periodos definidos representa el grado de alteración hidrológica (Zheng et al. 2020).

El RVA se ha utilizado extensamente en investigaciones y caracterizaciones de cuencas, Taylor et al. (2003) aplicación el RVA a los caudales simulados en la cuenca del río Mkomazi, la evaluación se logró comparando el rango de variación del régimen hidrológico simulado en las condiciones naturales de la cuenca (antes de la presa Smithfield) con el Régimen Alterado (después de la presa mencionada).

Taylor et al. (2003) aplicó los 33 parámetros de los IHA en donde se determina las condiciones de los regímenes mensuales del agua, de igual forma, muestra las magnitudes de los pulsos bajos y altos (percentiles 25 y 75), y la alteración hidrológica. Los resultados señalan que los planes de manejo para mejorar el régimen hidrológico deben enfocarse en los intentos de incrementar los caudales en los meses de flujo bajo (julio a septiembre), ya que en este periodo se

muestra la alteración más alta del rango de RVA (-0.15) establecido con el mayor número de años por debajo del rango (es decir, la media mensual de los caudales diarios es menor que el RVA más bajo ($5.2 < 8.94$) (Taylor et al. 2003).

En consecuencia, la alteración del rango de RVA para caudales extremos es mayor para los caudales mínimos diarios y de varios días más cortos (-0.58, -.38, -0.38) respectivamente, esto produce más años en los que el mínimo de 1, 3 y 7 días los flujos no alcanzan el umbral inferior, también hay cierta depresión de los flujos base, sin embargo, la mayoría de los flujos estacionales permanecen dentro del rango objetivo (Taylor et al. 2003).

En España Martínez & Fernández (2006) han realizado la caracterización hidrológica de la cuenca del río Cabriel, donde se estudió los regímenes naturales (Antes del embalse de Contreras) y alterado (Después del embalse de Contreras), la aplicación de los IHA permitió determinar parámetros e índices, caracterizando los aspectos más relevantes de los caudales en régimen natural y evaluar la alteración del régimen natural que produce el embalse mencionado.

Martínez & Fernández (2006) consideraron 3 escalas hidrológicas (valores habituales, avenidas y sequías) obteniéndose parámetros como: magnitud, duración, estacionalidad y variabilidad. Para caracterizar la alteración hidrológica el autor propone 21 índices que considera idóneos (6 para valores habituales, 8 para avenidas y 7 para sequías). Para facilitar la interpretación los índices presentan valores de 0 a 1, siendo 0 indicativo de alteración máxima y 1 ausencia de alteración.

Los resultados obtenidos indican que en un año húmedo el aporte en régimen natural es de 452.5 hm^3 y en régimen alterado se reduce a 287.5 hm^3 dando un porcentaje de 63.5 % de variabilidad interanual, de la misma forma en un año húmedo se reduce de 115.6 a 96.8 hm^3 con una variabilidad interanual de 83.7% y 273 a 170 hm^3 , en un año ponderado (Martínez & Fernández, 2006).

La alteración de los valores habituales se evaluó para cada tipo de año: húmedo, seco, medio y ponderado, donde la magnitud de las aportaciones mensuales (0.3, deficiente) y la estacionalidad de las máximas (0.34, deficiente) son las más alteradas, en sequías los índices que presentan mayor alteración son 4: Magnitud de las sequías máximas y las sequías habituales con

0.09, Duración de las sequías con 0.11 y Estacionalidad de las sequías con 0.08, todas en un nivel muy deficiente (Martínez & Fernández, 2006).

De igual forma en la cuenca del río Júcar se evaluó la alteración hidrológica en régimen natural y régimen alterado, donde se plantea las mismas escalas hidrológicas de Martínez & Fernández (2006), pero solo para doce índices, donde el régimen que más ha tenido variabilidad es el índice de magnitudes de aportaciones anuales (0.87 A 0.5), en avenidas no existe una variabilidad significativa y en sequías se encuentra en un estatus bueno a excelente (Ortín, 2017).

Hernández & Otálora (2018) analizaron la sub-cuenca Arroyo Grande Corozal (Colombia) mediante los índices de vulnerabilidad hídrica (IVH) para establecer medidas de adaptación y mitigación. Para la obtención de caudales desarrollaron un modelo lluvia-escorrentía en el software HEC-HMS, del modelo se obtuvo los caudales medios diarios, lo que permitió estimar la oferta hídrica y la curva de duración de caudales medios diarios, permitiendo calcular el índice de retención y regulación hídrica.

Los resultados obtenidos indicaron que la cuenca presenta una muy baja retención y regulación de la humedad (0.46), es decir que no se tiene una buena retención de la humedad en la cuenca, así mismo se obtuvo el IUA (Índice del uso de agua) (0.16) el cual indica que la cuenca posee un excesivo uso del agua, por último, se determinó el IVH dando como resultados que la toda la cuenca está propensa a sufrir carencia de agua (Hernández & Otálora, 2018).

Hernández & Otálora, (2018) concluyen que los residentes en la cuenca tienen que elaborar medidas de mitigación para erradicar los impactos negativos sobre los recursos hídricos y así garantizar el agua para sus descendientes, también recomienda a las autoridades apuesten al conocimiento hidrogeológico, ya que la cuenca posee un volumen de agua subterránea significativo, pero sin dejar de preocuparse por el cuidado del agua superficial que actualmente se encuentra sobreexplotado.

En el Ecuador Giler et al. (2019) analizó 3 microcuencas tropicales de la provincia de Manabí: La Mina (LM), Rancho Palo (RP) y San Sebastián (SS) a través de los IHA y el RVA, donde escogió 5 índices: coeficiente de variación de caudales “QVAR”, pendiente del tramo medio en la FDC “R2FDC”, Regulación Hidrológica “IRH”, Duración de pulsos bajos “DLQ75” y altos “DHQ25”.

Para la obtención de caudales Giler et al. (2019) ubico un transductor en la salida de cada microcuenca, dónde se registraba datos del calado de agua en un intervalo de 15 minutos, posteriormente estos calados se transformaron en caudales mediante la curva de descarga vs. calado. La velocidad del flujo se obtuvo con un molinete que relaciona la rapidez del flujo con las revoluciones de la hélice, los datos registrados corresponden a un periodo de tiempo promedio de 5 meses.

Los resultados obtenidos de QVAR indican una variabilidad del flujo relativamente baja: 1,17 (LM), 0,8 (RP), 0,45 (SS) en comparación con los obtenidos en otras cuencas tropicales, dando así valores de IRH que concluyen en una capacidad de regulación hidrológica que no es alta, (0,18 LM, 0,26 RP, 0,34 SS), sin embargo, las microcuencas poseen una buena capacidad de regulación de la humedad ($R2FDC > 0.7$), por último los pulsos altos y bajos indicaron que las magnitudes de los flujos son rápidamente cambiantes a moderadamente cambiantes.

Objetivos del Proyecto

Objetivo general

Analizar el comportamiento de la cuenca del río Paute mediante la aplicación de índices hidrológicos, a fin de identificar si la cuenca posee alguna alteración.

Objetivos específicos

- Caracterizar la información hidrometeorológica de la cuenca del río Paute.
- Cuantificar los Índices de alteración Hidrológica a través de caudales simulados.
- Analizar los resultados obtenidos de los IHA con el afán de identificar si la cuenca posee alteraciones.

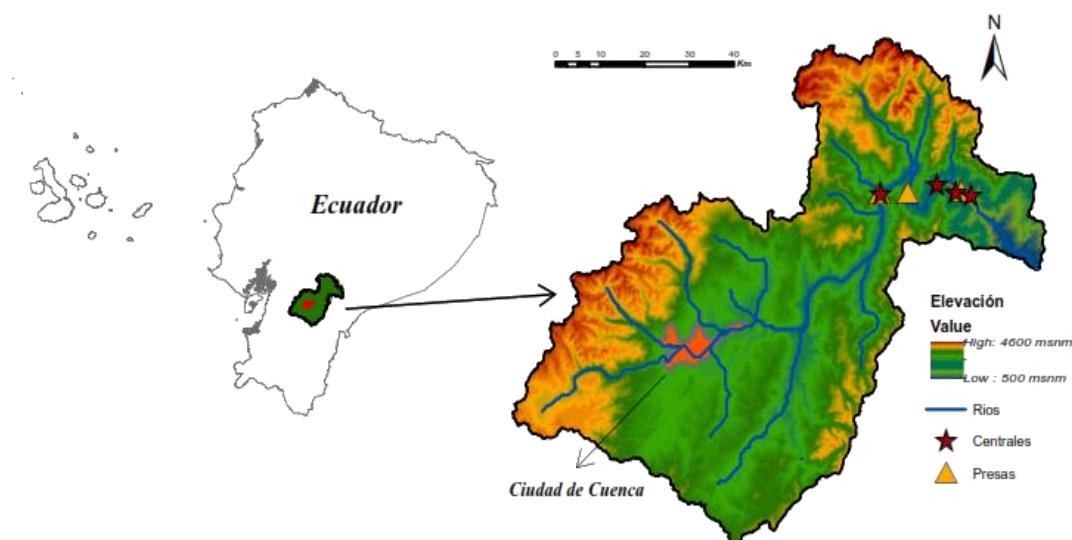
Descripción del Área de Estudio

Ubicación geográfica

El río Paute se encuentra localizado en la región del Austro ecuatoriano, el cual se origina por la convergencia del río Santa Bárbara y Cuenca, el río formado se dirige hacia la Amazonia. Su cuenca está abarcada en las provincias de: Azuay (64 %), Cañar (17.2 %), Chimborazo (10.6 %) y Morona Santiago (8.2 %), ocupando un área de 5639.5 km² conteniendo a 18 sub-cuencas y 15 cantones (Pozo, 2018), en la figura 1 se visualiza la ubicación de la cuenca.

Figura 1

Ubicación de la cuenca del río Paute



La topografía de la cuenca es montañosa y escarpada cobijada por bosques montanos con un clima muy variable, templado a subtropical en las hoyadas y en niveles más bajos es enteramente tropical. Gran parte de la cuenca está bajo protección ambiental debido a su importancia, pero no deja de enfrentarse al creciente cambio climático. La temperatura de la cuenca aumenta 0.28 ° C cada década (Cordero, 2013).

El incremento de la temperatura incita que las especies vegetales se distribuyan de diferente manera, aumente la evapotranspiración y sequía del suelo, esto provoca que el suelo pierda capacidad de retención de la humedad y disminuyan los caudales (Pozo, 2018).

Ecuador en su última constitución (2008) cambió a un modelo de desarrollo sostenible donde el ser humano es la base del progreso, entonces se estableció una metodología para promover que el estado sea desconcentrado y descentralizado, esto busca que los recursos económicos, beneficios, servicios y responsabilidades no sean dirigidos solo por el gobierno central, sino que sean administrados de manera equitativa y responsable por todos los pueblos de la nación (SENPLADES, 2012).

Entonces la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo conformó niveles para la planificación, estableciendo así 9 zonas de planificación las cuales están conformadas por provincias con proximidad económica, cultural y geográfica, y de esta forma coordinar de manera estratégica las entidades del sector público.

La hoya hidrográfica del río Paute constituye la zona 6, esta zona ha ayudado a cambiar la matriz energética del país, ya que la producción de energía eléctrica de esta cuenca satisface la mayor parte de la demanda actual. El río Paute ha albergado en su parte baja al complejo hidroeléctrico Paute Integral, donde las centrales hidroeléctricas Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo aprovechan el recurso hídrico para la producción de energía eléctrica (Pozo, 2018).

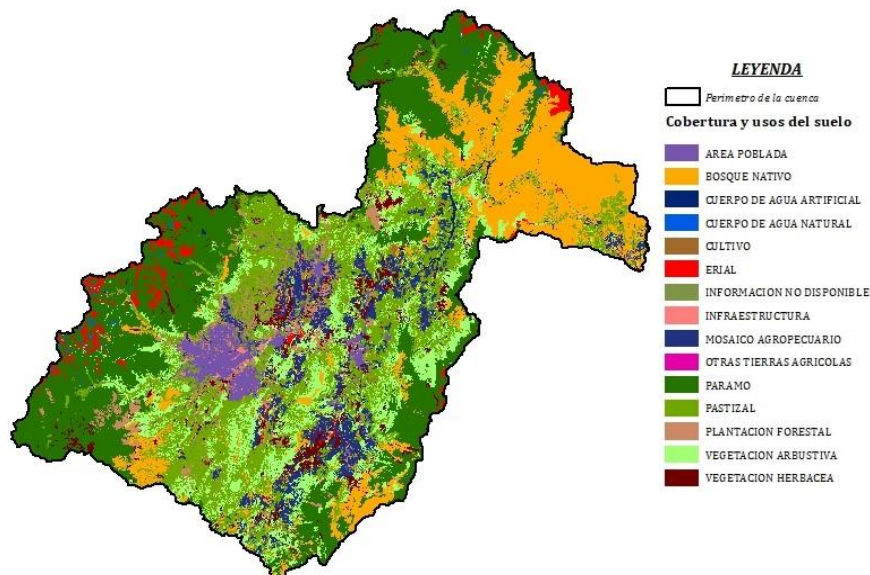
También existen organizaciones como el FONAPA (Fondo del Agua para la Conservación de la Cuenca del Río Paute) la cual se dedica a receptor, dirigir y gestar recursos para la correcta administración y uso del agua, así como para la conservación del ecosistema de la cuenca, es así que dentro de la cuenca se encuentran zonas protegidas con entornos ecológicos únicos, como el Parque nacional “El Cajas” y el Parque Nacional “Sangay”.

Cobertura y usos del suelo

La cuenca posee varios usos y coberturas de suelo, en la figura 2 se puede visualizar los principales. La figura 2 expuesta se realizó mediante información proporcionada directamente por el MAG “Ministerio de Agricultura y Ganadería”, los datos corresponden al periodo 2009-2015, a escala 1:25.000, esta información fue editada y actualizada en diciembre de 2020 por el MAG.

Figura 2

Cobertura y usos del suelo de la cuenca del río Paute

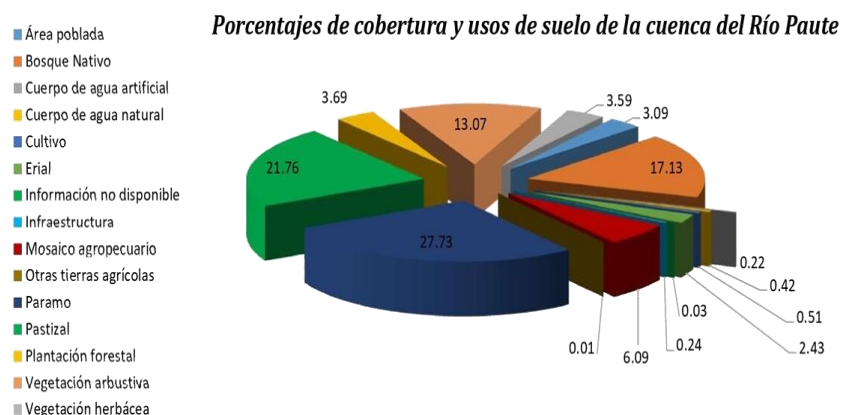


Fuente. (Ministerio de Agricultura y Ganadería –., s. f.-b)

En la figura 3 se visualiza la cobertura y usos del suelo en porcentaje, donde se observa que el 27.73% es terreno de alta montaña (páramo), el 21.76% corresponde a pastizales los cuales se ubican en la parte central de la cuenca, el 17.13 % es bosque nativo y el 13.07% es vegetación arbustiva, los demás usos y cobertura son inferior al 10 %, sin embargo, en términos generales se puede decir que en la cuenca predomina la vegetación natural, en la figura 3 se puede visualizar los demás porcentajes.

Figura 3

Porcentajes de cobertura y usos del suelo en la cuenca del río Paute



Climatología

El río Paute se ubica al sur del Ecuador en la zona interandina con una altitud de 4600 msnm y fluye hacia la vertiente amazónica con altitud de 500 msnm, debido a esto el clima de la cuenca es bastante variado, con un clima frío en los páramos de alta montaña hasta templado y tropical en hoyadas, y plenamente tropical en las llanuras de la cuenca baja (Cordero, 2013).

Debido a su forma y posición hidrográfica es afectada por diversos agentes meteorológicos, lo que provoca la aparición de corrientes de aire húmedo, produciendo lluvias en la cuenca baja con una distribución de lluvia unimodal de junio a agosto (máximas) y mínimas de noviembre a febrero. A la parte occidental de la cuenca también llegan corrientes de viento provenientes desde el océano Pacífico con rasgos de precipitación bimodal, con 2 temporadas de lluvia, entre febrero y mayo la primera, y entre octubre y noviembre la segunda (Cordero, 2013).

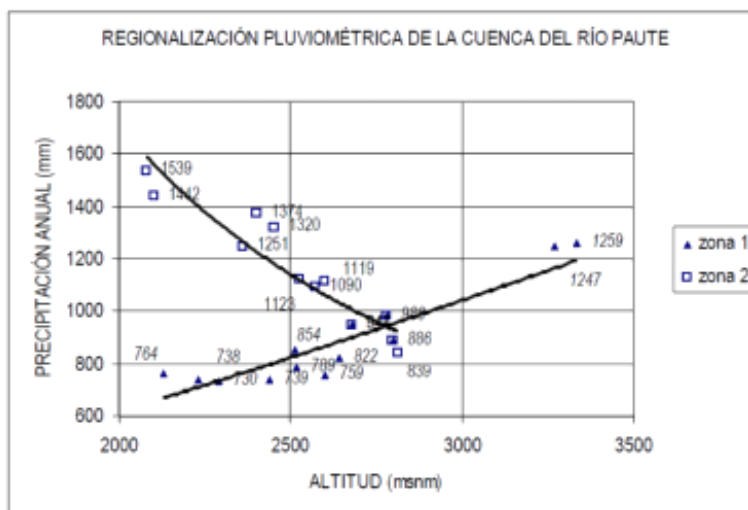
Precipitación

La orografía de la cuenca, así como su gradiente altitudinal y a esto sumado sus numerosas cordilleras producen una variabilidad espacial y temporal de lluvias, donde las precipitaciones máximas oscilan entre los 2500 a 3000 mm en la parte oriental de la cuenca. En la parte occidental de la cuenca los valores de lluvia varían entre los 1200 a 1500 mm, la precipitación mínima anual se produce en los valles interandinos con valores que oscilan entre los 600 a 800 mm, provocando que esta zona sea la más seca (Pozo, 2018).

De una evaluación de la distribución de lluvias se determina que al aumentar la altitud disminuye la presión y temperatura del aire, y aumenta la radiación solar variando las precipitaciones (Cordero, 2013). En la distribución de lluvias de la cuenca del Paute se identifica dos zonas heterogéneas, en la primera la precipitación aumenta con la altitud y en la segunda la precipitación disminuye al aumentar la altitud (Cordero, 2013), en la figura 4 se observa las dos zonas de distribución de lluvias.

Figura 4

Regionalización pluviométrica de la cuenca del río Paute



Fuente. (Cordero, 2013)

Las precipitaciones manifiestan cambios espaciales sustanciales de un periodo a otro para un sitio definido, en zonas altas e interandinas (3000 – 3200 msnm) presenta un clima mesotérmico semihumedo y húmedo, con precipitaciones entre los 500 y 2000 milímetros. En altitudes entre los 2600 y 4600 msnm los volúmenes de lluvia bordean los 1000 y 2000 milímetros por año, generando dos temporadas de lluvia, entre junio y septiembre una época de lluvias moderadas y entre octubre y abril una época lluviosa.

La cuenca media es la zona más seca donde se tienen altitudes que oscilan entre los 2200 y 2600 msnm con un clima de semihumedo a templado con precipitaciones que varían entre los 500 y 1000 mm. Entre los 1000 y 2000 msnm se presenta un clima tropical mega-térmico muy húmedo. Finalmente, en la parte baja de la cuenca predomina un clima mesotérmico húmedo, donde la altitud está entre los 500 y 2200 msnm y existe una distribución de la precipitación de 2000 mm al año, esta parte de la cuenca está afectada por el clima amazónico, donde en esta zona se presenta una época seca con lluvia escasa que inicia en octubre y va hasta marzo, los valores de precipitación máximos se presentan entre los meses de junio y julio (Pozo, 2018).

Temperatura

La cuenca posee una temperatura bastante variable, la cual cambia en función de la altitud donde existe una gradiente térmica de 0.6 C° cada 100 metros de elevación, la temperatura media fluctúa de 4 a 26 C° siendo diciembre y enero los meses más cálidos. En las cordilleras se produce las temperaturas más bajas con un valor medio de 0.6 C°, y un poco más abajo alrededor de los 2600 – 4600 msnm la temperatura promedio es 8 ° C°. En la cuenca media (2000 – 3000 msnm) la temperatura media oscila entre los 12° y 18 °C (Cordero, 2013).

Al analizar las series históricas registradas desde el año 1962 Cordero (2013) ha observado que en la cuenca se produce el incremento de 0.28 C° cada 10 años, evidenciando el cambio climático en la cuenca, la tabla 1 contiene las temperaturas históricas registradas por las estaciones meteorológicas.

Tabla 1

Temperaturas registradas en las estaciones presentes en la cuenca.

Nombre de la estación	Elevación (msnm)	Periodo de registro	Temperatura °C
Palmas - Azuay	2400	1974 - 1993	14.9
Arenales – Cola de San Pablo	2200	1972 - 1999	13.9
Cuenca - Aeropuerto	2516	1930 – 1999	14.9
Biblian	2640	1976 - 1996	14.3
Paute	2289	1963 – 1999	17.3
Gualaceo	2230	1963 – 1999	17.1
Ucubamba	2510	1969 – 1993	15.7
El Labrado	3335	1963 – 1994	8.4
Jacarrin	2700	1974 – 1993	14.1
Guarumales	1645	1975 - 1990	17.3
Peñas Coloradas	2000	1974 - 1993	14.2
Ingapata	2360	1982 - 1989	14.8
Ricaurte Cuenca	2545	1962 - 1994	14.3

Fuente. (Cordero, (2013).

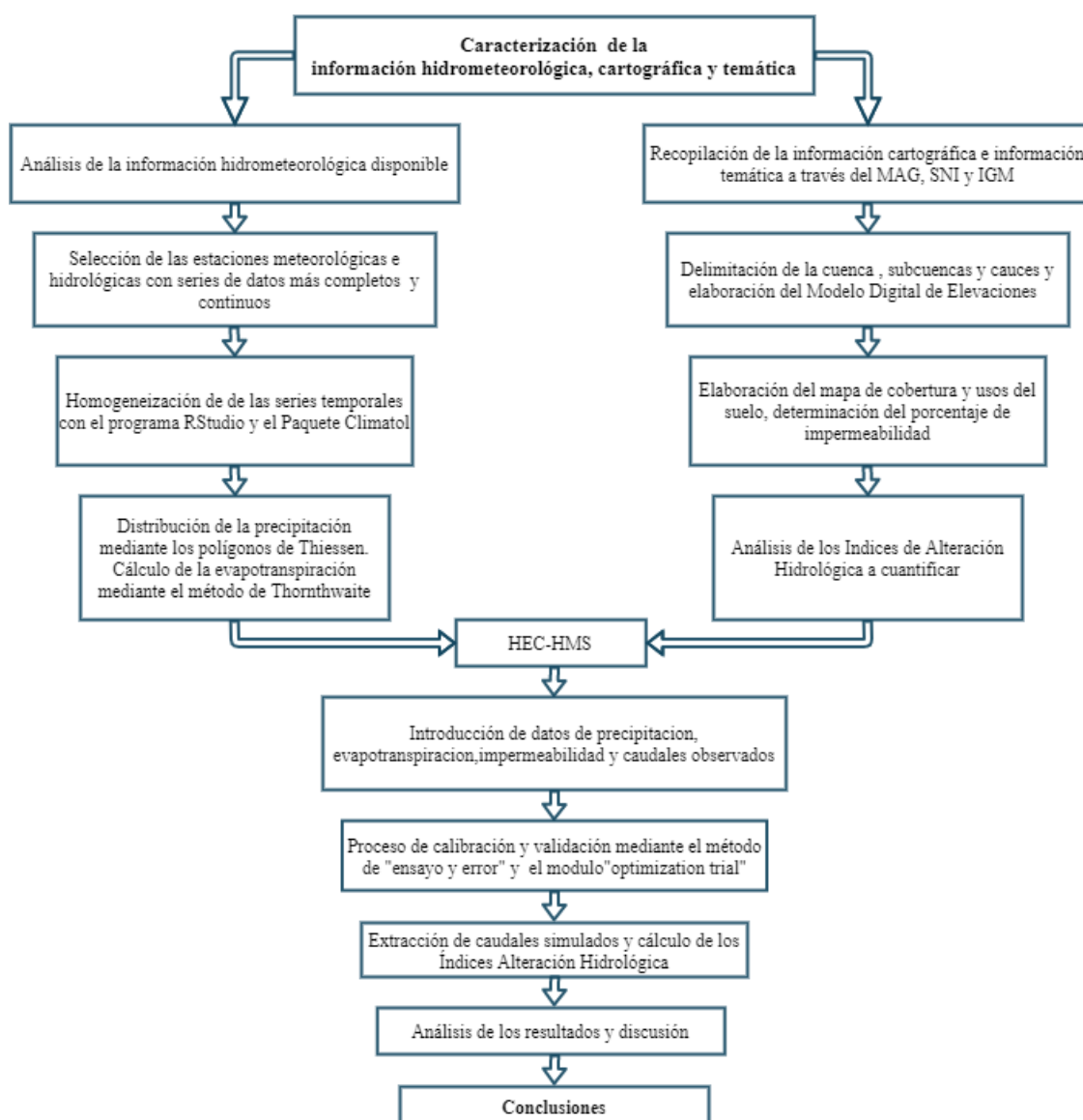
CAPÍTULO II

Metodología y Herramientas

En este apartado se expone la metodología y herramientas empleadas para caracterizar la cuenca del río Paute a través de la aplicación de índices hidrológicos, en la figura 5 se exponen los procedimientos aplicados.

Figura 5

Procedimientos aplicados para caracterizar la cuenca



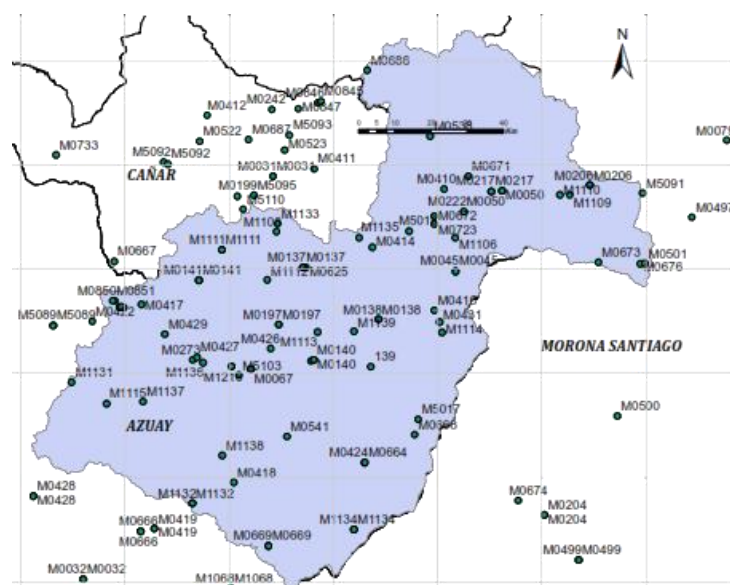
Información Disponible

En el Ecuador se cuenta con series de datos de precipitaciones diarias, no obstante, también se tienen series de datos mensuales las cuales son publicadas en anuarios por el INAMHI, sin embargo, en la página de esta entidad solo se encuentran disponibles desde el año 1990 hasta el 2013.

La información necesaria para el análisis de la cuenca son datos meteorológicos (precipitación y temperatura) e hidrológicos (caudales), para la caracterización de la cuenca del río Paute la información hidrometeorológica (precipitaciones, temperatura y caudales) fue proveída por investigadores de la casa de estudios del autor del presente trabajo, la información recibida contiene series de datos desde el año 1970 hasta el 2018, sin embargo, estas series no son homogéneas, ya que poseen datos ausentes, en la figura 6 se muestra las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca y las más cercanas a ella.

Figura 6

Estaciones meteorológicas presentes dentro de la cuenca y las más cercanas a ella



Nota. Estaciones meteorológicas pertenecientes al INAMHI

Obtención de la Información Base

De la información recibida se realiza una clasificación de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en función del siguiente criterio; estaciones con el mayor número de datos registrados en el mayor número de años y en periodos continuos, se seleccionan de esta manera ya que posteriormente las series serán homogeneizadas. La selección de las estaciones que se han de usar para la homogeneización se suelen elegir a las que poseen un coeficiente de correlación mayor, sin embargo, aplicando este criterio se prescinde de estaciones cercanas debido a que para dichas estaciones es bastante complejo determinar un coeficiente de correlación aceptable por su volumen bajo de datos (Luque, 2011).

Para la representación de la cuenca se obtuvo la información cartográfica de la página del Sigtierras y del Instituto Geográfico Militar, la información recabada es: cuencas y subcuencas del Ecuador, cauces principales y curvas de nivel. El Ministerio de Agricultura y Ganadería nos proporcionó la cartografía temática la cual contiene las capas en formato shapefile de los usos y cobertura del suelo.

Posterior a esto se realiza la delimitación de la cuenca y subcuencas con sus cauces principales en un software de GIS (Sistemas de Información Geográfica), también se determina el punto de menor elevación de la cuenca, ya que en este se conocerán los valores del caudal simulado.

Selección del Periodo de Análisis

Por varios años y tras muchos debates internacionales a inicios del siglo xx se estableció un lapso de 30 años como periodo más idóneo de estudio, de la misma forma se tiene en cuenta que el periodo de análisis recomendado por la OMM es de 30 años de datos disponibles más recientes que finalizará en el año más próximo que termina en 0 (López & Viera, 2014), teniendo en cuenta estos aspectos y los datos disponibles el periodo seleccionado para la homogeneización y relleno de las series temporales está comprendido entre 1970 a 2020.

Climatol

El Climatol está basado en el método de Paulhus y Kolhler (1952) el cual permite completar series diarias a través de valores promedio normalizados a través de una división entre sus medias (Guijarro, 2018), aparte de normalizar las series de datos empleando sus medias, Climatol resta las medias utilizando estandarizaciones, entonces se denomina m_x y s_x a la media y desviación estándar de una serie X , a partir de esto se tiene las siguientes opciones para la normalización:

$$\text{Restar la media: } x = X - m_x \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\text{Dividir por la media: } x = X/m_x \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$\text{Estandarizar: } x = (X - m_x)/s_x \quad \text{Ecuación (3)}$$

No obstante, esta metodología tiene su deficiencia, la cual radica en que la media de las series de datos en el lapso de análisis se desconoce debido a que usualmente dichas series están incompletas, para solucionar esta deficiencia, Climatol primero calcula dichos parámetros empleando los valores presentes de la serie, se completa los datos faltantes mediante estas medias y desviaciones típicas temporales para después volver a calcularlas con los valores de las series rellenadas lo que produce nuevos valores de la media y desviación típica (Luque, 2011), iniciando un proceso de iteraciones hasta que ninguna media y desviación típica cambie al redondearla con los valores iniciales de datos.

Ya que las medias estén estabilizadas se procede a normalizar los valores y estimarlos mediante la ecuación 4:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Dónde:

\hat{y} = es un valor arbitrario mediante los n datos x_j disponibles en paso temporal

w_j = magnitud establecida a cada uno

Entonces $y_i = x_i$, patrón de regresión lineal llamado eje mayor reducido, esto hace que la recta se ajuste disminuyendo el espaciado de las referencias medidas ortogonalmente hacia la

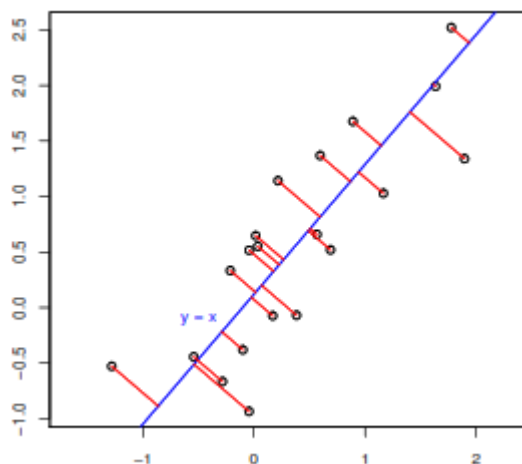
línea (Gaona et al. 2013), en la figura 7 se observa las desviaciones de la recta de regresión lineal minimizadas por mínimos cuadrados.

Los datos estimados sirven como referencia para las series observadas, seguido a esto se obtiene anomalías donde se resta los valores de referencia a los observados, permitiendo:

- Obtener una buena calidad de las series, eliminando las anomalías que superan un nivel o un rango prefijado.
- Comprobar la homogeneidad a través de la aplicación de la *Prueba Estándar de Homogeneidad Normalizada* (SNHT) (Guijarro, 2018)).

Figura 7

Desviación de la recta de regresión lineal minimizada por mínimos cuadrados.



Nota: En rojo están las desviaciones de la recta de regresión lineal y en azul las minimizadas por mínimos cuadrados (Guijarro, 2018).

Si SNHT sobrepasa un umbral prefijado, los datos se separan donde SHNT es mayor generando una nueva serie que contiene todos los datos antes de la división, la cual se junta con los primeros datos solo que a esta se le añade un sufijo como si fuera una nueva estación, este procedimiento se efectúa de forma iterativa hasta que sea nula las inhomogeneidades (Guijarro, 2018).

Si existe más de dos saltos en la media podría dar como resultados no tan fiables, para reducir este problema primero se aplica SNHT sobre ventanas momentáneas solapadas, posterior a esto se aplica SNHT a series con datos completos, es aquí donde SNTH tiene más pericia para

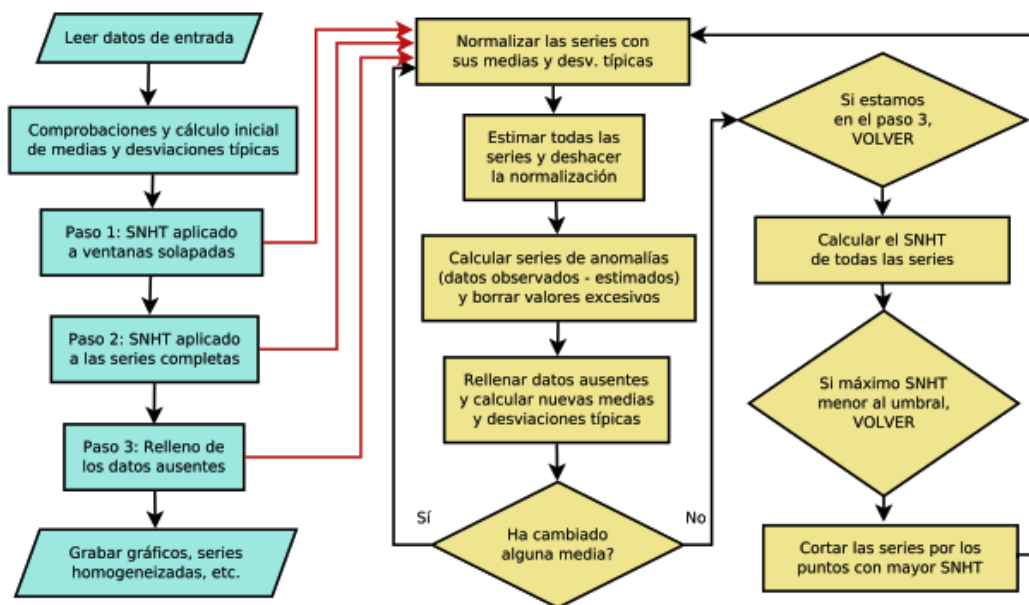
identificar anomalías. Por último, una tercera pasada completa el conjunto y subconjunto de datos homogéneos, la metodología del Climatol aparentemente es simple no obstante se puede complicar debido a varios procesos iterativos, la figura 8 contiene un flujograma con la metodología del paquete Climatol.

SNHT tiene umbrales para distintas longitudes de series, sin embargo, trabajos previos demuestran que la prueba SNHT puede arrojar valores diferentes según la variable en estudio.

Climatol aplica un valor de 25 a SNHT, siendo un valor conservador, pero para otras variables es mejor aumentar el punto de referencia por encima 100 y así evitar demasiados cortes en la serie (series diarias), de igual manera sucede con el proceso de rechazo de datos, donde el umbral para el rechazo de datos es de 5 desviaciones típicas, pero para datos diarios es necesario elevar el umbral a 20 en adelante (Guijarro, 2018).

Figura 8

Diagrama de flujo del funcionamiento de Climatol, mostrando sus procesos iterativos



Fuente: (Guijarro, 2018)

Dado la complejidad de establecer dichos umbrales se deja a criterio del usuario la opción de escogerlos tras una inspección de los histogramas después de una primera aplicación del Climatol al problema.

Procedimiento de Homogeneización

Para realizar la homogeneización el Climatol necesita solo de dos archivos de entrada, el primero con: el nombre de las estaciones, la elevación, código de estación y las coordenadas, el segundo archivo con las series de datos en el mismo orden de en el que las estaciones en el primer archivo. Los datos ausentes en las series deben estar representados con NA u otra nomenclatura (Pastor, 2004), se debe contemplar que el tiempo de análisis debe ser años enteros, iniciando el primero de enero hasta el 31 de diciembre (datos diarios), estos dos ficheros poseen nombres semejantes, a continuación, se presenta un ejemplo de configuración para entrada de datos.

VAR_aa_AAA

Donde:

VAR: *Es el acrónimo de variable.*

aa: *Es el primer año del periodo en estudio.*

AAA: *Es el último año del periodo en estudio.*

A pesar de tener mismo nombre los 2 archivos tienen diferente extensión, el primero tiene extensión `.est` y el segundo `.dat`.

Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

La ETP es la pérdida de agua en condiciones óptimas, ósea cuando se tiene un buen suministro de agua para cuencas donde predomina la vegetación (Barahona, 2013). Existen varios métodos para determinar la ETP, siendo uno de ellos el método de Thornthwaite, el cual calcula la ETP empleando únicamente las temperaturas medias diarias y a los resultados se les aplica una corrección tomando en cuenta la posición geográfica de la estación y el número de días de cada mes (Pozo, 2018).

La ETP en la cuenca del río Paute se determinó mediante el método de Thornthwaite, se escogió este método, ya que se emplea en cuencas con gran porcentaje de vegetación, como la de la cuenca del presente estudio, además necesita solo de las temperaturas medias diarias para el cálculo de la ETP.

El método de Thornthwaite emplea las siguientes ecuaciones:

$$ETP = 16 \left(10 \frac{t}{I} \right)^a \quad \text{Ecuación (5)}$$

Dónde:

$ETP =$ Evapotranspiración calculada en un cierto mes. [mm].

$t =$ Temperatura media mensual en un mes determinado [$^{\circ}C$].

$i =$ indicador de temperatura mensual.

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$I =$ Indicador de calor

$$I = \sum i_n = \sum \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$a = 0.000000675I^3 - 0.0000771I^2 + 0.0179I + 0.49239 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Descripción del Modelo (HEC-HMS)

En este estudio se empleó el programa HEC-HMS para realizar la simulación hidrológica, este es un software que determina el hidrograma de salida que se genera al proporcionale de los datos de la cuenca y de la información pluviométrica, dando como resultado los caudales que permiten caracterizar la respuesta de la cuenca en estudio (Sánchez, 2015).

El modelo inicia con un evento de lluvia, la cual es interceptada por la vegetación, el suelo y cuerpos de agua, una parte considerable de lluvia retorna hacia la atmósfera debido a la evaporación de: ríos, lagos, de la superficie de la tierra y por la transpiración de las plantas. Parte del agua que se albergó sobre la vegetación desciende a través del tallo, ramas o tronco hacia el suelo, donde converge con: la lluvia que desciende directamente al suelo y con la humedad previa en la cobertura del suelo, del agua que cae al suelo una parte se infiltrara (Aguilar & Martín, 2016).

El agua que logra infiltrarse reposara temporalmente en las capas más superficiales del suelo las cuales están saturadas parcialmente, dicha agua subirá nuevamente hacia la superficie por acción capilar, también se puede mover hacia los costados como flujo intermedio el cual ira hacia los cauces o ríos, de igual forma puede infiltrarse todavía más, abasteciendo a los acuíferos.

El agua de los acuíferos puede convertirse en flujo base, ya que eventualmente suele regresar a los cauces (Cabrera, 2017). Si el agua no se infiltra ni se estanca pasa a ser escorrentía directa la cual llegará a los ríos, entonces, el modelo considera que el caudal total de un río es la recopilación de las precipitaciones que caen directamente al cauce, el flujo intermedio y el flujo base.

Para obtener la respuesta hidrológica el HEC-HMS emplea los componentes a continuación:

- **Modelo de la cuenca.** Información de la cuenca o subcuencas y sus características.
- **Modelo meteorológico.** Información pluviográfica, de evapotranspiración, entre otros, para asignarles a las múltiples subcuencas.
- **Especificaciones de control.** Establece el tiempo de análisis en el cual se llevará a cabo la simulación.

El Hec-Hms también emplea 4 parámetros, los cuales se describen a continuación:

- **Pérdidas (Loss).** Precipitaciones que no llegan a generar escorrentía ya sea por infiltración o por abstracciones.
- **Transformación (Transform).** Cálculo de la escorrentía directa generada por la precipitación neta.
- **Flujo Base (Baseflow).** Suma la escorrentía básica (si es que existe previamente) y la directa, determinado la escorrentía a medida que transcurre el tiempo.
- **Tránsito de flujo (Routing).** Calcula la evolución del hidrograma a medida que circula por el cauce.

Modelo de la Cuenca

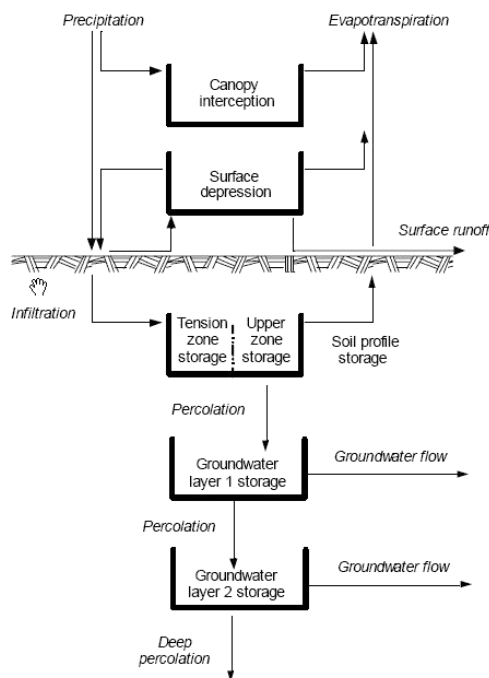
Este componente almacena la información y características de la cuenca y subcuencas. El HEC-HMS calcula el volumen de lluvias que van a producir escorrentía directa, para ello se ha empleado el procedimiento SMA “Soil-Moisture Accounting” el cual aparte de determinar la escorrentía directa añade la escorrentía básica si amerita, posteriormente cuantifica el avance de la escorrentía básica en un tiempo definido mediante el método Linear Reservoir (*HEC-HMS Technical Reference Manual*, 2000).

El método de SMA es un procedimiento para determinar las pérdidas (Loss) en el sistema, para emplear este método se debe trabajar con un modelo continuo, el método SMA considera 5 niveles diferentes donde la lluvia se acumula o retiene, estos son: la vegetación, la superficie, el suelo, acuífero 1 y 2 (superficial y profundo, respectivamente)

Sánchez (2015) presenta un esquema en donde se expone este método y los niveles en los que se almacena el agua según, en la figura 9 se visualiza el esquema con los niveles mencionados y las uniones o los flujos de agua que los relaciona.

Figura 9

Esquema conceptual de los niveles considerados por el método SMA



Fuente. (Sánchez, 2015)

Los niveles considerados por SMA se describen a continuación:

- a) **Canopy Interception.** Es la lluvia retenida en las hojas de la vegetación la cual se evaporará después.
- b) **Surface Storage.** Precipitación que es retenida en pequeñas cantidades en la superficie del terreno que luego se infiltra o se evaporará, se utiliza en modelos de simulación continua, si el volumen de agua retenida supera el límite, formará parte de la escorrentía superficial. El programa diferencia dos zonas, "la upper zone" (zona donde las salidas son por transpiración

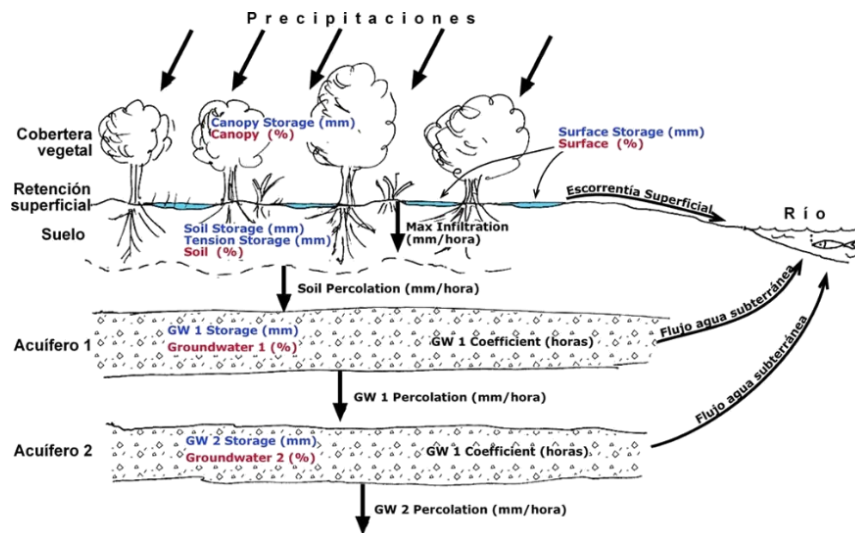
de las plantas o por percolación) y por último la “tensión zone” (zona donde el volumen de agua se pierde solo por evapotranspiración).

- c) **Soil profile storage.** El agua que logra infiltrarse de la superficie se almacena en este nivel, y sale por efectos de transpiración o por percolación hacia el acuífero que está por debajo.
- d) **Groundwater storage.** Toma en cuenta el acuífero 1 y 2 donde el más superficial capta el agua infiltrada de la zona “upper one”, la cual no se ha evapotranspirado, ya que el terreno ha estado saturado y no pudiendo almacenarse el agua del acuífero superficial (1) puede formar escorrentía subterránea o percolar a un acuífero de mayor profundidad (acuífero 2), así mismo desde el acuífero 2 existe un porcentaje de agua que se une con la escorrentía, sin embargo, otro porcentaje de agua puede percolar a estratos de mayor profundidad, lo que provoca que este porcentaje de agua no sea considerado por el modelo.

Los niveles descritos anteriormente dependen además de 18 parámetros, en la figura 10 se exponen la ubicación de 17 de los 18 parámetros.

Figura 10

Ubicación gráfica de los niveles de almacenamiento considerado por SMA



Fuente (Sánchez, 2015)

La flecha descendente que acompaña a los parámetros en mm por hora muestra la velocidad con la que el agua recorre entre niveles próximos, por ejemplo: la retención de agua superficial al suelo, retención de agua en el suelo a un acuífero superficial, de un acuífero superficial a un

acuífero profundo y de un acuífero profundo hacia más abajo (Sánchez, 2015). En la tabla 2 se puede observar los 18 parámetros en cada nivel y su medida.

Las unidades de los parámetros en mm (milímetros) se refiere a una lámina de agua equivalente y es el máximo volumen de retención en los distintos niveles, los parámetros expresados en porcentajes indican cuán lleno inicialmente se encuentra cada nivel (condiciones iniciales), mostrando la parte ocupada de los niveles.

Tabla 2

Descripción de los niveles de Almacenamiento considerado por el SMA

Niveles	Parámetro	Medida
Cobertura vegetal	Canopy Storage	mm
	Canopy	%
Retención superficial	Surface Storage	mm
	Surface	%
	Max Infiltration	mm/hora
Suelo	Soil Storage	mm
	Tension Storage	mm
	Impervious	%
	Soil	%
	Soil Percolation	mm/hora
Acuífero 1	GW 1 Storage	mm
	GW 1	%
	GW 1 Coefficient	horas
	GW 1 Percolation	mm/hora
Acuífero 2	GW 2 Storage	mm
	Groundwater	%
	GW 2 Coefficient	horas
	GW 2 Percolation	mm/hora

Los acuíferos contribuyen al caudal base del cauce, para ello se utiliza el modelo linear Reservoir para determinar el flujo base y de esta forma las contribuciones se reunirán de manera adecuada con los demás flujos.

El modelo en el HEC-HMS emplea trece parámetros y cinco condiciones iniciales que se exponen en la tabla 3 con los rangos en los que pueden variar, de los 13 parámetros 12 se calibran,

ya que el porcentaje de impermeabilidad del suelo no varía. Las condiciones iniciales tampoco se calibran, para ello se sustrae valores promedio observados tanto de lluvia como de caudal (Cabrera, 2017).

Calibración y Validación

La calibración es parte fundamental para el desarrollo de la modelación hidrológica, ya que permite ajustar los parámetros para que el modelo reproduzca los caudales de forma semejante a los observados, para ello se emplea los caudales registrados por estaciones hidrológicas presentes en área de estudio, para una estación hidrológica se debe seleccionar dos periodos de tiempo en el que los caudales estén registrados todos los días, el primer periodo se emplea para la calibración y el según para la validación de caudales los simulados .

Para la validación del modelo se emplean las mismas estaciones hidrológicas, pero con otro periodo de tiempo, ya que cambiar el periodo garantiza que los parámetros calibrados satisfacen otros eventos o series de tiempo (Cabrera, 2017).

En primera instancia se puede calibrar el modelo manualmente a través del método de ensayo y error, este método consiste en ir cambiando los valores de las variables del método SMA, las cuales se exponen en la tabla 3, hasta que los caudales simulados se asemejan a los caudales observados. La calibración manual permite analizar la trascendencia y sensibilidad que tienen las variables en el hidrograma resultante generado durante la simulación.

Tabla 3

Parámetros que se Ajustan en la Calibración del modelo

	VARIABLES	CONDICIONES INICIALES	SIGNIFICADO	RANGOS DE VARIACIÓN
Canopy	Max Storage (mm)	Initial Storage (%)	Almacenamiento inicial a máximo	0.001 - 1500
Surface	Max Storage (mm)	Initial Storage (%)	Almacenamiento inicial a máximo	0.001 - 1500
Loss	Max infiltration (mm/hr)	Soil (%)	Infiltración máxima en el suelo	0.01 - 500
	Impervious (%)	GW 1 (%)	Zonas impermeables	0 - 100
	Soil Storage (mm)		Almacenamiento en el suelo	0.01 - 1500
	Tension Storage (mm)		Almacenamiento en la zona de tensión	0.01 - 1500
	Soil Percolation (mm/hr)		Percolación del suelo	0.01 - 500
	GW 1 Storage (m)		Almacenamiento, zona subterránea 1	0.01 - 1500
	GW 1 Percolation (mm/hr)		Percolación en agua subterránea 1	0.01 - 500
	GW 1 Coefficient (hr)		Coefficiente en agua subterránea 1	0.01 - 10000
Transform	Time of Concentration (hr)		Tiempo de concentración	0.0167 - 1000
	Storage Coefficient (hr)		Coefficiente de almacenamiento	0.01 - 1000
Baseflow	GW 1 Storage Coefficient (hr)	GW 1Initial (%)	Coefficiente de almacenamiento, volumen inicial de agua subterránea 1	0.01 - 10000

Nota. Parámetros usados para la calibración y rango de valores por defecto, adaptada de (Castro et al., 2019).

Posterior a la calibración manual se procede realizar una semiautomática, donde el Hec-Hms proporciona el módulo “optimization trial” el cual es una herramienta que se emplea para ajustar las variables de calibración del modelo, para hacer uso de esta herramienta se tiene que seleccionar un procedimiento de búsqueda y una función objetivo con el número de iteraciones y tolerancia (*HEC-HMS Technical Reference Manual, 2000*).

Existen varios métodos de búsqueda, pero el que más se emplea se denomina Univariate-Gradient Algorithm (Algoritmo de gradiente univariante), dicho método realiza varias correcciones a las variables subjetivas, donde la variable x^k en la función objetivo $f(x^k)$ representa el parámetro estimado en una iteración k , la función busca un parámetro subjetivo x^{k+1} en la iteración $k+1$ mediante la ecuación 9.

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad \text{Ecuación (9)}$$

Δx^k es el parámetro corregido, entonces la meta es determinar Δx^k para que el parámetro inicial minimice o maximice la función objetivo, dicha ecuación generalmente se aplica varias veces ya que en una primera aplicación no se logra el objetivo. El método de Univariate-Gradient se basa en la técnica de Newton (ecuación 10):

$$f(x^{k+1}) = f(x^k) + (x^{k+1} - x^k) \frac{df(x^k)}{dx} + \frac{(x^{k+1} - x^k)^2}{2} * \frac{d^2f(x^k)}{dx^2} \quad \text{Ecuación (10)}$$

La función objetivo que ha brindado mejores resultados se denominada Nash-Sutcliffe (NSE) la cual tiene la siguiente formulación (ecuación 11):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ci} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \underline{Q}_0)^2} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

Q_{ci} = flujo simulado en un día i (m^3/s)

Q_{oi} = flujo observado en un día i (m^3/s)

\underline{Q}_0 = flujo medio observado en n días (m^3/s)

La función NSE permite visualizar el grado de similitud entre los flujos simulados y los observados, puede tener valores de $-\infty$ y 1, cuando más cerca de 1 esté el valor de la función mejor será la reproducción de caudales (Pellicer et al. 2017), también se puede emplear la tabla 4

para calificar el modelo según los valores obtenidos de la función Nash- Sutcliffe, de forma similar el *HEC-HMS Technical Reference Manual* indica que si $NSE < 0$ el promedio de los flujos observados sería una mejor predicción de caudales, si $NSE = 0$ la simulación da valores similares al promedio de los flujos observados y si $NSE = 1$ la simulación es excelente, (HEC-HMS Technical Reference Manual, 2000).

Tabla 4

Valores Referenciales del Criterio de Nash- Sutcliffe

NSE	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
1.6 – 0.8	Muy Bueno
> - 0.8	Excelente

Nota. Calibración de Modelos Hidrológicos (Cabrera, 2017).

Al igual que con el Climatol, Rstudio cuenta con otras librerías como es el paquete HydroGof, el cual implementa medidas de bondad de ajuste estadísticas y gráficas entre valores observados y simulados. Una medida de bondad de ajuste muy eficiente con la que cuenta el HydroGof es el índice KGE “Kling-Gupta efficiency “este es considerado una mejora del NSE la cual ha sido empleado en varios trabajos dando buenos resultados.

NSE y KGE son medidas de bondad de ajuste tradicionalmente utilizadas en hidrología para evaluar el rendimiento de los modelos, ya que normalizan el rendimiento del modelo en una escala interpretable, en muchos trabajos se toman diferentes rangos de aceptabilidad para los valores obtenidos, por ejemplo, Avalos (2020) considera que los valores de NSE menores a 0.0 indican que el promedio de descargas observadas es un mejor predictor que la descarga simulada y que los resultados de 0 a 1 están en un rango aceptable.

También se emplea $NSE = 0$ como umbral para distinguir modelos malos y buenos, sin embargo, este punto de referencia podría considerarse como un nivel bajo de predicción, ya que requiere poca comprensión de los procesos hidrológicos para obtener este umbral, dicho umbral tampoco sirve como punto de referencia para diferentes regímenes de flujo, por ejemplo, en regímenes estacionales, pero es una buena aproximación para regímenes de flujo no estacionario (Knoben et al., 2019).

Varios modelos se han validado empleando los criterios de Moriasi et al. (2007) los cuales están expuestos en tabla 4, este autor considera varios umbrales de NSE, los cuales pueden influir en los niveles de incertidumbre de resultados, emplear estos umbrales proporcionan un mejor contexto para evaluar el rendimiento de los modelos.

KGE se basa en una descomposición de NSE (correlación, sesgo de variabilidad y sesgo medio), por ello se ha venido empleando cada vez más para la validación y calibración de modelos. Al igual que NSE, $KGE=1$ indica una concordancia excelente entre caudales observados y simulados. Análogamente a NSE se afirma que se puede aplicar el mismo criterio a $KGE<0$, sin embargo, otros estudios afirman que solo los valores positivos de KGE son indicativo de simulaciones buenas, sin expresar que tratan $KGE=0$ como un punto de referencia para simulaciones malas y buenas (Knoben et al., 2019).

Rogelis et al. (2016) define un rendimiento pobre del modelo para $0.5 > KGE > 0$, pero no se menciona el significado de los valores negativos, al igual Towner et al. (2019) utiliza $KGE = 0$ para cambiar la codificación de rojo a azul (malo a bueno respectivamente) de los modelos, considerando los valores positivos como una simulación exitosa. Knoben et al. (2019) establece un rango de KGE entre -0.41 y 1 mediante modelos matemáticos y gráficos, donde los valores positivos de KGE evidencian mejoras en el índice de flujo medio.

Los valores de KGE y NSE no pueden compararse directamente, ni tratarse como aproximaciones equivalentes, entonces valores altos de NSE no se traducen necesariamente como valores altos de KGE, tampoco debe usarse los mismos criterios de calificación ya que no existe una relación única entre los valores de KGE y NSE por lo cual al utilizar los índices se debe ser específicos sobre los umbrales con los que se trabaja (Knoben et al. 2019).

Curva de duración de caudal (FDC)

La FDC se emplea en varios estudios, su utilidad es inmediata, por ejemplo; si se está diseñando una obra que necesita un caudal mínimo la FDC muestra cuántos días del año no se alcanza el caudal necesario (Sánchez, 2013).

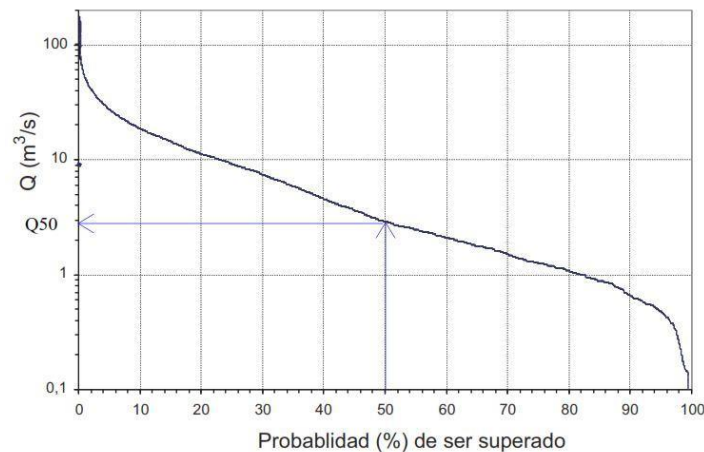
Para la construcción de la FDC se aparte de series completas de caudales ya sean simulados u observados. La FDC ilustra información acerca del porcentaje de tiempo en el que un caudal excede un caudal umbral prefijado, generalmente la FDC se construyen en escala logarítmica

donde se resume la información hidrológica de una cuenca, la probabilidad de excedencia en porcentaje se ubica en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas se ubican los caudales (Villegas, 2011).

Para determinar un caudal umbral dentro de la FDC primero se determina la probabilidad con la que se desea dicho caudal en el eje de las abscisas, posterior a esto se sube verticalmente hasta interceptar la curva de caudales, desde este punto se intercepta horizontalmente con el eje de las ordenadas obteniéndose el caudal umbral, en la figura 11 se puede observar este procedimiento donde se determina el Q50 (Caudal con el 50% de probabilidad de excedencia). Para determinar la probabilidad de excedencia de una caudal se realiza el mismo procedimiento de manera inversa (Villegas, 2011).

Figura 11

Curva de duración de caudales



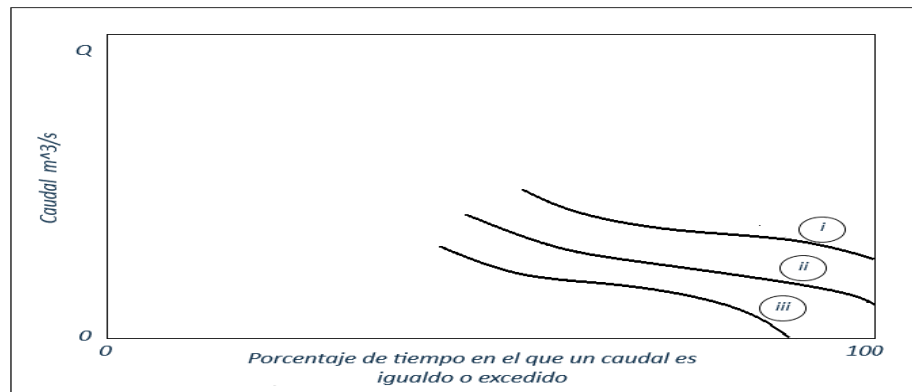
Los valores de caudal en el eje de las ordenadas también se les puede tomar como percentiles, es así que un Q50 corresponde al percentil 50 o un Q75 corresponde al percentil 75. Las curvas de duración de caudales se utilizan principalmente las partes de sus extremos, pudiendo deducir así características de las cuencas.

Monsalve (1999) caracteriza a una cuenca en base del análisis de los extremos de la FDC, para esto se compra la parte alta y baja de la FDC con los gráficos que presenta dicho autor, estos gráficos se presentan a continuación seguido de la descripción de cada uno.

Parte baja de la FDC

Figura 12

Parte baja de la FDC, Deducción de las características de cuencas hidrográficas



Fuente. (Monsalve, 1999)

Curva "i"

- Agua subterránea aporta caudales a la cuenca
- En general, posee baja permeabilidad
- En general buena retención de agua

Curva "ii"

- Se aporta agua subterránea hasta caudales bajos a la cuenca.
- En general, cuenca con poca retención de agua y con mayor permeabilidad que en la curva "i".

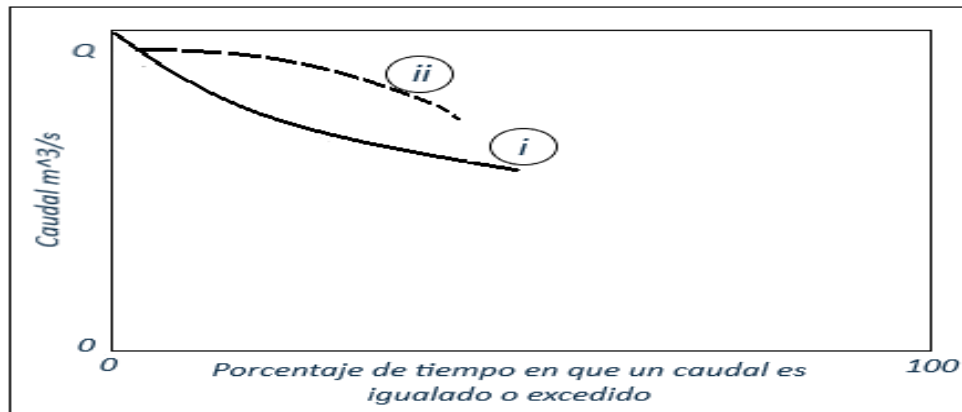
Curva "iii"

- Río intermitente entre efímero
- En general, posee un buen sistema de drenaje superficial
- En general, posee una alta permeabilidad

Parte alta de la FDC

Figura 13

Parte alta de la FDC, deducción de las características de cuencas hidrográficas



Fuente. (Monsalve, 1999)

Curva “i”

- Cuenca hidrográfica correspondiente a un cauce pequeño, con un número menor de caudales bajos, donde las crecientes duran poco tiempo.
- El área de la cuenca puede no ser muy grande, lo cual posiblemente la cuenca se encuentre en una zona montañosa.
- La precipitación se da en periodos cortos del año.
- Cuenca hidrográfica con buen drenaje y poca retención de agua.

Curva “ii”

- Cuenca con mayor número de caudales altos, lo que significa que la cuenca es de mayor tamaño que en la curva “i”.
- Cauces tributarios desfasados, lo cual no produce caudales máximos.
- Características de curvas de duración de caudales típicos donde se producen al derretirse la nieve en una cuenca hidrográfica.

Descripción de los Índices de Alteración Hidrológica

Debido a que la información de precipitaciones es más fáciles y menos costosos de obtener que los de escorrentía se pasa a realizar modelos hidrológicos para obtener valores de caudal simulados, no obstante, la combinación de ambos permite obtener estimaciones fiables (Álvarez et al. 2001). Para efectuar el análisis de una cuenca hidrográfica se pueden emplear diferentes índices y parámetros los cuales permitirán pronosticar con cierta confiabilidad el estado de la cuenca.

A continuación, se describe la formulación de los IHA que se han venido empleado para caracterizar cuencas hidrográficas tropicales, estos índices se seleccionan teniendo presente la información disponible, climatología, ubicación geográfica, entre otros. Los primeros cuatro índices son calculados en base a datos de precipitación y los cinco restantes son en base a valores de caudal.

Índice de Precipitación anual promedio

Es la suma de todas las precipitaciones del periodo monitoreado dividida para el número de años del periodo monitoreado, este índice nos ayuda a determinar el volumen de lluvias promedio que tiene una cuenca, valores altos de P_{anual} representan que la cuenca tiene buena humedad atmosférica con buena gradiente de temperatura, por el contrario, valores bajos representa a cuencas con poca humedad (Vásconez et al., 2019), para determinar este índice se emplea la ecuación 12:

$$P_{\text{anual}} = \sum (P) / N_{\text{años}} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Dónde:

P_{anual} = Índice de precipitación anual promedio [$\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$]

P = precipitaciones en el periodo monitoreado

$N_{\text{años}}$ = Número de años del periodo monitoreado

Índice de Estacionalidad

El índice de estacionalidad o Seasonality Index (SINDX, nombre en inglés abreviado) indica la estacionalidad de lluvias, donde valores entre 0 significa que la precipitación es no estacional, es decir, la precipitación es altamente variable y esta se distribuye a lo largo de todo el año, valores entre 1 significa que la precipitación es extremadamente estacional, es decir la precipitación no posee variabilidad y esta sucede durante un solo mes al año, para determinar este índice se emplea la ecuación 13.

$$SINDX = \left(\frac{1}{P_{anual}} \right) \left(\frac{\sum |P_{mes} - P_{anual}|}{12} \right) \left(\frac{6}{11} \right) \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

$SINDX = \text{Índice de estacionalidad [-]}$

$P_{anual} = \text{Índice de precipitación anual promedio}$

$P_{mes} = \text{Índice de precipitación mensual promedio}$

Para calificar de mejor manera este índice se puede emplear la tabla 5, donde se observan los rangos de valores que se pueden obtener y su caracterización.

Tabla 5

Rangos de valores del índice de estacionalidad (SINDX)

SINDX	Índice de estacionalidad
0 – 0.3	No estacional, la precipitación es altamente variable y está bien distribuida a lo largo de todo el año
0.31 – 0.6	Estacional, las lluvias con poca variabilidad, y estas ocurren solo en algunos meses al año
> - 0.61	Extremadamente estacional, las lluvias no son variables y esta ocurre durante solo un mes al año

Nota. Datos de Ochoa-Tocachi et al. (2016)

Índice de días con Precipitación 0

El índice de días con precipitación 0 o Day Precipitation 0 (DAYP0, nombre en inglés abreviado) indica el porcentaje de días en que la precipitación no ha sido registrada por el pluviómetro con respecto al número de días del periodo monitoreado, para determinar este índice se emplea la ecuación 14.

$$DAYP0 = D_{P < RGes} / D_{Total} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

$DAYP0 =$ El índice de días con precipitación 0[-]

$D_{P < RGes} =$ Porcentaje de días con precipitación cero

$D_{Total} =$ Número de días del periodo monitoreado

Para calificar este índice se puede emplear la tabla 6, donde se observa los rangos en los que se obtiene este índice y su respectiva caracterización.

Tabla 6

Rango de valores del índice DAYP0

DAYP0	Índice de días con precipitación 0
0 – 0.3	En todo el periodo monitoreado existe precipitación con alta intensidad.
0.31 – 0.6	Precipitaciones moderadas durante el periodo monitoreado, con intensidad moderada de lluvia.
> - 0.61	Precipitaciones muy limitas y de baja intensidad

Nota. Datos adaptados de Ochoa-Tocachi et al. (2016)

Índice coeficiente de variación de la precipitación

El coeficiente de variación en la precipitación o PVAR indica la variabilidad diaria de la precipitación a lo largo del periodo monitoreado, comúnmente el coeficiente de variación se representa de 0 a 1 o en porcentaje, aunque no lo es, ya que puede tener valores mayores a 100, el coeficiente de variación puede tener valores mayores a 100 o a 1 cuando la muestra tiene gran variabilidad (Martínez, 2019), este índice se analiza en conjunto con los índices DAYP0 y SINDX, para determinar este índice se emplea la ecuación 15.

$$PVAR = \frac{P_{desv.est.}}{P_{media}} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

$PVAR = \text{Índice coeficiente de variación de la precipitación [mm}\cdot\text{mm}^{-1}\text{]}$

$P_{desv.est.} = \text{desviación estándar de la precipitación}$

$P_{media} = \text{Precipitación media}$

Para interpretar y caracterizar los valores obtenidos de PVAR se emplea los rangos del coeficiente de variación establecidos por (Martínez, 2019), y estos rangos se adaptan a los valores de lluvia, los cuales se presentan a continuación:

- Si $PVAR \leq 0.3$ Variabilidad baja de la lluvia diría.
- Si $0.3 < PVAR \leq 0.7$ La lluvia diaria tiene una buena Variabilidad.
- Si $PVAR > 0.7$ Variabilidad alta de lluvia diaria

Índice coeficiente de variación del caudal

El coeficiente de variación del caudal o QVAR indica la variabilidad del caudal a lo largo del periodo monitoreado, para determinar este índice se emplea la ecuación 16.

$$QVAR = \frac{Q_{desv.est.}}{Q_{media}} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

$QVAR = \text{coeficiente de variación de caudal [-]}$

$Q_{desv.est.} = \text{Desviación estándar del caudal}$

$Q_{media} = \text{Caudal medio}$

Para interpretar los resultados de este índice puede emplear los rangos del coeficiente de variación propuesto por Martínez (2019), los cuales se presentan a continuación:

- Si $QVAR \leq 0.3$ los valores de caudal son relativamente homogéneos y de baja variabilidad.
- Si $0.3 < QVAR \leq 0.9$ los valores de caudal son heterogéneos, es decir las magnitudes de caudal son variables.
- Si $QVAR > 0.7$ Las magnitudes de caudal son muy variables o heterogéneos.

Índice pendiente del tercio medio de la FDC

La pendiente del tercio medio o R2FDC indica la capacidad de regulación hidrológica de la cuenca, donde, el aumento de la pendiente en la FDC indica una pérdida de la regulación hidrológica y una pendiente baja indica una buena capacidad de regulación hidrológica. Valores de $R2FDC \geq -0.7$ señalan que la cuenca tiene comportamiento amortiguado y buena capacidad de almacenamiento (Ochoa, 2019).

Valores de R2FDC entre -3 y -0.7 caracterizan a la cuenca con una moderada capacidad de regulación hidrológica, donde el agua se almacena por menor tiempo provocando caudales máximos, y por último, valores de R2FDC mayores a -0.3 señalan que las aguas de la cuenca se drenan de inmediato, es decir que la cuenca reacciona rápidamente ante eventos de lluvia, provocando caudales máximos y volviendo drásticamente a caudales base, la escorrentía no se infiltra fácilmente en el suelo y se evapora antes de llegar a los cauces (Ochoa, 2019).

R2FDC se calcula en base a la FDC mediante la ecuación 17:

$$R2FDC = \frac{(\log_{10}(Q_{66}) - (\log_{10}(Q_{33}))}{(0.66 - 0.33)} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde:

$R2FDC =$ Pendiente el tercio medio de la FDC [-]

$Q_{66} =$ Caudal en m^3/s con el 66 por ciento de excedencia

$Q_{33} =$ Caudal en m^3/s con el 33 por ciento de excedencia

Índice Retención y Regulación Hídrica

El Índice de retención y regulación hídrica o IRH mide la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de flujo. El IRH se determina a partir de la FDC y emplea la siguiente ecuación (18):

$$IRH = \frac{\sum (Q_{Q<Q50})}{\sum Q_{QT}} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

$IRH = \text{Índice de retención y regulación hidrológica [-]}$

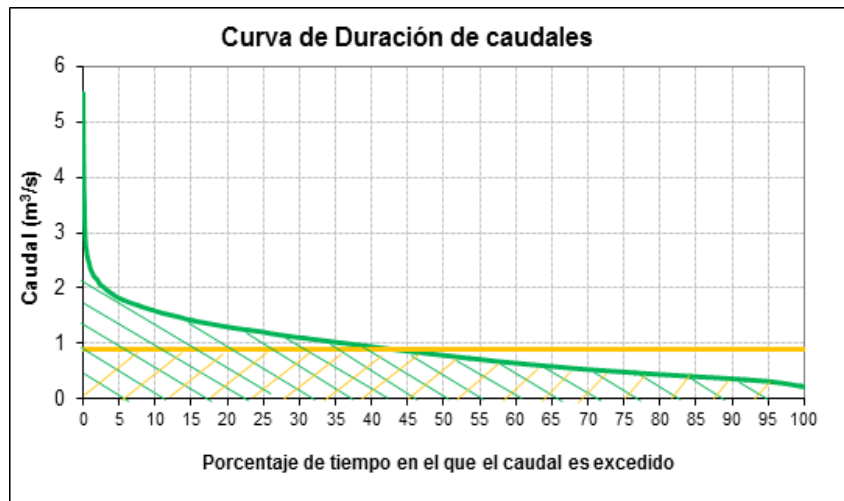
$Q_{Q<Q50} = \text{Volumen por debajo del percentil 50 (Q50) en la FDC}$

$Q_{QT} = \text{Volumen total por debajo la FDC}$

En la figura 14 se representan las áreas de volumen necesarias para determinar IRH.

Figura 14

Volúmenes por debajo de la FDC para determinar IRH



Nota. Volumen total por debajo de la FDC en verde (Q_{QT}) y volumen por debajo del percentil 50 o Q50 ($Q_{Q<Q50}$) en amarillo, adaptada de Quindio (2016).

Para calificar IRH se emplea la tabla 7, donde se observa los rangos en los que se obtiene este índice y su respectiva caracterización.

Tabla 7

Calificación de los rangos de valores IRH

Rango de IRH	Calificación	Descripción
> 0.85	Muy Alta	Muy alta retención y regulación de la humedad
0.75 – 0.85	Alta	Alta retención y regulación de la humedad
0.65 – 0.75	Moderada	Media retención y regulación de la humedad
0.50 – 0.65	Baja	Baja retención y regulación de la humedad
< 0.50	Muy Baja	Muy Baja retención y regulación de la humedad

Fuente. (Quindío, 2016)

Índice de duración promedio de los pulsos bajos

La duración promedio de los pulsos bajos o Duration of flows below the Q75 (DLQ75, nombre en inglés abreviado) indica el número de días en los que se tiene caudales menores al Q75, este índice se determina empleando la ecuación 19.

$$DLQ75 = \sum (D_{Q < Q75}) / \sum (N_{Q < Q75})$$

Ecuación (19)

Dónde:

$DLQ75 =$ Duración promedio de los pulsos bajos [día]

$D_{Q < Q75} =$ Duración de caudales mayores al Q75

$N_{Q > Q75} =$ Caudales mayores al Q75

Índice Duración promedio de los pulsos Altos

La duración de los pulsos bajos o Duration of flows above the Q25 (DHQ25, nombre en inglés abreviado) indica el número de días en los que se tiene caudales mayores al Q25, este índice se determina empleando la ecuación 20.

$$DHQ25 = \sum (D_{Q > Q25}) / \sum (N_{Q > Q25})$$

Ecuación (20)

Donde:

$DHLQ25 = \text{Duración promedio de los pulsos altos [día]}$

$D_{Q>Q25} = \text{Duración de caudales mayores al } Q75$

$N_{Q>Q25} = \text{Caudales mayores al } Q75$

CAPÍTULO III

Procesamiento de la Información y Modelación en GIS

De las estaciones proveídas se han identificado las que están dentro y las más cercanas al perímetro de la cuenca, clasificando las que disponen de registros con el mayor número de años y en periodos continuos. De una base de datos con numerosas estaciones se han identificado 23 estaciones meteorológicas (con precipitaciones y temperaturas) y 4 estaciones hidrológicas que poseen mayor volumen de datos, en la tabla 8 se expone las estaciones meteorológicas seleccionadas, las cuales posteriormente serán homogeneizadas, esta tabla se encuentra configurada de tal forma en que está apta para ingresarla al paquete Climatol.

La tabla 9 contiene las estaciones hidrológicas que se emplean para validar el modelo, estas estaciones también se las visualiza gráficamente dentro de la cuenca en la figura 15.

Tabla 8*Estaciones meteorológicas seleccionadas para el proceso de homogeneización*

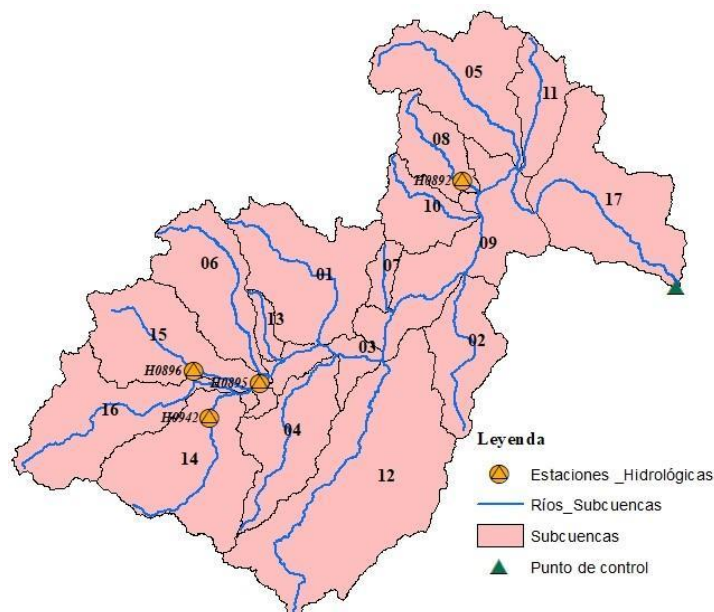
X (m)	Y (m)	Elev (m)	Código	Nombre
693734.436	9689905.29	1310	M0422	Hda. Sta. Lucia Camino Ricas
705714.474	9650165.82	2130	M0419	Girón
720863.244	9659047.37	2720	M0418	Cumbe
746075.151	9662807.8	2600	M0424	Sigsig INAMHI
736259.085	9682522.45	2510	M0140	Ucubamba
728045.4	9684688.11	2545	M0426	Ricaurte-Cuenca
707692.618	9687456.86	2800	M0429	Surocucho (Llulluchis)
729570.403	9689269.4	2700	M0197	Jacarrin (Solano)
748724.727	9690272.72	2194	M0138	Paute
760465.426	9689788.84	2360	M0431	Sevilla de Oro
703191.632	9693177.86	3270	M0417	Piscicola Chirimichay
714227.367	9697768.55	3335	M0141	El Labrado
763543.978	9699524.15	2400	M0045	Palmas Azuay
734184.748	9700216.37	2640	M0137	Biblian
799893.815	9701015.57	665	M0501	Mendez INAMHI
747545.389	9704102.2	3270	M 0414	Chanin
808938.813	9709818.53	653	M0497	Logroño
761317.933	9715292.89	2450	M0410	Rio Mazar-Rivera
770406.784	9714814.87	2321	M0217	Peñas Coloradas
728481.237	9717716.85	3083	M0031	Cañar
736323.221	9719146.65	3100	M0411	Ingapirca
661895.645	9720232.57	50	M0477	Puerto Inca (En Cañar)
715835.936	9729399.9	2621	M0413	Suscalpamba (Capil La Dolorosa)

Tabla 9*Estaciones hidrológicas seleccionadas para el proceso de calibración y validación*

Código	Nombre	x (m)	y (m)	z (m)	Subcuenca
H-0892	Mazar Aj Paute	761926	9715541	2126	Mazar
H-0896	Matadero en Sayausi	714202	9681961	2602	Tomebamba
H-0942	Tarqui Dj Zhucay	717113	9673651	2510	Tarqui
H-0895	Tomebamba en Monay	725862.8	9679791.1	2353	Tomebamba

Figura 15

Estaciones hidrológicas seleccionadas para el proceso de calibr... y valid... dentro de la cuenca



Nota. Representación de las estaciones hidrológicas y de las subcuencas con sus cauces principales

Se puede observar que las subcuencas Tarqui (14) y Tomebamba (15) cuentan con una estación hidrológica cada una (H-0942, H-0896 respectivamente) y que la estación H-0895 afora los caudales de las subcuencas Tarqui, Tomebamba y Yanuncay.

Después de la clasificación y selección de las estaciones meteorología e hidrológicas se ha procedido a caracterizar la cuenca en GIS, en primera instancia se ha obtenido el modelo digital del terreno con 30 m de resolución, seguido a esto se determinó el área de la hoya hidrográfica del río Paute y de sus subcuencas con los cauces principales. También se ubicó el punto de control en el nivel de menor cota del río Paute, el cual se encuentra en la desembocadura en el río Namangoza, en este punto se conocerá los valores del caudal simulado (figura 15).

Analizando el mapa de cobertura y usos del suelo se determinó los porcentajes de impermeabilidad del suelo de cada subcuenca a través de las coberturas impermeables de suelo, donde se observa que la subcuenca Tomebamba posee el mayor porcentaje de impermeabilidad

(7.45%), los porcentajes obtenidos son bajos, esto se debe a que en la cuenca del río paute predomina la vegetación natural. En la tabla 10 se enlistan las subcuencas y sus características.

Tabla 10

Características de las sub-cuencas del río Paute

Nro.	Nombre de la sub-cuenca	Área (km²)	Impermeabilidad (%)
1	Burgay	447.02	4.78
2	Collay	239.36	4.58
3	Cuenca	120.29	6.23
4	Jadán	297.50	4.12
5	Juval	427.31	4.78
6	Machangara	325.44	6.12
7	Magdalena	50.81	1.23
8	Mazar	165.77	3.12
9	Paute	447.10	6.23
10	Pindilig	168.27	5.14
11	Pulpito	169.21	4.12
12	Santa Bárbara	952.49	7.123
13	Sidcay	43.29	5.13
14	Tarqui	476.28	2.8
15	Tomebamba	380.40	7.45
16	Yanuncay	418.87	6.47
17	Baja del río Paute	510.12	3.48

Homogeneización

Entrada de datos

Como ya se indicó para iniciar con el procedimiento de homogeneización de las series de precipitación, el Climatol necesita de dos archivos de entrada, el primero con: las coordenadas (en UTM o grados decimales), la elevación (msnm) y el código y nombre de cada estación (tabla 8), el segundo archivo contiene las series de datos de precipitación en el mismo orden de las estaciones, en la figura 16 se puede visualizar los dos archivos ya subidos al Climatol, el primer archivo la izquierda y el segundo a la derecha.

El segundo archivo contiene 18 250 datos diarios de precipitación por cada estación, ya que el periodo de homogeneización es del 1 de enero de 1970 al 31 de diciembre del 2020, estos datos son reordenados por el climatol, donde cada renglón posee diez datos separados por un espacio y los datos faltantes son representados con *NA* (figura 16, derecha).

Figura 16

Archivos con los datos de las estaciones en el Climatol

```

|693734.435931 9689905.286673 1310 "M0422" "HDA.STA Lucia Camino Ricas" 4 8.1 14.2 0 0 13.5 9.5 NA 0.9 NA NA 5.1 NA NA 2.7 8.7
705714.474108 9650165.81528699 2130 "M0419" "Girón" 1.6 0 2.1 7.8 7.8 7.1 0 NA 0 NA NA 7.5 NA NA 5.3 1.6 NA
720863.244142999 9659047.370207 2720 "M0418" "Cumbe" 4.6 4.1 0 0 0 4.1 0.5 NA 0 NA NA 2 NA NA 19.4 2.3 NA 8.
746075.151195 9662807.79902599 2600 "M0424" "Sigsig INAMHI" 0 1.6 1.3 0 0 0 3.4 NA 0 NA NA 1.8 NA NA 3.4 3.6 NA 5 NA
736259.084723999 9682522.449082 2510 "M0140" "Ucubamba" 0 5.9 0 8.1 8.1 3.3 3.2 NA 0 NA NA 8.6 NA NA 7.3 8.5 NA
728045.400412 9684688.10735199 2545 "M0426" "Ricaurte-Cuenca" 0 0.6 4.9 5.5 5.5 4 0 NA 0 NA NA 10.6 NA NA 12.8 5 NA
707692.617982 9687456.855876 2800 "M0429" "Surucucho (Llulluchis)" 0 3.5 0 0 0 0 0 NA 0 NA NA 0.8 NA NA 0.1 0 NA 1 NA 1.6
729570.402612 9689269.39737699 2700 "M0197" "Jacarrin (Solano)" 1.4 0 0 0 0 0 0.7 0 NA 4.2 NA NA 0 NA NA 5.2 5.8 NA 0.4 NA
748724.726891 9690272.720844 2194 "M0138" "Paute" 0 0 0 0 0 0 0 NA 0 NA NA 0 NA NA 0.1 0 NA 0 NA 0 0 0.2
760465.425657 9689788.83981199 2360 "M0431" "Sevilla de Oro" 0 0 0 0 0 0 0 NA 0 NA NA 0 NA NA 0.2 0 NA 0.3 NA 0 0 0.
703191.632281 9693177.861911 3270 "M0417" "Piscicola Chirimichay" 0 0 0 0.3 0.3 0 0 NA 0 NA NA 0.2 NA NA 4.1 2.3 NA 2.6 NA
714227.366692999 9697768.551697 3335 "M0141" "El Labrado" 0 0 0 2.4 2.4 1.2 0 NA 0 NA NA 5.9 NA NA 5.7 3.4 NA 6.3
763543.977506999 9699524.15098799 2400 "M0045" "Palamas Azuay" 0 0 0 0.7 0.7 0.3 0 NA 0 NA NA 1.9 NA NA 7.5 1.1 NA 1.5
734184.747538 9700216.37499899 2640 "M0137" "Biblian" 0 0 0 2.9 2.9 0.2 0 NA 5.4 NA NA 2.1 NA NA 18 3.6 NA 5.
799893.815280999 9701015.57292 665 "M0501" "Mendez INAMHI" 0.9 1.3 9.5 8.7 8.7 11.8 26 NA 2 NA NA 13.2 NA NA 25.3
747545.388873 9704102.19909499 3270 "M 0414" "Chanin" .9 4.7 0 5.3
808938.813239 9709818.534016 653 "M0497" "Logroño" 0 0 3.1 9.3 9.3 6.6 12.6 NA 2.4 NA NA 6.7 NA NA 18.3 8.
761317.933262999 9715292.888769 2450 "M0410" "Rio Mazar-Rivera" 0 0 0 0 0 0 NA 0 NA NA 0.4 NA NA 0 2.3 NA 0.3 NA 0 0
770406.784353 9714814.874747 2321 "M0217" "Peñas Coloradas" 0 0 0 0 0 0 NA 0 NA NA 3.7 NA NA 0.2 4.4 NA 0 NA 0.3
728481.23698 9717716.850685 3083 "M0031" "Cañar" 0 1.5 0.5 1.6 1.6 0.1 0 NA 0 NA NA 3.8 NA NA 4.4 2.2 NA
736323.220834 9719146.646042 3100 "M0411" "Ingapirca" 0 0 0 4.1 4.1 3.1 4.3 NA 4 NA NA 5.4 NA NA 15.7 7.9 NA
661895.645454757 9720232.57410772 50 "M0477" "Puerto Inca (En Cañar)" 1 2 0 0 0 0 0 NA 0 NA NA 0.5 NA NA 0.4 0.2 NA 0.4 NA 0
715835.936260174 9729399.89657024 2621 "M0413" "Suscalpamba (Capil La 0 0 0 0 0 1.5 3.7 NA 0 NA NA 3.2 NA NA 5.6 4.3 NA 11.7
0 0 2.1 1.9 1.9 0 0 NA 0 NA NA 0.6 NA NA 11.1 2.3 NA 0.
0 0 0 1.9 1.9 3.3 3.4 NA 4.1 NA NA 4.7 NA NA 21.8 22.6

```

Nota. Archivos .est (izquierda) y .dat (derecha) subidos al Climatol

En el Climatol los dos archivos comparten el mismo nombre: Paute_Datos_1970-2020, donde Paute_Datos es la variable, seguido por el periodo de análisis seleccionado, 1970-2020, el primer archivo tendrá la extensión de .est (las estaciones) y el segundo de .dat (datos de precipitación).

Análisis exploratorio de las series

Para la homogeneización de los datos se usa la función llamada `homogen` donde se escribe el nombre de la variable, año de inicio y final del tiempo de análisis:

```
Homogen ("Paute_Datos", 1970,2020)
```

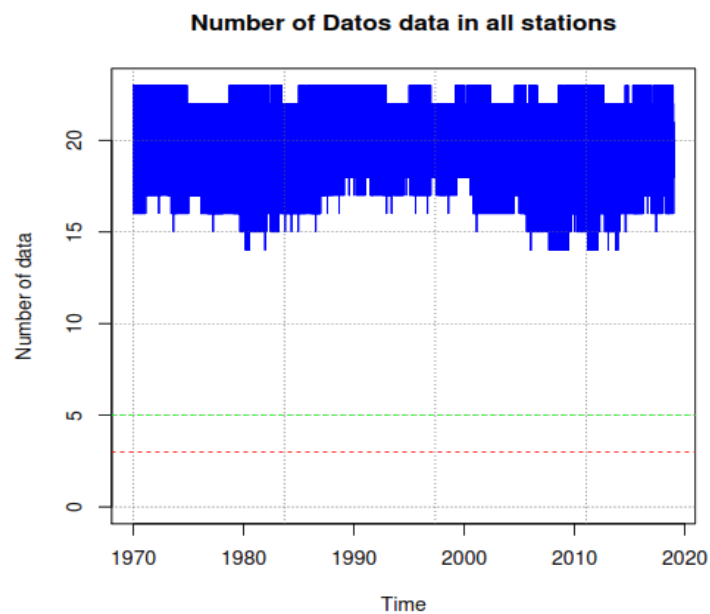
Guijarro (2018) recomienda que la primera homogeneización se debe hacer en modo exploratorio, para realizar controles de calidad y así obtener análisis de gran importancia, ya que las identificaciones de datos atípicos podrían ocultar errores, entonces para realizar la exploración se pone `expl`:

```
Homogen ("Paute_Datos", 1970,2020, expl = TRUE)
```

Finalizada la homogeneización exploratoria se elabora un documento .pdf en la carpeta establecida como directorio de trabajo donde se encuentra una síntesis del proceso desarrollado en conjunto con gráficos que expone el comportamiento de los datos, la figura 17 expone los datos disponibles para el tiempo de análisis de manera global, donde se observa la falta de datos en todas las estaciones.

Figura 17

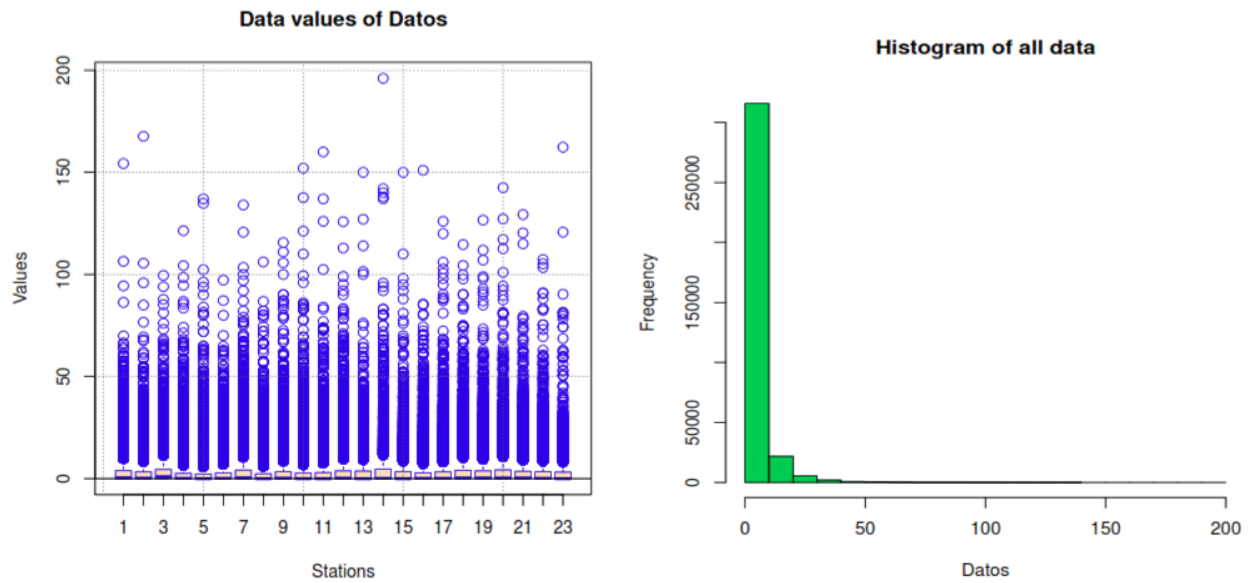
Datos disponibles de las estaciones



Después se presentan diagramas de caja con valores promedio del percentil 25 y 75 de la variabilidad de las series y las magnitudes mínimas y máximas. Adicionalmente, también se muestra un histograma de frecuencias, en la figura 18 se puede visualizar el diagrama de caja (izquierda) e histograma (derecha) los cuales presentan la existencia de datos atípicos.

Figura 18

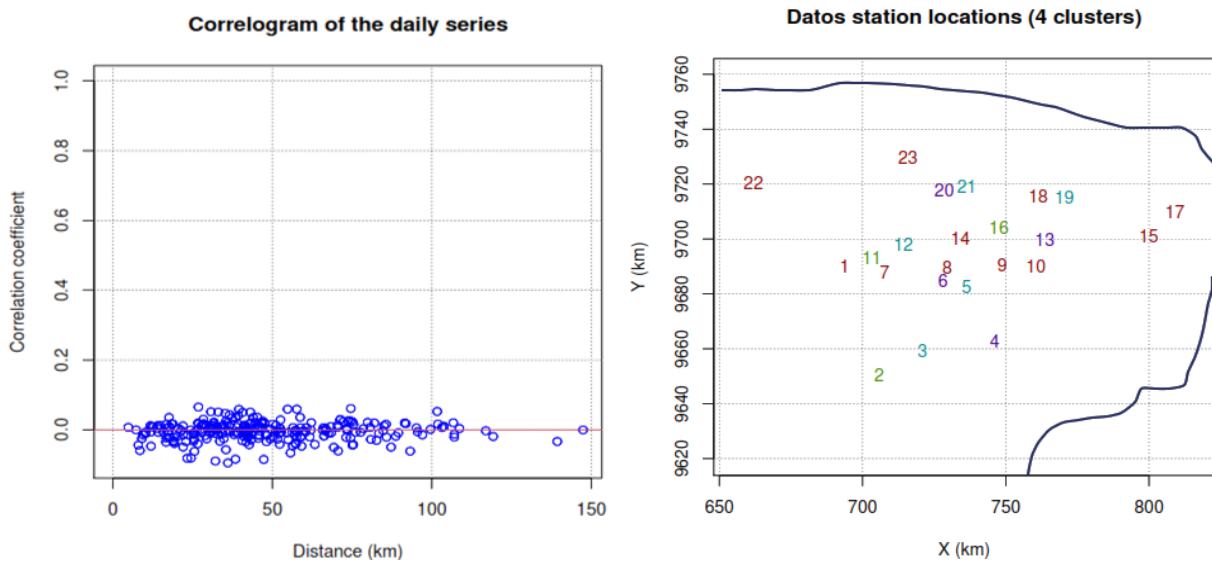
Diagramas de caja (Izquierda) e histograma de frecuencia (derecha)



Los gráficos a continuación presentan la correlación entre series con variabilidad semejante (Figura 19, izquierda), también se visualiza un esquema con las estaciones de igual color las que comparten variabilidad similar (figura 19 derecha).

Figura 19

Diagrama de correlación de datos(izquierda) y estaciones con variabilidad similar (derecha)

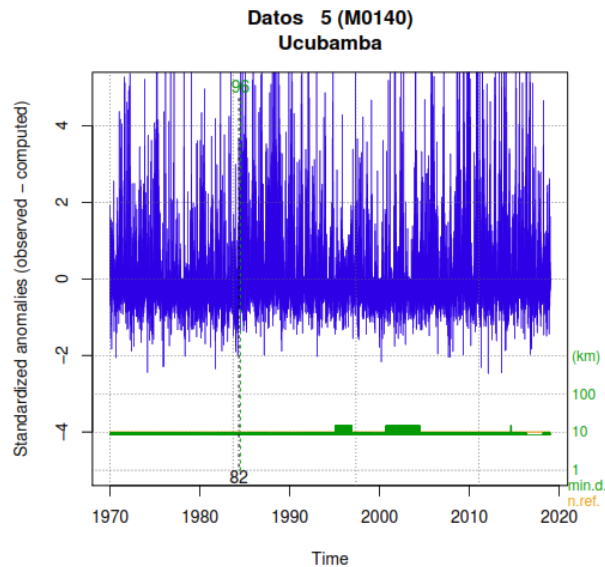


Los gráficos anteriores están dedicados a verificar los datos, en cambio los gráficos siguientes están dedicados a mostrar las anomalías estandarizadas.

La figura 20 expone los datos de la estación Ucubamba con $SNHT1 = 96$ con ventanas escalonadas hacinadas señaladas de verde sobre una línea entrecortada de similar color, y un valor de $SNHT2 = 82$ para los datos señalados con línea en negro. Aparentemente, la serie posee una conducta homogénea, en la parte inferior se marcan dos líneas las cuales indican la separación mínima de las series vecinas (en verde) y la cantidad de referencias de datos empleados (naranja).

Figura 20

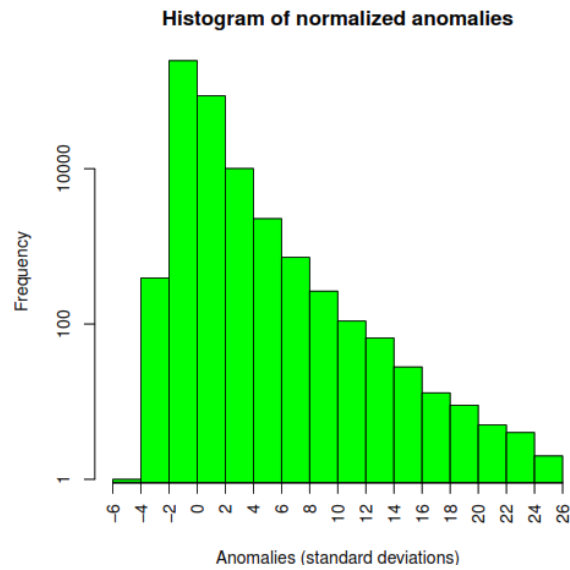
Anomalías de la etapa en la serie de datos de la estación Ucubamba



Por último, el archivo .pdf presenta el histograma de irregularidades estandarizadas y los valores SNHT de los datos finales, dicho histograma se emplea para establecer los umbrales idóneos y desestimar datos muy anómalos, Pita (2018) recomienda analizar la simetría del histograma y los valores de los extremos simétricos adoptarlos como umbrales. En el histograma se observa un sesgo positivo hacia la derecha por lo que la configuración de $dz_{\max} = 30$ y $dz_{\min} = -30$ parece ideal, Figura 21).

Figura 21

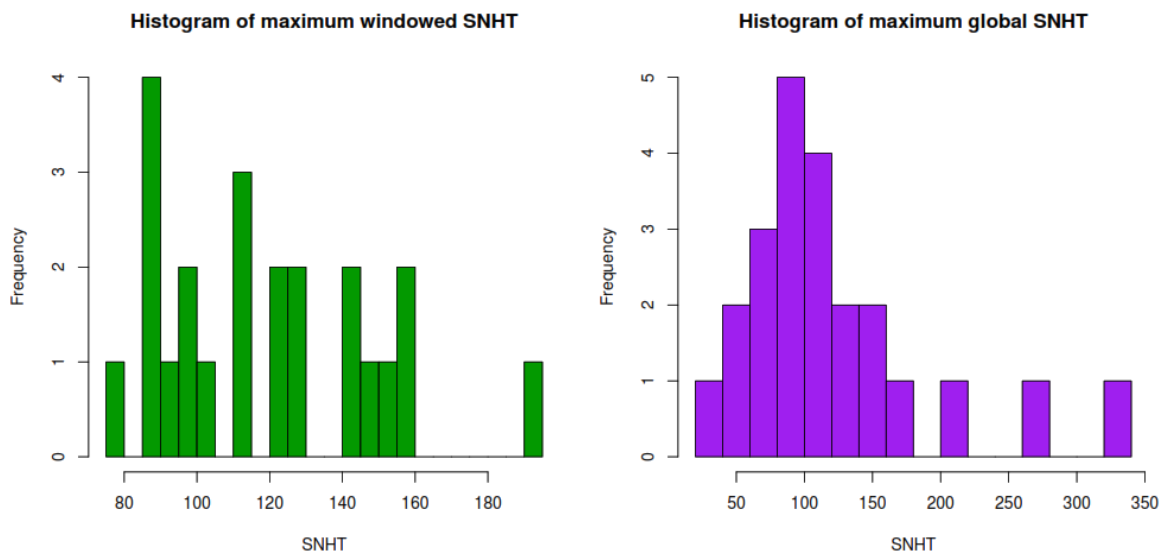
Anomalías en las series de datos de las estaciones



Los histogramas de SNHT son empleados para establecer los puntos de referencia para la detección de cambios en el promedio de las series, siguiendo el procedimiento de Pita (2018) para la selección de umbrales se selecciona $SNHT1 = 160$ y $SNHT2 = 160$ los cuales se consideran idóneos. En la figura 22 se visualizan los valores de SNHT de las series de datos.

Figura 22

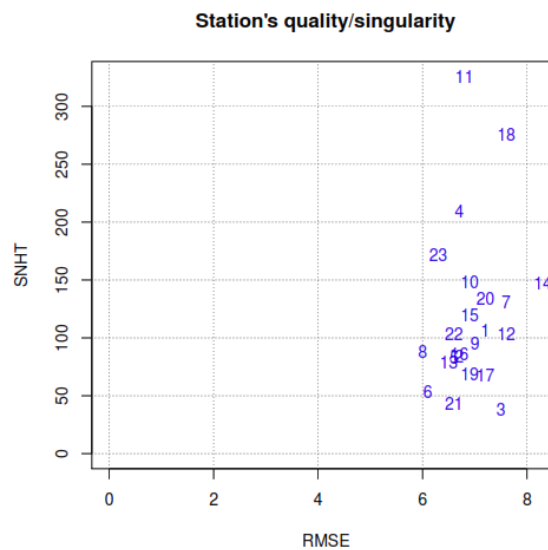
Histogramas SNHT en ventanas escalonadas superpuestas (izq.) y globales (derecha)



El último gráfico (figura 23) que se presenta en el documento .pdf indica a través del número de estación la raíz del error medio cuadrático (RMSE, Root Mean Square Erros) finales. Los RMSE se obtienen al cotejar series estimadas con los originales, un valor elevado puede indicar una deficiente calidad o puede indicar que la estación esté ubicada en un lugar particular con un microclima (Pita, 2018).|

Figura 23

Calidad/singularidad de las series finales



Dado que los valores de precipitaciones no pueden tener valores negativos por su distribución de probabilidad sesgada (variables limitadas por cero), se debe usar la función V_{min} y V_{max} , no obstante, cuando se emplea el parámetro $std=2$ se establece de forma automática $V_{min}=0$, entonces de esta forma se evitarán los valores negativos en las series rellenadas (Guijarro, 2018).

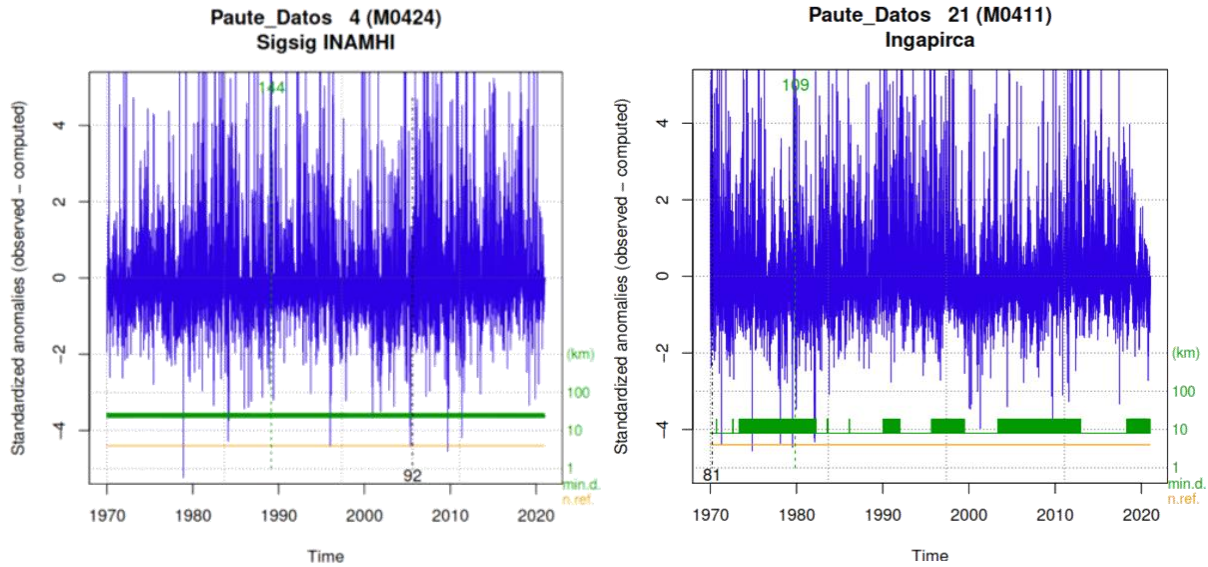
Una vez terminada la revisión de las precipitaciones individuales y en conjunto se prosigue a realizar la homogeneización teniendo en cuenta los parámetros y umbrales antes seleccionados, entonces se escribe la siguiente line en el programa:

```
homogen ("Paute_Datos",1970,2020, dz.max=30, dz.min=-30,
snht1=160, snht2=160, std=2)
```

Después de ejecutar la línea anterior y de realizarse la homogeneización, al documento .pdf se añade la identificación gráfica de las ventanas escalonadas, así como la de series rellenadas, la figura 24 muestra la detección de anomalías a través de ventanas escalonadas superpuestas de la estación Sigsig (izquierda) e Ingapirca (derecha).

Figura 24

Detección de anomalías a través de ventanas escalonadas superpuestas y de series completas



Los últimos gráficos exponen las series de datos homogeneizados (Figura 25). La parte de arriba de la figura representa la serie homogeneizada, en donde las precipitaciones de entrada están de color negro y en rojo las rellenadas, por último, en la zona de abajo del gráfico se encuentran rectificaciones atribuidas a las precipitaciones.

Aparte del documento con gráficos y análisis de datos el Climatol provee de otros archivos que se almacenan en la carpeta pre programada como directorio de trabajo (Ascencio, 2017), los cuales se describen a continuación:

DATOS_1970-2018.txt Archivo de texto en donde se encuentran los mensajes generados de R durante el proceso

DATOS_1970-2018_OUT.csv: Archivo CSV en donde está una lista de los datos atípicos corregidos.

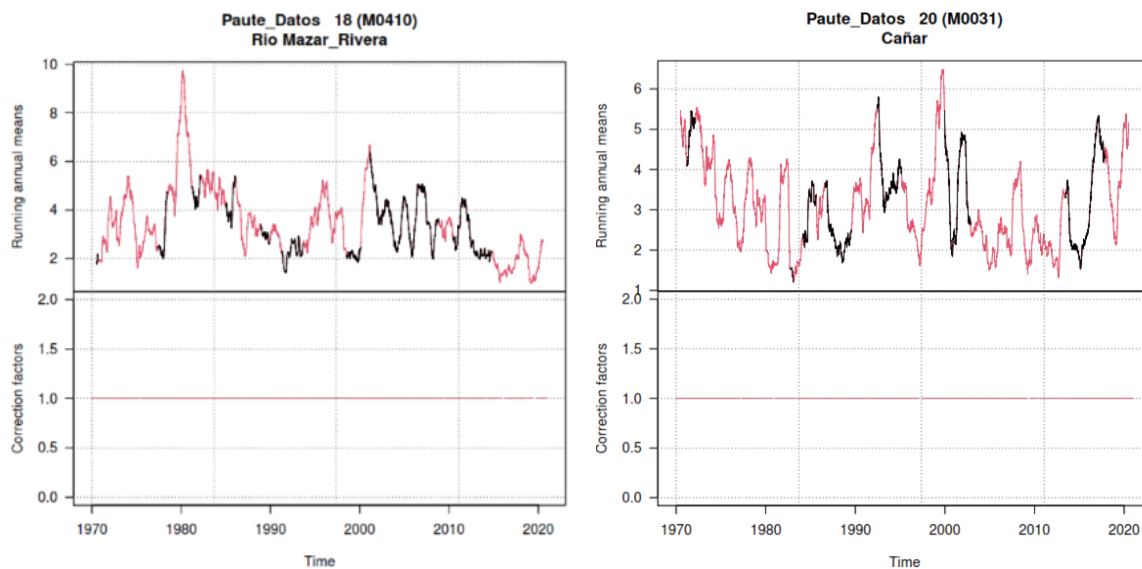
DATOS_1970-2018_brk.csv: Archivo CSV en donde se encuentra los umbrales de división y las magnitudes de SNHT

- `DATOS_1970-2018.rda`: fichero que contiene una matriz binaria de R con los resultados de la homogeneización

Mediante el archivo `.rda` se puede apreciar diversos productos empleando los comandos `dahstat` y `dahgrid`, el primer comando produce un archivo `.csv` que contiene las series homogeneizadas y el segundo caracteriza los datos rellenados asignándoles un 0 si es un dato original, 1 si es dato rellenado y 2 si es dato corregido por anomalía o inhomogeneidad.

Figura 25

Series de precipitaciones rellenadas de la estación Mazar (Izquierda) y Cañar (derecha)



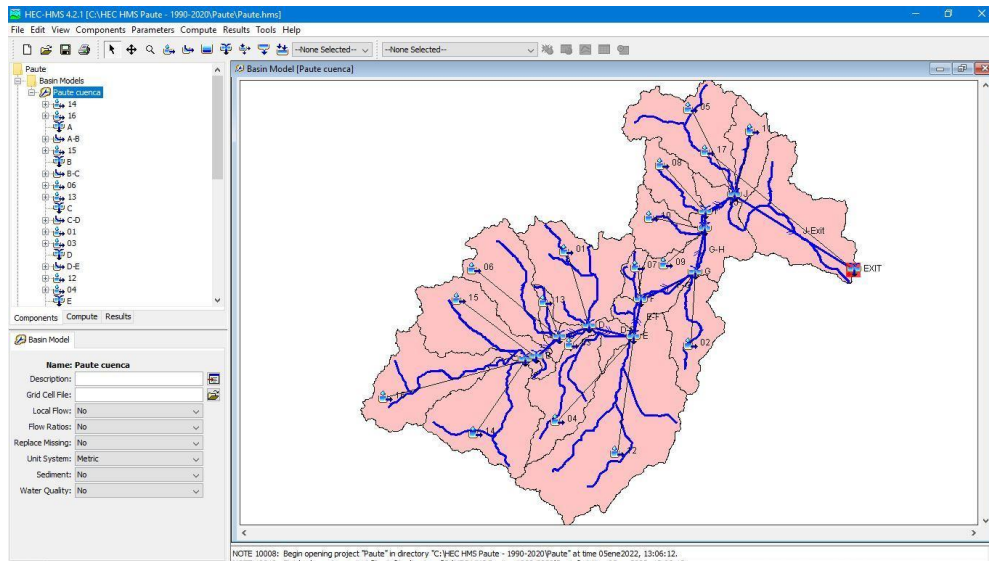
CAPÍTULO IV

Modelación Hidrológica

Como ya se mencionó anteriormente los datos principales de entrada son las precipitaciones para la modelación hidrológica, entonces para empezar a desarrollar el modelo primero se realizó la distribución de las precipitaciones homogeneizadas empleando el método de Thiessen con el afán de asociar a cada subcuenca a un pluviómetro en el HEC- HMS. Una vez homogeneizada y distribuida las precipitaciones, se cuenta con datos fiables a nivel diario para cada subcuenca, en la figura 26 se puede visualizar el modelo de la cuenca y subcuencas en el HEC- HMS.

Figura 26

Modelado de la cuenca en el HEC-HMS



Posteriormente se subieron los datos y características de las subcuencas: área, porcentaje de impermeabilidad del suelo, valores de la ETP y los valores de las variables iniciales, en la figura 27 se puede observar los datos ingresados de las subcuencas, y en la figura 28 se visualiza un ejemplo de como el programa almacena los datos de precipitación de la subcuenca Burgay.

Figura 27

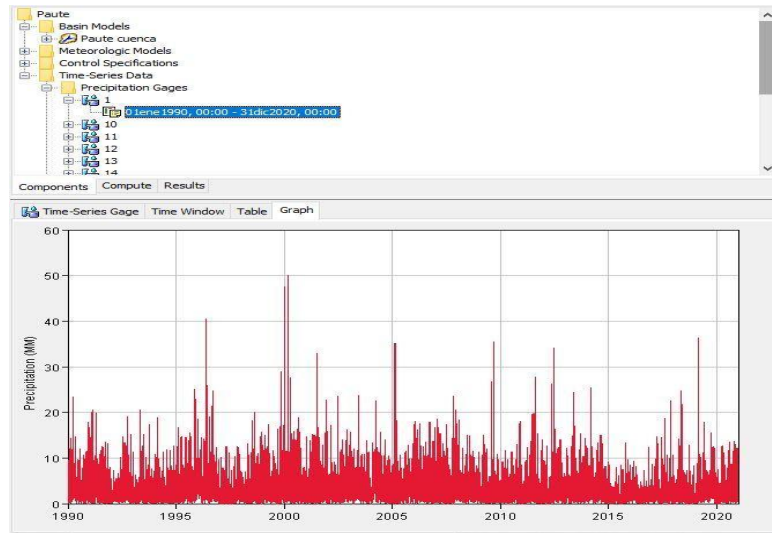
Datos de las subcuencas ingresados al HEC-HMS

Subbasin	Area (942)
14	476.28
16	418.87
15	380.4
06	325.44
13	43.29
01	447
03	120.29
12	952.49
04	297.5
07	50.81
02	239.36
09	447.1
10	168.27
08	165.77
05	427.31
11	169.21
17	510.12

Subbasin	Soil (%)	Ground... (%)	Ground... (%)	Maximu... (mm/hr)	Impervi... (%)	Soil Stor... (mm)	Tension... (mm)	Soil Perc... (mm/hr)	Ground... (mm)	Ground... (mm)	GW 1 Co (mm/hr)
14	40	40	0	0.9	2.8	24	1.2	1	25	0.5	
16	40	40	0	1.5	6.47	50	3.2	0.9	18.2	1	
15	40	40	0	1	7.45	20	4	0.8	100	1	
06	40	40	0	1.2	6.12	50	3	0.9	50	2	
13	40	40	0	2	5.13	40	12	0.9	12	1	
01	40	40	0	1.2	4.78	50	12	0.9	0.05	1	
03	40	40	0	1	6.23	40	10	1	14.3	2	
12	40	40	0	0.01	7.123	11	4.3	1	12	20	
04	40	40	0	0.8	4.12	80	3	4	2.1	12	
07	40	40	0	0.8	1.23	150	10	1	10	2	
02	40	40	0	1.3	4.58	20	3.2	0.3	20	8	1
09	40	40	0	0.5	6.23	50	1.5	0.5	100	1	5
10	40	40	0	1	5.14	100	0.5	0.5	50	0.5	
08	50	50	0	2	3.12	8	1	0.8	35.8	1	1
05	40	40	0	0.8	4.78	100	0.5	0.8	0.05	1	
11	40	40	0	0.05	4.12	48	0.5	0.5	0.05	1	
17	40	40	0	1	3.48	78	0.5	0.5	0.05	1	

Figura 28

Precipitaciones ingresadas al HEC-HMS



Para las condiciones iniciales se ha realizado una estimación en base a los caudales de los aforos disponibles. Configurada la cuenca e ingresados los datos se procedió estableció las especificaciones de control (periodo tiempo en el que el programa realiza la simulación) donde se configuro que el modelo empieza el 1 de enero de 1990 y termina el 31 de diciembre de 2020, seguido a esto se procedió a correr el modelo, en la figura 29 se observa la forma en la que el HEC-HMS presenta los resultados de la simulación.

Figura 29

Presentación de resultados de manera global de la simulación en el HEC-HMS

Global Summary Results for Run "Run 1990-2020"

Project: Paute Simulation Run: Run 1990-2020

Start of Run: 01ene1990, 00:00 Basin Model: Paute cuenca
 End of Run: 31dic2020, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 05ene2022, 13:53:37 Control Specifications: Control 1990-2020

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (1000 M3)
C	1644.28	156.4	24ago2019, 00:00	22122767.2
C-D	1644.28	154.3	24ago2019, 00:00	22122690.5
D1	447	59.2	17ene2000, 00:00	2516222.0
D3	120.29	40.0	07ene1996, 00:00	777099.3
D	2211.57	157.3	24ago2019, 00:00	25416011.7
D-E	2211.57	155.2	24ago2019, 00:00	25415912.2
I2	952.49	324.9	24oct2010, 00:00	30035736.6
O4	297.5	58.9	06ene1996, 00:00	953075.2
E	3461.56	358.4	24oct2010, 00:00	56404726.0
E-F	3461.56	355.5	24oct2010, 00:00	56404451.4
O7	50.81	15.0	29jun1993, 00:00	451060.0
F	3512.37	355.9	24oct2010, 00:00	5685511.4
F-G	3512.37	352.9	06ene1996, 00:00	56855272.4
O2	239.36	97.3	08ago1995, 00:00	2166535.5
G	3751.73	355.5	06ene1996, 00:00	59021807.9
G-H	3751.73	354.8	06ene1996, 00:00	59021679.2
O9	447.1	91.3	27feb1999, 00:00	10996054.8
I0	168.27	39.9	22ago1996, 00:00	4478523.6
H	4367.10	376.1	06ene1996, 00:00	74496257.6
H-I	4367.10	374.9	06ene1996, 00:00	74495993.7
O8	165.77	56.3	23nov1995, 00:00	4912314.9
I	4532.87	387.6	06ene1996, 00:00	79408268.5
I-J	4532.87	387.5	06ene1996, 00:00	79408254.5
O5	427.31	100.4	23nov1995, 00:00	3034274.6
I1	169.21	95.2	23oct2007, 00:00	4000873.2
J	5129.39	395.3	06ene1996, 00:00	86443402.3
J-Exit	5129.39	393.2	06ene1996, 00:00	86442855.7
I7	510.12	130.3	23oct2007, 00:00	4666435.8
EXIT	9638.51	446.9	23oct2007, 00:00	91109281.6

Calibración y Validación del modelo

Como primer paso para el procedimiento de calibración y validación se ha realizado una calibración manual haciendo aproximaciones al caudal base mediante las variables GW1 Storage, GW1 Percolación, GW1 Coefficient y Soil Percolation los cuales controlan el volumen de agua que se infiltra, la calibración manual se realizó variando los valores de las variables en función de los rangos presentados en la tabla 3, hasta que el caudal simulado se asemeje a los observados, esta primera calibración permitió analizar la trascendencia que tienen las variables en el hidrograma resultante generado durante la simulación, los resultados de esta evaluación están enlistados en la tabla 11, donde se encuentran las variables más sensibles.

Tabla 11

Variables más sensibles durante la calibración manual

	Parámetros	Descripción
Loss	Max infiltration (mm/hr)	Cambia la altura de los picos. Cambia la precipitación efectiva
	Soil Storage (mm)	Cambia la altura de los picos. Cambia la precipitación efectiva.
	Soil Percolation (mm/hr)	Cambia la precipitación efectiva
	GW 1 Storage (mm)	Cambia el volumen del flujo base
	GW 1 Percolation (mm/hr)	Cambia la altura de los picos.
	GW 1 Coefficient (hr)	Cambia el volumen del flujo base
Transform	Time of concentration (hr)	Cambia la recesión en el hidrograma.
	Storage Coefficient (hr)	Cambia la altura de los picos.

Las variables calibradas manualmente fueron nuevamente ajustadas con el módulo optimization trial del programa. Para la calibración semiautomática se escogió la función objetivo NSE, donde la tolerancia se graduó en 0.0001 y las iteraciones con un máximo de 1000.

Los valores de NSE durante la calibración semiautomática resultaron satisfactorios según la tabla 4, entonces para corroborar estos resultados se analizó los caudales simulados en el HydroGof mediante el índice de bondad KGE, de igual forma la validación se realizó en el HydroGof, donde se ingresó los caudales simulados y observados con periodo de tiempo distinto al de la calibración para obtener los valores de KGE.

Para determinar la calidad de la simulación hidrológica a través de NSE, se emplea los parámetros de calificación de la tabla 4, donde los valores obtenidos de NSE se ubican en los rangos satisfactorio y bueno. Los valores de KGE obtenidos se calificaron según el criterio de Knoben et al. (2019) donde se considera a KGE en un rango de -0.41 a 1, entonces mientras más se acerque a 1 el índice, los caudales simulados se asemejarán a los observados. La tabla 12 contiene los valores obtenidos de los índices NSE y KGE

Tabla 12

Valores obtenidos de NSE y KGE en la etapa de calibración y validación

Nombre	Est.	Índices de eficiencia				
		Nash–Sutcliffe (NSE)			Kling-Gupta (KGE)	
		Calibr.	Valid.	Calif.	Calibr.	Valid.
Mazar Aj Paute	H-0892	0.41	0.45	Bueno	0.25	0.23
Matadero en Sayausi	H-0896	0.37	0.34	Satisfactorio	0.24	0.27
Tarqui Dj Zhucay	H-0942	0.36	0.4	Satisfactorio	0.25	0.24
Tomebamba en Monay	H-0895	0.494	0.452	Bueno	0.22	0.18

Cálculo de los Índices de Alteración Hidrológica

Después de realizar los procesos de calibración y validación del modelo se han extraído los caudales diarios simulados para realizar el cálculo de los índices, los caudales seleccionados corresponden al periodo 1990-2021. Una vez obtenidos los caudales simulados se procedió a calcular los IHA para la totalidad de la cuenca del río Paute (CRP), la tabla 13 contiene los valores obtenidos de cada índice, a los cuales se les ha ubicado dentro del rango de calificación y esto ha permitido caracterizar el comportamiento de la cuenca.

Tabla 13

Valores Obtenidos de los IHA Cuenca en General y caracterización de los mismos

Índice	CRP Valor obtenido	Rango en el que se ha situado el índice	Caracterización de la cuenca
P _{anual} (mm/año)	1160.98		La cuenca posee un buen volumen de lluvias, humedad atmosférica y gradiente de temperatura.
SINDX (-)	0.07	$0 < 0.3$	La precipitación de la cuenca es no estacional y altamente variable, se distribuye a lo largo de todo el año
DAYPO (-)	0.02	$0 < 0.3$	En todo el periodo monitoreado existe precipitación con alta intensidad (El porcentaje de días con precipitación 0 es bajo.
PVAR (mm/mm)	0.59	$0.3 < PVAR \leq 0.7$	La precipitación diaria de la cuenca es muy variable.
QVAR (mm/mm)	0.47	$0.3 < QVAR \leq 0.7$	Los caudales de la cuenca poseen buena variabilidad, los valores de los flujos de agua son heterogéneos.
R2FDC (-)	- 0.46	$R2FDC > -0.7$	La cuenca tiene comportamiento amortiguado y buena capacidad de almacenamiento.
IRH (-)	0.81	$0.75 < IRH < 0.85$	La cuenca posee una alta retención y regulación de la humedad.
DLQ75 (día)	18.42	Caudal umbral para los pulsos bajos	18.42 días al año se tiene un caudal menor al Q25 (78.56 m ³ /s).
DHQ25 (día)	8.48	Caudal umbral para los pulsos altos	8.48 días al año se tiene caudales mayores al Q75 (134.43 m ³ /s).

CAPÍTULO V

Análisis de Resultados y Discusión

Calibración en el aforo H-0892.

El periodo de tiempo para la calibración con la estación H-0892 está comprendido entre septiembre del 2012 a abril del 2015, en la figura 30 y 31 se visualizan los caudales simulados (línea azul) antes y después de la calibración respectivamente, los caudales observados se representan con la línea de puntos de color negro.

Figura 30

Caudal simulado en la subcuenca 8 (Río Mazar) antes de la calibración. Estación H-0892

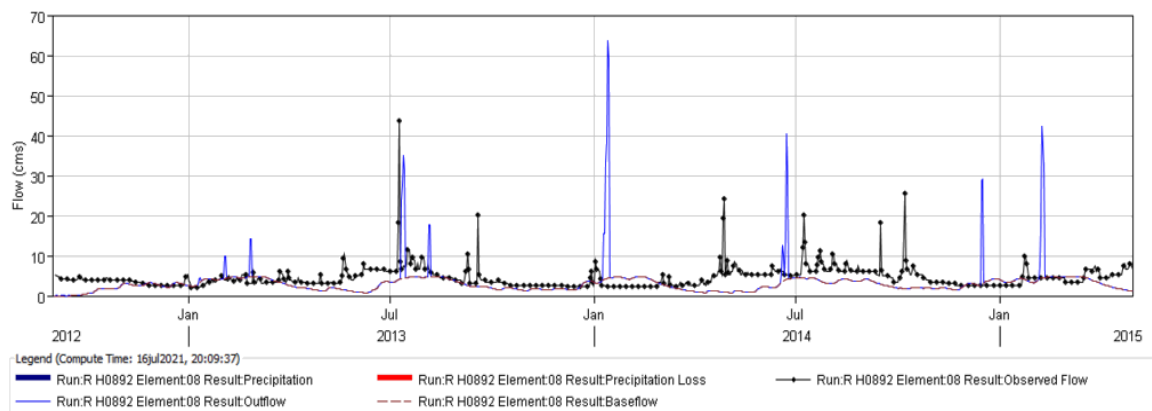
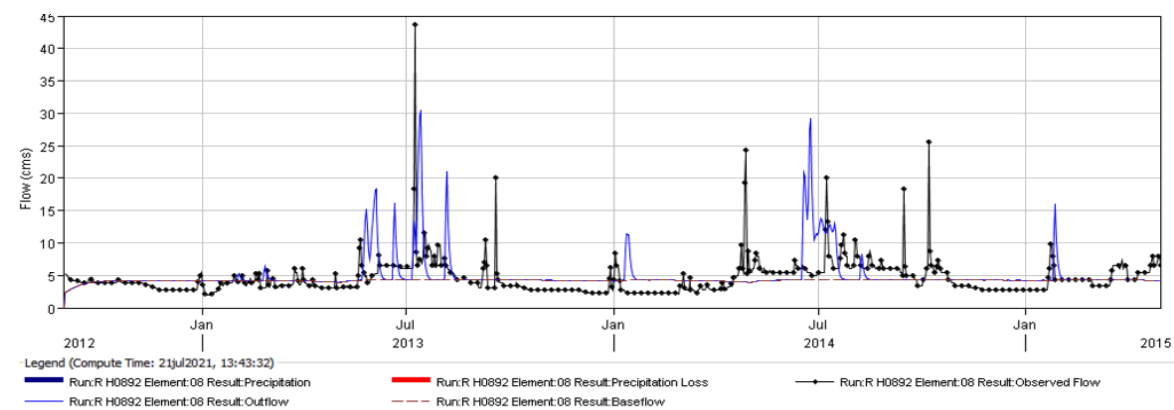


Figura 31

Caudal simulado en la subcuenca 8 (Río Mazar) calibrado. Estación H-0892



Los valores obtenidos de la calibración manual en la estación H-0892 se presentan en figura 32, columna “Initial value”, posteriormente estos valores fueron optimizados a través del módulo optimization trial del HEC-HMS, los cuales están en la columna “Optimized Value” (figura), se observa que la variable GW1 PERCOLATION y GW1 Coefficient no han tendido la necesidad de ser optimizadas, ya que las sensibilidades de las variables son muy pequeñas, terminado el proceso de calibración se procedió a realizar la validación.

Figura 32

Valores obtenidos de la calibración manual (Initial Value) y semiautomática (Optimized Value)

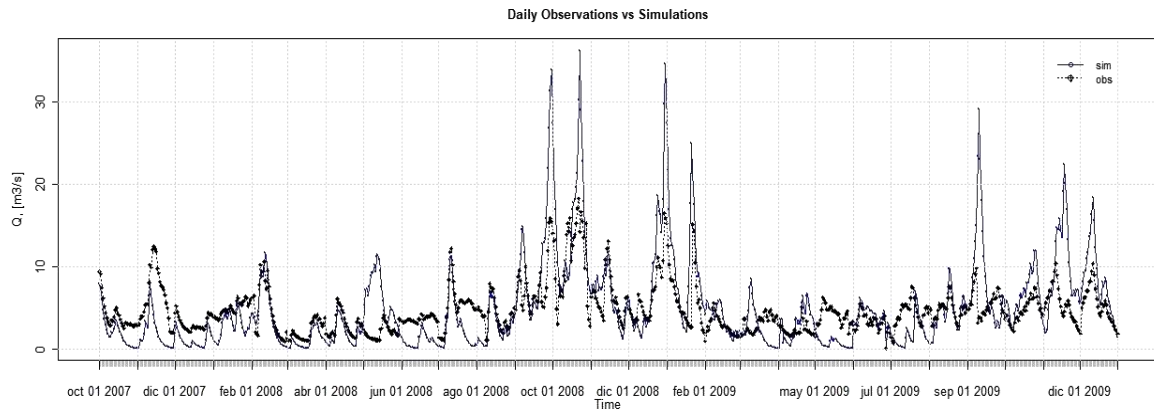
Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Simple Canopy - Max Storage	MM	0.092	0.0848579
Simple Surface - Max Storage	MM	1.2	1.1294
Soil Moisture Accounting - Max Infiltration	MM/HR	1.1	0.48889
Soil Moisture Accounting - Soil Storage	MM	0.68	0.29618
Soil Moisture Accounting - Tension Storage	MM	1	1.00000
Soil Moisture Accounting - Soil Percolation	MM/HR	0.8	0.78400
Soil Moisture Accounting - GW1 Percolation	MM/HR	0.58	0.58870
Soil Moisture Accounting - GW1 Percolation	MM/HR	0.58	
Linear Reservoir - GW 1 Coefficient	HR	100	22.425
Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	100	101.46
Linear Reservoir - GW 1 Coefficient	HR	100	

Validación en el aforo H-0892.

El periodo de tiempo para la validación de caudales con la estación H-0892 es de octubre de 2007 a diciembre del 2009, la figura 33 presenta los caudales simulados (en azul) y el observado (en negro) para dicha estación, con un valor de $NSE = 0.45$ y $KGE = 0.23$, la simulación se ubica en un rango de estatus bueno para esta estación.

Figura 33

Hidrograma de caudales simulado (sim) y observado (obs) en el periodo de validación, estación H-0892.



Calibración en el aforo H-0896.

El periodo de tiempo para la calibración con la estación H-0896 está comprendido entre mayo del 2014 a abril de 2015, en la figura 34 y 35 se visualizan los caudales simulados antes y después de la calibración respectivamente, los caudales observados se representan con la línea de puntos de color negro.

Figura 34

Caudal simulado en la sub-cuenca 15 (Tomebamba) antes de la calibración. Estación H-0896

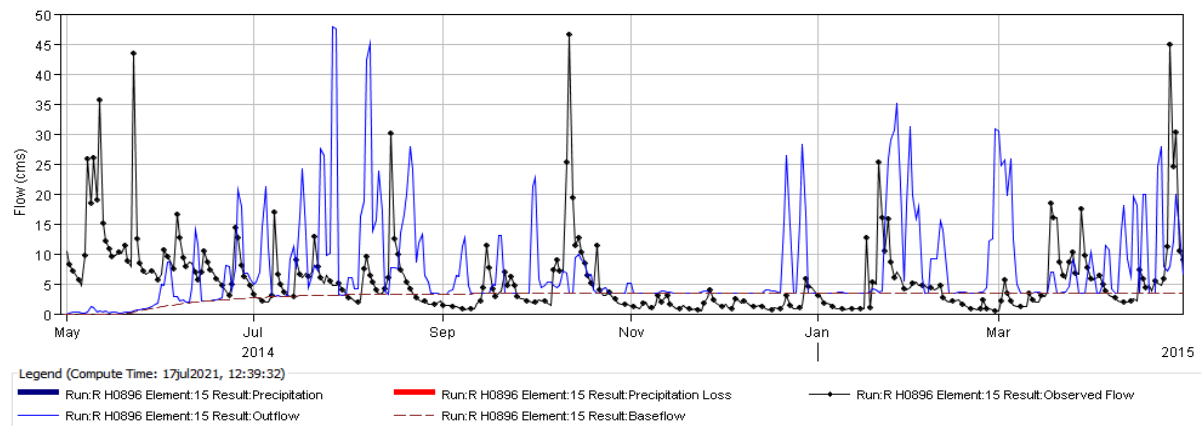
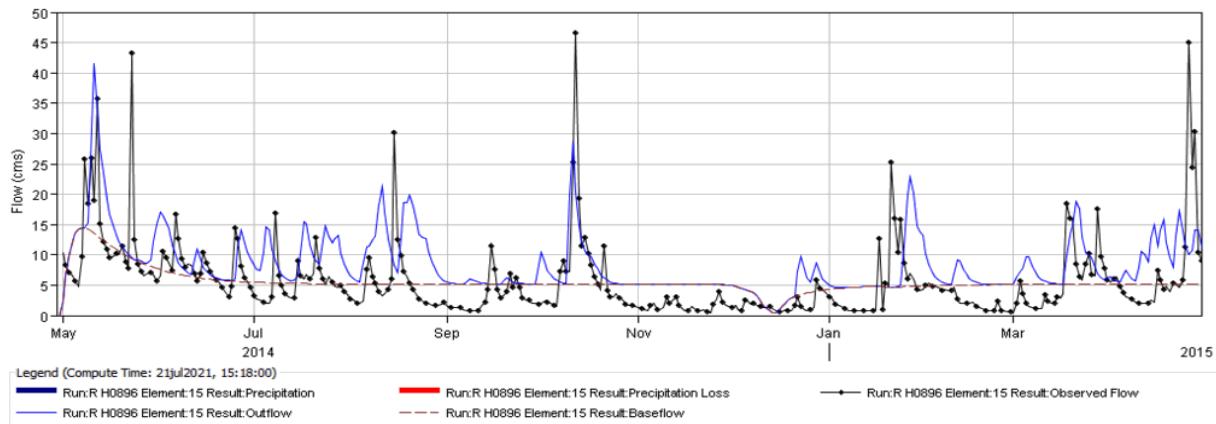


Figura 35

Caudal simulado en la sub-cuenca 15 (rio Tomebamba) calibrado. Estación H-0896



Los valores obtenidos de la calibración manual en la estación H-0896 se presentan en figura 36, columna “Initial value” y los valores optimizados en la columna “Optimized Value”, se observa que la variable “time of concentration” ha aumentado de valor, lo provoque que cambie la recesión del hidrograma, terminado el proceso de calibración se procedió a realizar la validación.

Figura 36

Valores obtenidos de la calibración manual (Initial Value) y semiautomática (Optimized Value)

Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Simple Canopy - Max Storage	MM	0.31	0.43765
Simple Surface - Max Storage	MM	1.92	2.8944
Soil Moisture Accounting - Max Infiltration	MM/HR	1	1.5088
Soil Moisture Accounting - Soil Storage	MM	1.45	1.4620
Soil Moisture Accounting - Tension Storage	MM	1.28	0.81954
Soil Moisture Accounting - Soil Percolation	MM/HR	13.92	13.703
Soil Moisture Accounting - GW1 Storage	MM	18.37	17.290
Soil Moisture Accounting - GW1 Percolation	MM/HR	0.345	0.34798
Linear Reservoir - GW 1 Coefficient	HR	100	101.46
Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	81.2	183.59
Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	118.50	119.99

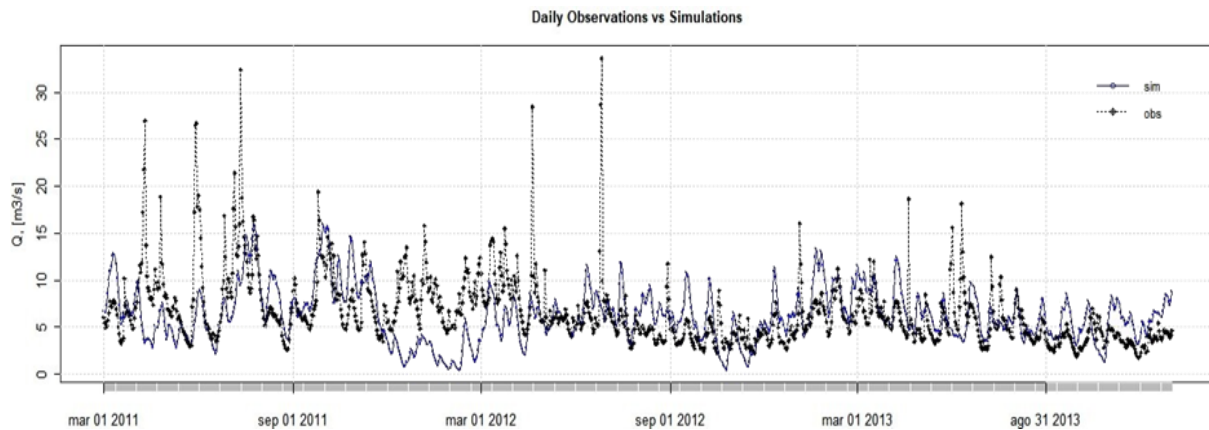
Validación en el aforo H-0896.

El periodo de tiempo para la validación de caudales con la estación H-0896 está comprendido entre marzo de 2011 a septiembre de 2013, en la figura 37 se visualiza el caudal

simulado y el observado para dicha estación, con un valor de $NSE = 0.34$ y $KGE = 0.27$, la simulación se ubica en un rango satisfactorio para esta estación.

Figura 37

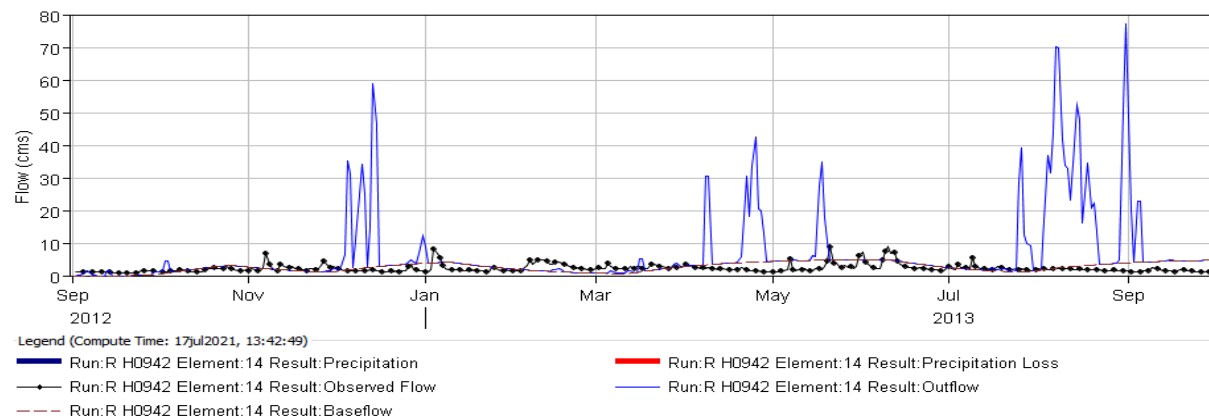
Hidrograma de caudales simulado (sim) y observado (obs) en el periodo de validación. Estación H-0896.



Calibración en el aforo H-0942

El periodo de tiempo para la calibración con la estación H-0942 está comprendido entre septiembre de 2012 a septiembre de 2013, en las figuras 38 y 39 se visualiza el caudal simulado (línea azul) antes y después de la calibración respectivamente, los caudales observados se representan con la línea de puntos de color negro.

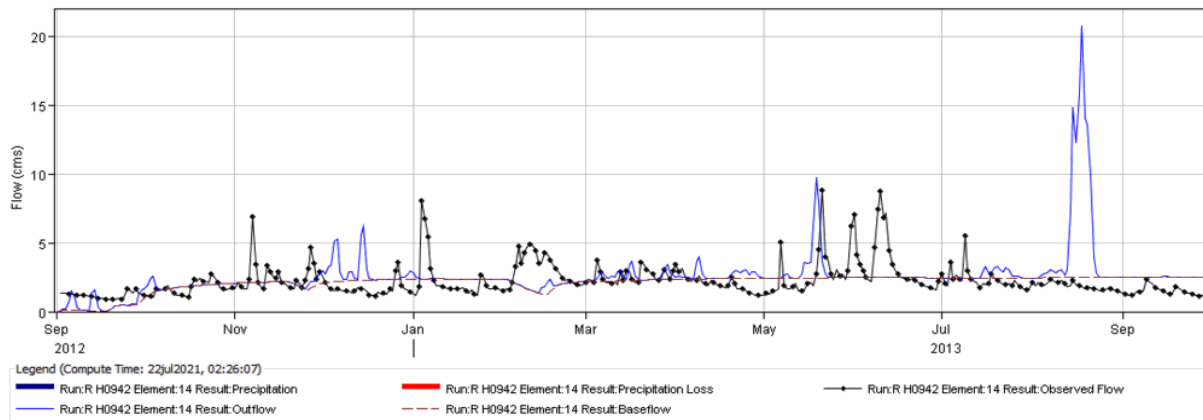
Figura 38



Caudal simulado en la sub-cuenca 14 (río Tarqui) antes de la calibración. Estación H-0942.

Figura 39

Caudal simulado en la sub-cuenca 14 (Tarqui) calibrado. Estación H-0942.



Los valores obtenidos de la calibración manual en la subcuenca Tarqui (esta. H-0942) se presentan en figura 40, columna “Initial value” y los valores optimizados en la columna “Optimized Value”, se observa que la variable “GW 1 Storage” o acuífero 1 ha disminuido, es decir, que el agua almacenada este nivel disminuye, produciendo que el volumen del flujo base aumente, terminado el proceso de calibración se procedió a realizar la validación.

Figura 40

Valores obtenidos de la calibración manual (Initial Value) y semiautomática (Optimized Value)

Parameter	Units	Initial Value	Optimized Value
Simple Canopy - Max Storage	MM	0.72	0.66411
Simple Surface - Max Storage	MM	0.78	1.1809
Soil Moisture Accounting - Max Infiltration	MM/HR	1.22	1.2381
Soil Moisture Accounting - Soil Storage	MM	0.84	0.85773
Soil Moisture Accounting - Tension Storage	MM	0.80	0.0677381
Soil Moisture Accounting - Soil Percolation	MM/HR	12	26.730
Soil Moisture Accounting - GW1 Storage	MM	823	245.06
Soil Moisture Accounting - GW1 Percolation	MM/HR	85	128.72
Linear Reservoir - GW 1 Coefficient	HR	600	608.70
Clark Unit Hydrograph - Time of Concentration	HR	89	90.221
Clark Unit Hydrograph - Storage Coefficient	HR	1.89	1.8900

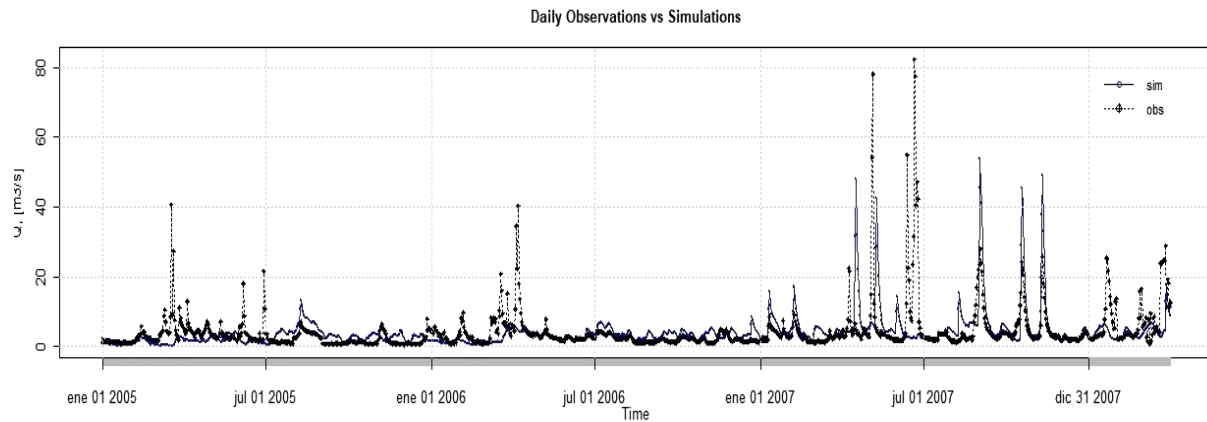
Validación en el aforo H-0942

El periodo de tiempo para la validación de caudales con la estación H-0942 está comprendido entre enero de 2005 a enero de 2007, en la figura 41 se visualiza el caudal simulado

y observado para dicha estación, con un valor de $NSE = 0.4$ y $KGE = 0.24$, la simulación se ubica en un rango satisfactorio para esta estación.

Figura 41

Hidrograma de caudales simulado (sim) y observado (obs) en el periodo de validación. Estación H-0942



Calibración en el aforo H-0895

El periodo de tiempo para la calibración con la estación H-0895 es de febrero del 2006 a diciembre del 2008, las figuras 42 y 43 presentan los caudales simulados en la unión de las subcuencas 14, 15 y 16 antes y después de la calibración respectivamente.

Figura 42

Caudal simulado en la unión de las subcuencas antes de la calibración. Estación H-0895.

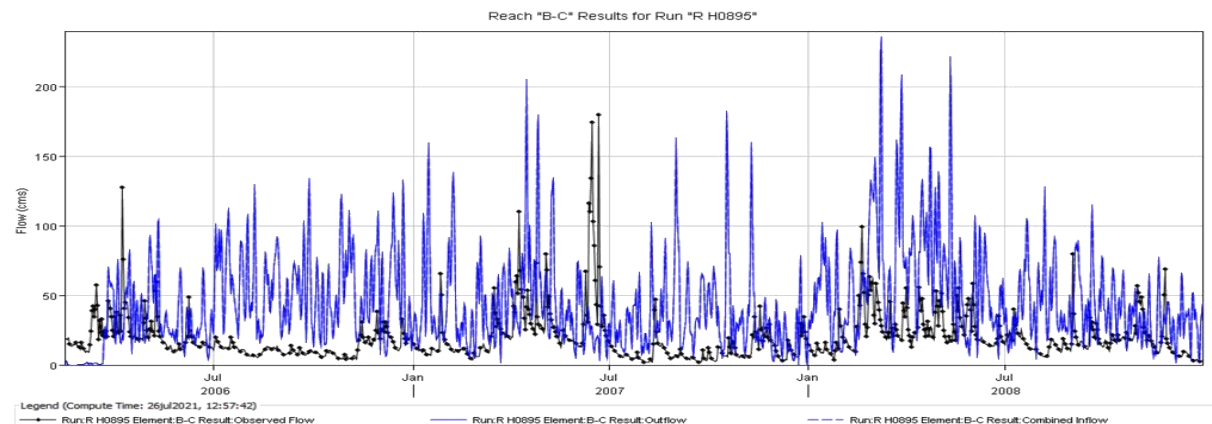
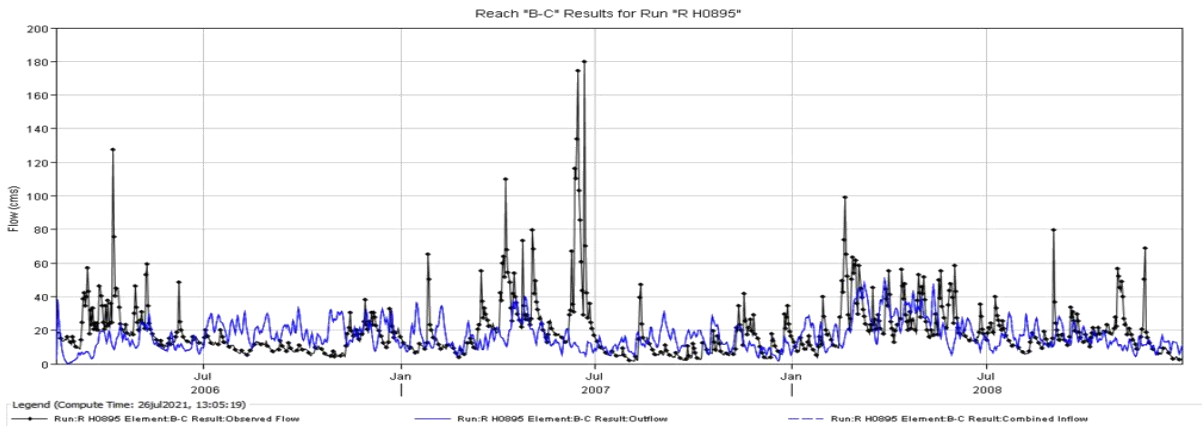


Figura 43

Caudales simulados en la unión de las subcuencas después de la calibración. Estación H-0895

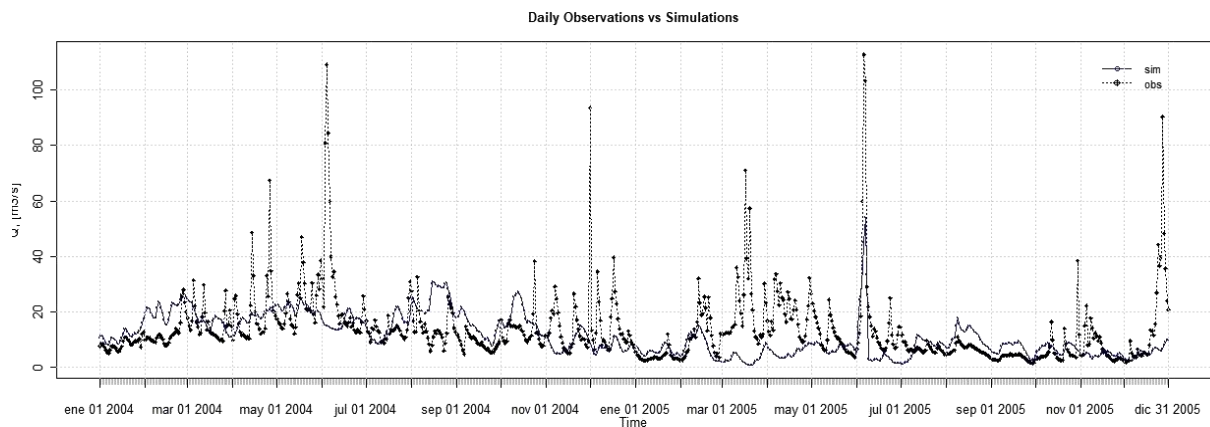


En este punto se suman los hidrogramas generados en las subcuencas Tarqui, Tomebamba, y Yanuncay, ya que es un punto de unión, por lo cual, para calibrar el caudal en este punto, primero se calibraron las subcuencas mencionadas.

Validación en el aforo H-0895

El periodo de tiempo para la validación de caudales con la estación H-0895 es de enero del 2004 a diciembre del 2005, en la figura 44 se visualiza el caudal simulado por el Hec-Hms y el observado para dicha estación, con un valor de $NSE = 0.494$ y $KGE = 0.18$, la simulación se ubica en un rango satisfactorio para esta estación.

Figura 44 *Hidrograma de caudales simulado (sim) y observado (obs) en el periodo de validación. Estación H-0895*



Se ha calibrado y validado el modelo evaluando el desempeño de la simulación a través de dos índices de bondad de ajuste anteriormente mencionados, NSE “Nash-Sutcliffe” y KGE “Kling-Gupta”. Es evidente que los valores obtenidos de KGE y NSE durante las etapas de calibración y validación del presente estudio son positivos (Tabla 12), para caracterizar los valores de NSE se ha empleado los criterios descritos en Moriasi et al. (2007) dando como resultado que los valores se encuentran en un rango satisfactorio, en cambio para los valores de KGE se ha empleado el criterio de Knoben et al. (2019), el cual establece el rango de KGE entre -0.41 y 1. Los valores obtenidos califican como satisfactoria la simulación.

Valores de NSE entre 0.4 y 0.6 se han encontrado en cuenca de alta montaña con precipitaciones anuales entre 620 mm y temperatura media de 11°C, características similares a las del río Paute, es así Pellicer et al. (2017) obtiene valores entre 0.406 y 0.586 en el periodo de calibración y valores entre 0.305 y 0.44 para el periodo de validación. Crespo (2019) ha encontrado valores de KGE = 0.21 para la subcuenca del río Tomebamba, el cual es muy similar al KGE obtenido en nuestro modelo, el cual está entre 0.24 y 0.27 en las etapas de calibración y validación respectivamente.

Analizando de manera global los valores de NSE y KGE calculados se determinan que están dentro del rango en el cual se considera como satisfactoria la simulación, todo este análisis y comparaciones ha permitido calificar el rendimiento del modelo como satisfactorio.

Análisis de los resultados de los IHA

Para la CRP se ha sumado los valores de precipitación dando como resultado una precipitación estimada anual promedio (Panual) de 1160.98 mm·año⁻¹, donde se determina que la precipitación de la cuenca posee una estacionalidad baja (SINDEX < 0.3) y una alta variabilidad, y esta se distribuye a lo largo de todo el año (PVAR = 0.59), de igual forma se tiene DAYP0 < 0.3 indicando que se tiene pocos días con precipitación cero. Los valores PVAR y QVAR obtenidos son mayores a 0.3 lo que expresa que los flujos poseen magnitudes altamente variables a lo largo de todo el año.

Los resultados de R2FDC (-0.46) asocia al perfil de la FDC con una pendiente baja caracterizando a la CRP con un comportamiento amortiguado y con buena capacidad de almacenamiento, es decir, que sus aguas no se drenan de inmediato, sino que permanecen por

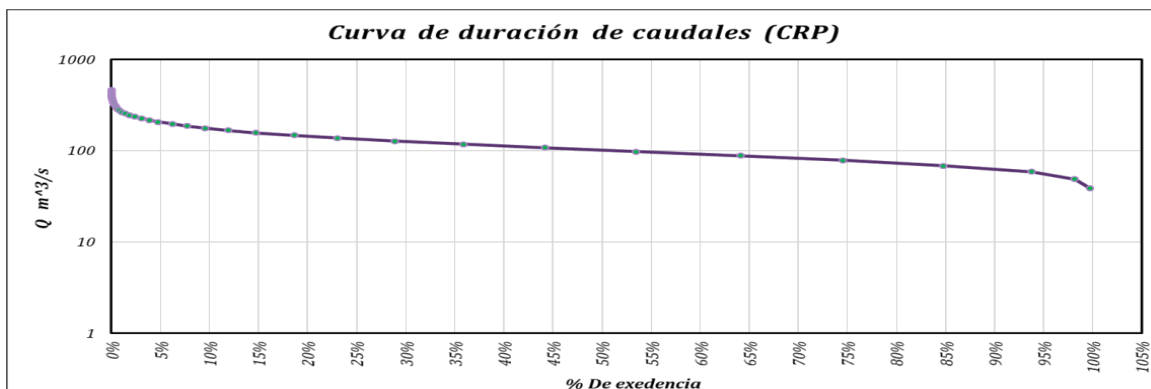
mucho más tiempo mantenido flujos base. El valor de IRH (0.81) indica que la cuenca tiene una alta retención y regulación de la humedad, IRH se contrasta con R2FDC dado que los dos índices indican que la posee una buena capacidad de regulación y retención de la humedad.

Se ha elaborado la FDC de la cuenca del río Paute (Figura 45) con el afán de caracterizarla mediante los gráficos que expone Monsalve (1999), es así que observando la parte baja de la FDC de la CRP se ha determinado que tiene similitud a la curva “i”, donde: se la caracteriza como una cuenca con alta permeabilidad (esto se corrobora con el mapa de cobertura y usos del suelo donde se determinó que en la cuenca predomina la vegetación natural) y con aguas subterráneas que aportan flujos al cauce, también la caracteriza como una cuenca que tiene una buena retención de agua, este último coincide con IRH, ya que el índice indicaba que la cuenca posee una alta retención y regulación de humedad (IRH = 0.81).

La parte alta de la FDC se asemeja a la curva “i” lo que la caracteriza como una cuenca de tamaño moderado, ya que por ella pasa la cadena montañosa de los Andes.

Figura 45

FDC de la cuenca del río Paute



Las curvas de duración de caudales se utilizan principalmente las partes de sus extremos, pudiendo deducir así características de las cuencas, en este caso se han analizado la duración de los caudales menores a Q75 (umbral de los pulsos bajos) y los caudales mayores Q25 (umbral de los pulsos altos), donde el caudal umbral obtenido para los pulsos altos (DHQ25=8.48) es de 134.43 m³/s, esto quiere decir que 8.48 días al año este caudal es superado, o que el caudal de 134.43 m³/s tiene una probabilidad de excedencia del 25%.

El caudal umbral para los pulsos bajos ($DLQ_{75} = 18.42$) es de $78.56 \text{ m}^3/\text{s}$, de igual forma; esto quiere decir que 18.42 días al año se tiene caudales menores a este o que el caudal de $78.56 \text{ m}^3/\text{s}$ tiene una probabilidad de excedencia del 75 %.

Los valores de DLQ_{75} obtenidos son buenos, ya que son pocos días en que se tiene un caudal bajo, lo cual es beneficioso debido a que estos mantienen la salud de los ecosistemas acuáticos de ribera, ya que conservan la cantidad de hábitat necesaria anualmente para estos ecosistemas (condiciones favorables para la subsistencia de las especies). Lo dicho anteriormente influye en la diversidad y el número de organismo que viven el ambiente ripario (Pérez, 2015).

Los pulsos altos de caudal DHQ_{25} contribuyen al desarrollo de los hábitats, manteniendo la morfología del río y realizan el lavado de la materia orgánica acumulada. Estas condiciones garantizan que ocurra estacionalidad de caudales y la existencia de periodos húmedos (Pérez, 2015).

Discusión

El desarrollo y aplicación de los índices que describen la hidrológica de cuencas hidrográficas ha tomado fuerza en los últimos tiempos, lo que ha provocado que exista mayor literatura en donde se habla de los IHA, permitiendo cotejar o corroborar resultados obtenidos entre lugares de similares condiciones, facilitando la interpretación y validación de los mismos, entonces en los párrafos a continuación se analiza los valores obtenidos con los que se han encontrado dentro de la literatura.

Los valores de $SINDEX$ (0.07) para la cuenca del río Paute son menores a 0.3, Ochoa (2019) reporta valores menores a 0.3 en cuencas de páramo en la provincia de pichincha, donde se tiene climas tropicales, de igual forma ha obtenido valores bajos en Chachapoyas Perú en paisajes de jalca donde se tiene un clima húmedo y semihumedo. Celleri et al. (2007) ha obtenido valores de $SINDEX$ de 0.014 y 0.0016 para las precipitaciones registrados por dos puntos de aforo uno en Cumbe y otro en Paute, provincia del Azuay.

Catalán & Espinoza (2017) estudian la zona mediterránea de Chile donde expresan que el $PVAR$ posee una alta dependencia de la altitud y establecen un $PVAR$ de 0.39 – 0.79 para regiones subtropicales.

EL coeficiente de variación (PVAR) se ha empleado para estudiar diferentes regímenes de flujo encontrándose valores mayores a 0.2 para regiones húmedas, es así que, en las regiones húmedas de Europa, Asia y en el norte de América se registran valores de 0.3, y valores mayores a 2 se encuentran en regiones semiáridas, es el caso del sur de Australia donde presenta un PVAR de 2.6 a 3.2 para cuencas de gran tamaño. Giler et al. (2019) encuentra valores de QVAR de 0.45, 0.80 y 1.17 para tres microcuencas con clima tropical en la provincia de Manabí, a pesar que dichos valores se encuentran altos en comparación con su contraparte de otras regiones húmedas, estos se encuentran dentro del rango de cuencas tropicales.

Los valores de la pendiente del tercio medio (R2FDC) obtenidos en el presente estudio son alentadores para una buena caracterización de la CRP, valores de R2FDC encontrados Giler et al. (2019) se encuentran entre 0.495 y 0.69 para subcuencas de clima tropical en la provincia de Manabí, al igual Ochoa (2019) ha reportado valores de -0.32 y -0.7 para las microcuencas de páramo en los andes tropicales.

Villegas (2011) expresa que pendientes altas de la FDC corresponde a cauces de alta montaña, y de baja pendiente a cauces de llanura, este autor ha obtenido valores de R2FDC entre 0.39 y 0.45 para la cuenca del río Taurus en Portugal, la cual posee un clima marítimo, con volumen de lluvias de 1000 a 2000 mm·año⁻¹

El IDEAM “Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales” ha encontrado valores de IRH entre 0.68 y 0.83 en el centro occidente de Colombia para subcuencas con clima templado, semi-húmedo y templado-húmedo (Pomca, 2018). Giler et al. (2019) en cambio ha obtenido valores entre 0.18 a 0.34 de IRH para subcuencas de la costa ecuatoriana, pero con R2FDC bajo, no obstante, Ochoa-Tocachi et al. (2016) ha reportado valores más altos en la parte sur de la sierra, con $0.43 < IRH < 0.67$ para microcuencas de páramo, y de 0.46 a 0.63 en la sierra norte, determinando que las cuencas de la sierra ecuatoriana comparte valores altos de IRH.

DLQ75 y DHQ25 guardan similitud con índices obtenidos en estudios similares para cuencas con características análogas a la CRP, es así que en cuencas tropicales de Brasil se han encontrado valores promedios de DLQ75= 5.5 y DHQ25= 8 donde se determina que cuencas con cobertura de pasto liberan hasta un 50% más de caudales durante periodos de flujos altos, a diferencia de cuencas con cobertura boscosa donde no se observó mayor variabilidad de caudales (Giler et al., 2019).

Ochoa-Tocachi et al. (2016) analiza las cuencas andinas de Ecuador y Perú, donde obtuvo valores de DLQ75 entre 7.33 a 19.6 y de DHQ25 entre 3.1 a 15.39, es evidente que son valores cierto grado de variabilidad, no obstante, las magnitudes obtenidas de nuestro análisis están dentro de esos rangos (DLQ75 = 18.42 y DHQ25 = 8.48).

CAPÍTULO VI

Conclusiones

La cuenca del río Paute es de gran importancia, por ello gran parte de ella se encuentra bajo protección ambiental, no obstante, se enfrenta al constante cambio climático, Pozo (2018) indica que la temperatura de la cuenca aumenta 0.28° C cada década, lo que provocaría aumento de la evapotranspiración provocando sequías en el suelo el cual perdería la capacidad de retención de la humedad ocasionando disminución del caudal.

El resultado de cálculo de los índices en función de la precipitación (SINDX, DAYPO, y PVAR) indican que la CRP posee una precipitación de baja estacionalidad e intensidad y muy variable, y esta se produce a lo largo de todo el año.

Se ha ilustrado los caudales simulados mediante la FDC, donde al analizar la pendiente del tercio medio (R2DFC) se ha concluido que la CRP tiene con un comportamiento amortiguado y una capacidad de almacenamiento bueno, donde sus aguas no se drenan de inmediato, sino que permanecen por mucho más tiempo, de la misma forma los valores de IRH obtenidos ubican a la cuenca en un estado óptimo al poseer una alta retención y regulación de la humedad.

Analizando los extremos de la FDC se ha obtenido la duración de los pulsos bajos y altos, (DLQ75 y DHQ25), donde se concluye que sólo 18 días al año se tiene caudales menores a $78.56 \text{ m}^3/\text{s}$, favoreciendo a la conservación de los ecosistemas riparios, también se tiene que durante 8 días al año un caudal de $134.43 \text{ m}^3/\text{s}$ es superado, y que este contribuye al desarrollo de los hábitats, mantienen la morfología del río y realizan el lavado de la materia orgánica acumulada

Los valores obtenidos de índices de Alteración Hidrológica se han ubicado dentro de los rangos en los que se caracteriza a cuencas hidrográficas de buen funcionamiento. Es así que se ha concluido que la cuenca del Río Paute tiene un buen comportamiento y no ha presentado alteración durante el periodo estudiado.

Recomendaciones

Bien se sabe que la información Hidrometeorológica es la base para realizar estudios de cuencas hidrográficas o para describir el comportamiento de las mismas. Durante el análisis de la información disponible para el presente estudio se observó que todas las estaciones tanto hidrológicas como meteorológicas poseen datos ausentes y algunas durante periodos muy largos, considerando esto se recomienda que la información a usar sea normalizada y homogeneizada para tener una base de datos fiable.

Estudios futuros

Se ha caracterizado el comportamiento de la cuenca del río Paute en general mediante los Índices de Alteración Hidrológica, no obstante, se plantea que para estudios futuros se podría aplicar estos índices a nivel de subcuenca a fin identificar si estas presentan alteración alguna, y de ser el caso plantar medidas de protección y conservación.

Pozo (2019) analiza el cambio climático en la cuenca del Rio Paute mediante proyecciones de caudal, donde observa que hay un incremento en los caudales de la cuenca a futuro, entonces se plantea aplicar los IHA a caudales proyectados y determinar los cambios que se producirían en la cuenca con caudales de mayor magnitud.

Referencias

- Aguilar, J. A. P., & Martín, M. D. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo*. 155.
- Álvarez, C., Soto, B., López, E., Diaz- Fierros, & Varela, C. (2001). *Análisis de la respuesta hidrológica en una cuenca fluvial y su relación con la precipitación*. 12.
- Ascencio, D. I. R. (2017). *Homogeneización de datos de precipitación de estaciones del INSIVUMEH, de la vertiente del Golfo de México, Guatemala* [Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Barahona, A. G. R. (2013). *MANUAL HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LAS VERTIENTES DEL AMAZONAS*. 226.
- Cabrera, B. J. (2017). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo*. [Esis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil]. Universidad de Cuenca.
- Castro, L. M. T., Sánchez, P. J. C., & Cabrera-Balarezo, J. J. (2019). Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin. *DYNA*, 86(210), 338-344. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>
- Catalán, C. E. E., & Espinoza, P. S. (2017). *Análisis y tendencias de la irregularidad temporal y espacial de la precipitación en Chile mediterráneo, período 1965 – 2010*. 19.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316-3327. <https://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Cordero, D. I. R. (2013). *Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/3358>
- Crespo, M. D. F. C. (2019). “*Evaluación de los modelos hidrológicos HEC-HMS Y HBV-light en la Subcuenca del Río Tomebamba*”. 125.
- Egas, G. C. (2009). *Caracterización y evaluación de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa*. 12.
- Gaona, G., Quentin, E., & Labus, J. (2013). Homogeneidad y variabilidad espacial de series meteorológicas del área del proyecto “Ciudad del Conocimiento—Yachay”. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v5i2.138>
- Giler, A., Navarrete, X. A. Z., Zambrano, J. L. C., Vera, D. A. A., Sánchez, J. P. G., Mera, J. E. F., Toro, M. D. C., & Loor, J. R. A. (2019). Análisis del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando índices: Estudio de caso en la región costa del Ecuador. *Terra. Nueva Etapa*, XXXV(58), e1.
- Guijarro, J. A. (2018). *Homogeneización de series climáticas con Climatol*. AEMET Agencia Estatal de Meteorología D.T. en Islas Baleares, España. http://www.climatol.eu/homog_climatol-es.pdf
- HEC-HMS Technical Reference Manual*. (2000). 148.

- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- López, O. J. C., & Viera, R. D. (2014). *Desarrollo de un manual hidrológico para el manejo de las cuencas del sur de la Costa Ecuatoriana*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7249>
- Luque, S. A. L. (2011). *Cualificación y homogenización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias; Memoria Metodológica Cualificación y homogenización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias; Memoria Metodológica*. Gobierno de Canarias (Agencia Canaria de Desarrollo, Sostenibilidad y Cambio Climático). <https://1library.co/document/zxo30ovz-cualificaci%C3%B3n-homogenizaci%C3%B3n-clim%C3%A1ticas-mensuales-precipitaci%C3%B3n-canarias-memoria-metodol%C3%B3gica.html>
- Martínez, B. C. (2019). *Estadística Básica Aplicada*. <http://www.ebooks7-24.com/?il=8975>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería – Bandeja de entradaviernes, 23 de febrero de 2018 10:34 *El Ministerio de Agricultura y Ganadería, (MAG) es la institución rectora del desarrollo agrario del país, que promueve acciones para el crecimiento sostenible, impulsando el bienestar de los productores, en particular de la agricultura familiar campesina.* (s. f.-b). Recuperado 3 de enero de 2022, de <https://www.agricultura.gob.ec/>
- Monsalve, S. G. (1999). *HIDROLOGÍA EN LA INGENIERÍA* (ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A., Vol. 2). Escuela Colombiana de Ingeniería. https://www.academia.edu/43983559/Hidrolog%C3%ADa_en_la_Ingenier%C3%ADa_2_ed_Germ%C3%A1n_Monsalve_S%C3%A1enz
- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Ochoa, T. B. (2019). *Participatory hydrological monitoring to support sustainable water resources management*. <https://doi.org/10.25560/75557>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074-4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Pastor, J. A. G. (2004). *CLIMATOL: SOFTWARE LIBRE PARA LA DEPURACIÓN Y HOMOGENEIZACIÓN DE DATOS CLIMATOLÓGICOS*. 10.
- Pellicer, M. F., Portela, M., Pedro-Monzonís, M., & Martínez-Paz, J. (2017, octubre 25). *Empleo de los errores de balance para la modulación de la bondad de ajuste en la modelización hidrológica*. http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema_B/b8.pdf

- Pérez, D. M. G. (2015). *TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS*. 122.
- Pita, D. Ó. (2018). *Detección de cambio climático en la cuenca del río Conchos, mediante índices climáticos*. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2062>
- Pomca, Q. (2018). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO LA VIEJA*. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2020-02/Documento_General_POMCA_LaVieja.pdf
- Pozo, E., Andrea. (2018). *ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CUENCA DEL RÍO PAUTE (ECUADOR)* [Grado en Ingeniería Civil, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA]. G1767 Trabajos académicos. Mención en hidrología. URI: <http://hdl.handle.net/10902/15794>
- Quindío, C. P. (2016). *Identificación, caracterización y priorización de actores Plan de ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/9_CapituloI_Diagnostico_Hidrologia.pdf
- Sánchez, S. R. F. J. (2013). *Curvas de caudales clasificados*. Dpto Geología - Universidad de Salamanca (España). https://hidrologia.usal.es/Complementos/Curvas_de_Q_clasificados.pdf
- Sánchez, S. R. F. J. (2015). *HEC-HMS. MANUAL ELEMENTAL*. Dpto. Geología - Univ-Salamanca (España). <https://dl-manual.com/doc/hec-hms-manual-no86pee6ryvp>
- SENPLADES. (2012). Proceso de desconcentración del Ejecutivo en los niveles administrativos de planificación. *Secretaría Nacional de Comunicación y Desarrollo, SENPLADES / 1 edición*, 11.
- Villegas, C. A. M. (2011). *DETERMINACIÓN DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDAL PARA CUENCAS INTERMITENTES*. 65.

Glosario

CRP = *Cuenca del Río Paute*

FDC = *Curva de Duración de Caudal*

P_{anual} = *Índice de precipitación anual promedio*

SINDEX = *Índice de estacionalidad*

DAYPO = *El índice de días con precipitación 0*

PVAR = *coeficiente de variación de la precipitación*

QVAR = *coeficiente de variación del caudal*

R2FDC = *Pendiente el tercio medio de la FDC*

IRH = *Índice de regulación hidrológica*

DLQ 75 = *Duración promedio de los pulsos bajos*

DHLQ25 = *Duración promedio de los pulsos altos*

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Franklin Fabricio Sari Guambaña** portador de la cédula de ciudadanía N.º 0107268997. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Análisis del comportamiento de una cuenca hidrográfica tropical utilizando índices hidrológicos. estudio de caso cuenca del río Paute”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **12 de enero de 2022**

F: 

Franklin Fabricio Sari Guambaña
0107268997