

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Indicadores hidrológicos para eventos de inundación en la subcuenca del río
Tarqui**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil

Autor:

Sebastián Fernando Salto Urgiles

Director:

Diego Esteban Mora Serrano

ORCID:  0000-0002-1139-3204

Codirector:

Daniel Emilio Mendoza Siguenza

ORCID:  0000-0002-2117-2587

Cuenca, Ecuador

2024-09-17

Resumen

La subcuenca del río Tarqui, ubicada en el suroeste de la Ciudad de Cuenca, ha presentado desde hace varios años, eventos de máximas avenidas de caudal con graves repercusiones para la población. Estudios previos evaluaron registros históricos de caudal mediante histogramas de diferentes eventos de máximas avenidas de caudal y encontraron que las crecidas más fuertes no siempre corresponden con los eventos de las precipitaciones extraordinarias registradas. Es por este motivo, que se recomienda utilizar un modelo lluvia-escorrentía para, generar los picos en el hidrograma considerando otros factores de tipo hidrológicos.

Para el presente estudio, se propuso como herramienta óptima el modelo Data-Based Mechanistic (DBM), un modelo de “caja gris” que incluye herramientas que describen de forma indirecta las condiciones de humedad de la cuenca según condiciones antecedentes de lluvia y caudal. Mediante la implementación de esta metodología en la predicción de caudales, se obtuvieron resultados eficientes para la gestión de riesgos de inundación con series de datos limitadas. Luego, para discernir el riesgo de tales precipitaciones, se generó un limitado modelo de inundación que revisa el riesgo en función del área de inundación.

Se determinaron caudales como umbrales de máxima reacción de la cuenca, junto con el tiempo de predicción determinado por el modelo y se recomendó un periodo de monitoreo continuo tras alcanzar dichos umbrales. Estos podrían formar parte de un sistema de reducción de riesgos, que fortalezca la gestión de riesgo.

Palabras clave del autor: indicador de riesgo, DBM, parámetro estado dependiente



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The Tarqui River sub-basin, located in the southwest of the City of Cuenca, has experienced peak flow events with severe repercussions for the population for several years. Previous studies evaluated historical flow records using histograms of different peak flow events and found that the strongest floods do not always correspond with recorded extraordinary precipitation events. For this reason, it is recommended to use a rainfall-runoff model to generate peak hydrograph flows, considering other hydrological factors.

For the present study, the Data-Based Mechanistic (DBM) model was proposed as the optimal tool. This "gray box" model includes tools that indirectly describe the basin's moisture conditions based on antecedent rainfall and flow conditions. By implementing this methodology for flow prediction, efficient results were obtained for flood risk management with limited data series. Subsequently, to discern the risk of such precipitation events, a limited flood model was generated to assess the risk based on the inundation area.

Flows were determined as thresholds for maximum basin response, along with the prediction time determined by the model, and continuous monitoring was recommended upon reaching these thresholds. These could be part of a risk reduction system that strengthens risk management.

Autor keywords: risk indicators, DBM, state dependent parameter



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

1. Introducción	15
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Justificación	17
1.3. Alcance.....	18
1.4. Pregunta de investigación	19
1.5. Hipótesis	19
1.6. Objetivos	19
1.6.1. Objetivo General.....	19
1.6.2. Objetivos específicos.....	19
2. <i>Materiales y métodos</i>	20
2.1. Área de estudio.....	20
2.2. Base de datos.....	21
2.2.1. Fuente de los datos	21
2.2.2. Descripción de las series	21
2.2.2.1. Estaciones de monitoreo PROMAS-Universidad de Cuenca	21
2.2.2.2. Estaciones de monitoreo ETAPA EP	22
2.2.3. Selección de estaciones y periodos de análisis	23
2.2.3.1. Distribución espacial.....	23
2.2.3.2. Distribución temporal	23
2.2.3.3. Estaciones seleccionadas.....	24
2.2.4. Control de calidad	24
2.2.4.1. Rellenado de datos.....	25
2.2.4.1.1. Método del factor de perturbación cuantil	25
2.2.4.1.2. Método de la curva de acumulación	25
2.2.4.2. Verificación de tendencia de las estaciones.....	26
2.2.4.3. Corrección en la curva de descarga.....	26
2.2.4.4. Corrección de datos.....	27

2.3.	Modelo Data Based Mechanistic (DBM).....	29
2.3.1.	Calibración.....	30
2.3.1.1.	Forma del modelo.....	30
2.3.1.2.	Identificación de los parámetros del modelo	31
2.3.1.3.	Parámetros estado dependientes	31
2.3.2.	Validación	32
2.4.	Caudales de riesgo y condiciones antecedentes	33
2.4.1.	Precipitación efectiva	34
2.4.2.	Constante de recesión de un reservorio lineal	34
2.5.	Revisión de caudales de riesgo	35
2.5.1.	Modelo de inundación.....	36
2.5.1.1.	Geometría del cauce.....	37
2.5.1.2.	Rugosidad del cauce	37
2.5.2.	Caudales de riesgo	38
3.	<i>Resultados y Discusión</i>	39
3.1.	Control de calidad.....	39
3.1.1.	Serie de precipitación	39
3.1.2.	Serie de caudal.....	41
3.2.	Modelo DBM	42
3.2.1.	Identificación del modelo	43
3.2.2.	Curvas estado dependientes	44
3.2.3.	Modelos seleccionados.....	44
3.2.4.	Validación de los modelos	45
3.3.	Identificación de caudales de riesgo	46
3.3.1.	Precipitación efectiva	46
3.3.2.	Recesión del reservorio lineal.....	47
3.3.3.	Tiempo de recesión	48
3.4.	Revisión de los caudales de riesgo.....	48
3.4.1.	Precipitaciones de diseño	48

3.4.2.	Caudales de riesgo	49
3.4.3.	Área de inundación	49
4.	<i>Conclusiones, observaciones y recomendaciones</i>	51
4.1.	Conclusiones	51
4.2.	Observaciones	52
4.3.	Recomendaciones	52

Índice de figuras

Figura 1-1: Área de porte de la subcuenca del río Tarqui.....	15
Figura 2-1: Ríos de aporte a la subcuenca del Río Tarqui.....	20
Figura 2-2: Discontinuidad en las curvas de descarga	23
Figura 2-3: Ubicación de estaciones meteorológicas	23
Figura 2-4: Serie más extensa en el registro hidrológico	24
Figura 2-5: Distribución espacial de las estaciones	24
Figura 2-6: Ejemplo curva de doble masa	26
Figura 2-7: Recta producida por el logaritmo de las observaciones.....	27
Figura 2-8: Ejemplo de problemas en el registro	27
Figura 2-9: Ejemplo de raíces en los modelos.....	28
Figura 2-10: Filtro de frecuencias	28
Figura 2-11: Ejemplo de comparación de datos corregidos	29
Figura 2-12: Ejemplo de variación de parámetros	32
Figura 2-13: Ejemplo de grafica estado dependiente.....	34
Figura 2-14: Ejemplo recesión de un coeficiente	35
Figura 2-15: Zona de análisis de inundación	36
Figura 2-16: Mapa de pendientes.....	36
Figura 2-17: Ruta de flujo	37
Figura 2-18: Mapa de cobertura vegetal.....	37
Figura 3-1: Serie de precipitación y caudal.....	39
Figura 3-2: Curvas doble masa	41

Figura 3-3: Curva de descarga corregida	42
Figura 3-4: Comparación entre serie corregida y serie filtrada	42
Figura 3-5: Serie observada y serie simulada	46
Figura 3-6: Curvas de precipitación efectiva.....	47
Figura 3-7: Variación del coeficiente de un reservorio	47
Figura 3-8: Modelo de inundación de condiciones antecedentes	50

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de series de datos crudos de PROMAS-Universidad de cuenca.....	22
Tabla 2: Resumen de series de datos crudos de ETAPA EP	22
Tabla 3: Criterio de selección Nash-Sutcliffe	33
Tabla 4: Ejemplo tabla resumen de coeficientes de rugosidad	38
Tabla 5: Tabla resumen de las 20 mejores formas del modelo	43
Tabla 6: Resultados de validación one step ahead	45
Tabla 7: Indicadores según el modelo	48
Tabla 8: Resumen del tiempo de recesión de los modelos	48
Tabla 9: Precipitaciones de diseño	49
Tabla 10: Tabla resumen de los caudales de riesgo	49

Lista de ecuaciones

Ecuación 1: Curva de descarga para niveles menores a 120 cm	22
Ecuación 2: Curva de descarga para niveles mayores a 120 cm	22
Ecuación 3: Función de transferencia del modelo DBM	29
Ecuación 4: Función parámetro dependiente del modelo.....	29
Ecuación 5: Coeficiente Nash-Sutcliffe	33
Ecuación 6: Constante de proporcionalidad física	34
Ecuación 7: Tiempo de recesión.....	35
Ecuación 8: Curva de descarga para niveles menores a 120 cm	41
Ecuación 9: Curva de descarga para niveles mayores a 120 cm	41
Ecuación 10: Forma estado dependiente del modelo 114.....	44
Ecuación 11: Forma estado dependiente del modelo 221.....	44
Ecuación 12: Forma estado dependiente del modelo 314.....	44
Ecuación 13: Constante de recesión del reservorio del modelo 114	44
Ecuación 14: Modelo 114	45
Ecuación 15: Modelo 221	45
Ecuación 16: Modelo 314	45

Lista de símbolos

Ecuaciones

- a_n : coeficientes de las condiciones antecedentes de flujo
- b_m : Coeficientes de las condiciones antecedentes de precipitación
- c : Constante de proporcionalidad física
- H : Nivel de caudal en cm
- Lag: Tiempo de retraso en el modelo en horas
- p_t : Precipitación en mm/h
- Q : Caudal en m³/s
- $\bar{Q}$: Caudal promedio de la serie en mm
- Q_i : Caudal observado en mm
- $Q_{sim,i}$: Caudal simulado en mm
- q_t : Caudal en mm
- q_{t-1} : Caudal una hora atrás en mm
- q_{t-2} : Caudal dos horas atrás en mm
- q_{t-3} : Caudal tres horas atrás en mm
- r_n : Raíz del polinomio del denominador
- T : Tiempo de recesión
- u_{t-lag} : Precipitación efectiva considerando el lag del modelo
- z : Operador de tiempo atrás en la función de transferencia

Acrónimos

AIC: Coeficiente de Akaike

DBM: Data Based Mechanistic – Mecanístico basado en datos

DHR: Dynamic Harmonic Regression – Regresión armónica dinámica

MISO: Multi-Input, Single Output – Varias entradas, salida única

PG: Estación de pluviógrafo

PQ: Estación de vertedero

RIV: Refined Instrumental Variable - Variable instrumental refinada

RIVID: Identification Refined Instrumental Variable - Variable instrumental refinada de identificación

SDP: State dependent parameter – Parámetro estado dependiente

YIC: Coeficiente de Young

Dedicatoria

A mis padres, por su apoyo incondicional, su cariño y los valores que me han hecho la persona que soy, y por guiarme en saber la clase de persona que quiero ser.

A mis hermanos, por su cariño y paciencia; siempre apoyándonos y mejorando día a día.

A mi pareja, por todo el tiempo compartido, por tu cariño, por siempre inspirarme, escucharme y apoyarme.

A mis amigos, por haber crecido juntos y siempre ser un apoyo mutuo en los caminos que elegimos.

A quienes ya no están, pero siempre los llevo en mi corazón, con el cariño de lo compartido y el amor por lo que aprendí de ellos.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Cuenca y, en especial, los docentes de la facultad de ingeniería, por su educación excepcional y por brindarme el espacio para desarrollarme.

A mis tutores, ing. Diego Mora, por su motivación a realizar este tema y el apoyo en la planeación y solución del problema, y al ing. Daniel Mendoza, por guiarme en la investigación y aconsejarme en su desarrollo.

A *PROMAS* y *ETAPA EP*, por facilitarme la información necesaria para este trabajo. Sin su apoyo, no hubiera sido posible realizarlo.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La subcuenca del río Tarqui pertenece a la cuenca del río Paute; fluye hacia el norte antes de unirse con el río Yanuncay en el suroeste de la ciudad de Cuenca. La subcuenca tiene un área de 476.3 km², con su punto más alto a 3700 msnm y su punto más bajo a 2600 msnm. Posee una geomorfología que incluye colinas medianas, relieves escarpados, relieves montañosos y algunas zonas con superficie de aplanamiento, así como vertientes convexas, cóncavas e irregulares (Cajamarca, 2022).

Dentro del área de aporte de la subcuenca del río Tarqui se encuentran diversas comunidades, como muestra la *Figura 1-1*. El flujo nace en la parte alta de los páramos de Cumbe y Victoria del Portete, integrando el flujo de los ríos Portete, Irquis, San Agustín, Cumbe y Zhucay, además de pequeñas lagunas en la parte alta de la cuenca. Luego, fluye hacia el suroeste de la ciudad de Cuenca, donde, tras ser vertido sobre el río Yanuncay, formando parte de este (Cajamarca, 2022).

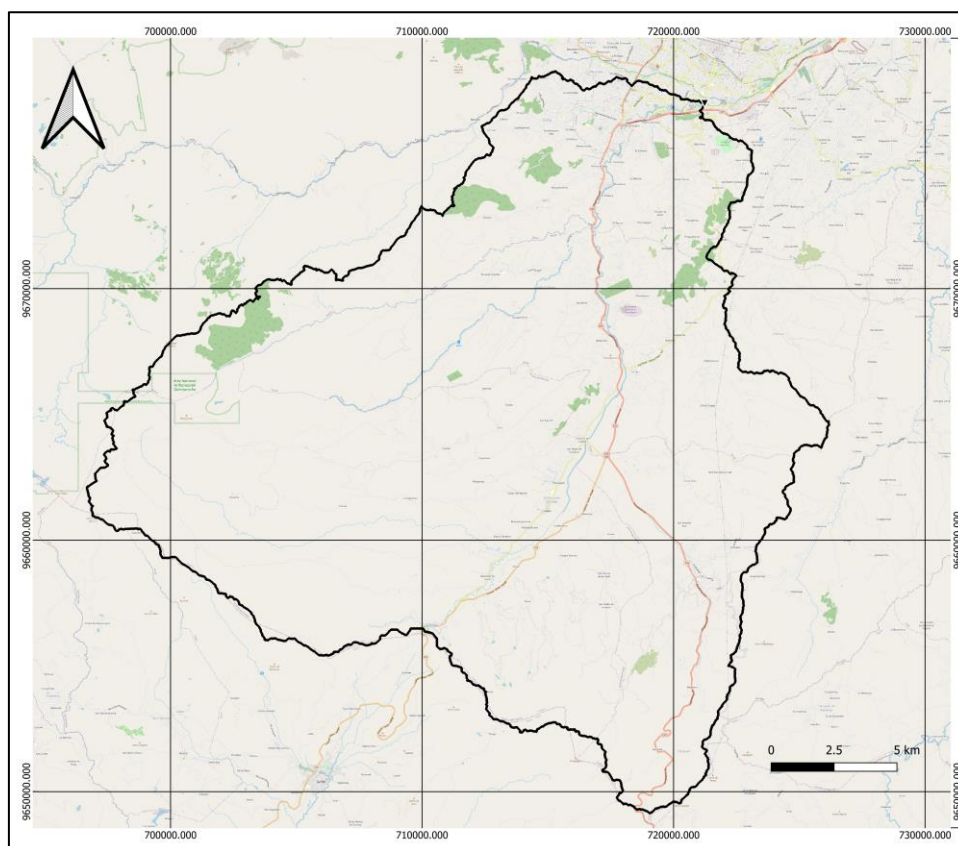


Figura 1-1: Área de porte de la subcuenca del río Tarqui

La subcuenca del río Tarqui presenta zonas de alta y muy alta amenaza de inundación (SNGR, 2011). Considerando que el caudal base se mantiene entre 4 y 5 m³/s, y que se considera como umbral de riesgo como caudal de desbordamiento los 90 m³/s (El Universo, 2011), se pueden destacar eventos como el de mayo de 2021, cuando, se alcanzó un máximo histórico de 328.4 m³/s, el más alto registrado en los últimos 30 años (Sánchez & Velesaca, 2021). Este evento ocasionó la evacuación de al menos 50 personas damnificadas. Sin embargo, este no es un evento aislado. En 2010 alcanzó un caudal de 200 m³/s y se registraron caudales máximos en 1999, 2000, 2006, 2007, 2008, 2011, 2012, 2013 y 2015 que también superaron los 90 m³/s (Cajamarca, 2022). Dichos caudales ocasionaron innumerables daños a la población. Así pues, bajo tal consideración, se puede comprender la designación como zona de riesgo alta y muy alta, ya que en 12 de los últimos 25 años se registraron caudales mayores al de desbordamiento.

La Secretaría de Gestión de Riesgos determinó que la protección de las comunidades asentadas en zonas de riesgo es un trabajo en conjunto entre los entes públicos y la academia. La academia debe abordar los problemas de sus realidades cercanas; de esta forma, el proyecto busca generar una herramienta para disminuir las condiciones de riesgo existentes mediante medidas de prevención.

La reducción del riesgo de desastres busca evitar la generación de nuevos riesgos y disminuir las condiciones existentes, a través de la implementación de medidas de prevención y mitigación. Esto se logra desde un enfoque de gestión prospectiva que permita evitar la exposición o generación de nuevos riesgos tomando en consideración diferentes procesos como la reducción de la vulnerabilidad poblacional, protección de elementos esenciales y medios de vida y gestión de conocimiento para la reducción del riesgo, entre otros. La gestión de conocimiento para la reducción del riesgo se realiza mediante la vinculación de la academia, generando proyectos de investigación que permitan mitigar riesgos (SNGR S. , 2019).

Debido al riesgo existente en la subcuenca del Río Tarqui, hay un interés en el monitoreo por parte de instituciones públicas, a través de ETAPA E.P., quien realiza monitoreos hidrometeorológicos en la región, y de la Universidad de Cuenca, a través de PROMAS, con proyectos de investigación científica sobre el manejo, la calidad y la gestión del recurso hídrico.

Con la información generada por dicha cooperación, se han realizado diversas investigaciones que establecieron que las crecidas más fuertes no correspondieron a precipitaciones extraordinarias inmediatas. En cambio, el análisis de hidrogramas reveló un

aumento en el caudal días antes del evento. Es por este motivo, que la determinación de caudales antecedentes, así como las precipitaciones antecedentes son importantes para el entendimiento de los eventos de máximas avenidas de caudal.

Para caracterizar caudales antecedentes, es importante identificar volúmenes acumulados en períodos de lluvia. En un estudio realizado por Vallejo, 2014 se logró identificar volúmenes de precipitación antecedente de 124 mm durante 21 días, o 70 mm durante 7 días, además de mostrar que las crecidas ocurrieron durante los meses de febrero, abril y mayo. Otros estudios determinaron acumulaciones de 22.5 mm durante 5 días y 34.75 mm durante 10 días, indicando que los meses más propensos son abril y febrero (Naranjo, 2018).

Para simular tales eventos, se modela el evento lluvia-escorrentía, de manera que identifique el comportamiento del sistema hidrológico de la cuenca y así se puede obtener mejores predicciones. Existen tres tipos de modelos: el modelo basado en datos, también llamado modelo de caja negra, que usa conceptos matemáticos y estadísticos para asociar la precipitación y la escorrentía como entrada y salida en el sistema hidrológico; el modelo basado en descripciones del proceso, también llamado de caja blanca, que representa los procesos físicos observados; y el modelo mixto, también llamado modelo de caja gris, que representa la entrada y salida dándole una explicación física (Morales & Sánchez, 2010).

1.2. Justificación

La subcuenca del Río Tarqui tiene un historial significativo de desastres. Por ello, existen varias investigaciones que analizan las características hidrológicas de la cuenca. Sin embargo, estas investigaciones se ven limitadas por la forma de modelar los eventos de la cuenca. Al establecer las acumulaciones y sus períodos críticos como valores fijos, se dificulta la implementación de sistemas de alerta de riesgo y de alerta temprana para futuros estudios. Esto se debe a la necesidad de considerar las diferentes acumulaciones de precipitación que pueden ocurrir en distintos períodos e identificar cómo podría reaccionar la cuenca ante tales condiciones antecedentes.

Esto sugiere adoptar un enfoque dinámico para la caracterización de los umbrales. Entonces, el problema podría resolverse mediante un modelo basado en datos de forma lluvia-escorrentía, donde se correlacionan mediciones de lluvia con mediciones de caudal para pronosticar el caudal subsiguiente (Young, 2011). La selección del modelo puede ser un trabajo engorroso y extenso, ya que cada metodología presenta beneficios y dificultades en su aplicación. Sin embargo, debido al enfoque dinámico para los umbrales, un modelo basado en datos parece ser el más óptimo.

El modelo DBM combina las características de un modelo conceptual con un modelo basado en datos. De esta manera, se sugiere que su estructura sea capaz de adaptarse a los datos de las cuencas de estudio, permitiendo incluso una interpretación física en función de la descomposición de la función de transferencia. En consecuencia, si se dispone de un período adecuado de registros, el sistema DBM podría utilizarse como una herramienta confiable para diferentes análisis (Quichimbo, Vázquez, & Samaniego, 2013). Debido a las limitadas series continuas de datos de precipitación y caudal, se asume que el modelo DBM será la herramienta óptima. Existen casos de estudio donde, con un año de información continua en una cuenca de 1944 km², se implementa un sistema de asimilación de datos y predicción adaptativa (Young, 2011). Por lo tanto, esta investigación podría significar un punto de partida para la implementación de este sofisticado sistema de gestión de riesgos en la subcuenca del río Tarqui.

Las aptitudes del modelo DBM, además de las posibles aplicaciones futuras, son convenientes porque genera una medición indirecta de la humedad de la cuenca. Es en este parámetro donde se reflejan las condiciones antecedentes de caudal. Al generar esta medición indirecta, se pueden simular las diferentes respuestas que la cuenca puede tener bajo distintas condiciones de humedad. Finalmente, con tal aplicación, se lograría generar umbrales de riesgo para una precipitación en función del caudal antecedente y, con el modelo, se podrán determinar las condiciones de riesgo junto a los caudales ocasionados. Sin embargo, tales caudales se validarán en función del área de inundación, para cuantificar el posible daño ocasionado.

1.3. Alcance

La investigación se limita espacialmente al área de la subcuenca del río Tarqui y temporalmente a las series históricas de precipitación y caudal que cumplen con el control de calidad descrito en el capítulo siguiente. Además, se empleará un modelo lluvia-escorrentía basado en datos tal que simule las condiciones de caudal y precipitación que generan los eventos críticos en diferentes tiempos atrás. Luego, tras la validación de dichos modelos se identificarán las abstracciones físicas que generan la máxima respuesta de la cuenca, con lo que se determinaran los indicadores como umbrales a partir de los cuales existirá dicho fenómeno. Finalmente, un modelo de inundación calibrado con información recolectada, tal que simule un caudal generado por el modelo lluvia-escorrentía con los indicadores de riesgo y una precipitación de cierto periodo de retorno, mostrando así el cambio ocasionado por el evento de precipitación.

1.4. Pregunta de investigación

¿Cuáles son las condiciones hidrológicas de caudal para la máxima respuesta a un evento de precipitación en la subcuenca del Río Tarqui?

1.5. Hipótesis

Las condiciones hidrológicas de caudal estarán representadas mediante el análisis estado dependiente del modelo DBM, de forma que mediante sus abstracciones físicas se podrá determinar los indicadores de riesgo.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Determinar indicadores hidrológicos de caudal de inundación la subcuenca del río Tarqui con el propósito de fortalecer la gestión de riesgos.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Recopilar, clasificar y tratar series de datos de precipitación y caudal de la subcuenca del río Tarqui identificando patrones estacionales y eventos extremos
2. Calibrar y validar un modelo de datos lluvia-escorrentía para la subcuenca del río Tarqui y analizar las condiciones hidrológicas determinadas por el modelo
3. Identificar caudales de riesgo según el registro de eventos extremos y diversas condiciones hidrológicas de la cuenca
4. Desarrollar indicadores de alerta de prevención según el tamaño de huella de inundación de los caudales de riesgo

Capítulo 2

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La subcuenca del Río Tarqui situada en la provincia del Azuay tiene un área aproximada de 475 km². Como muestra la *Figura 2-1*; está formada por las subcuencas de los ríos Portete, Irquis, Cumbe y Zhucay.

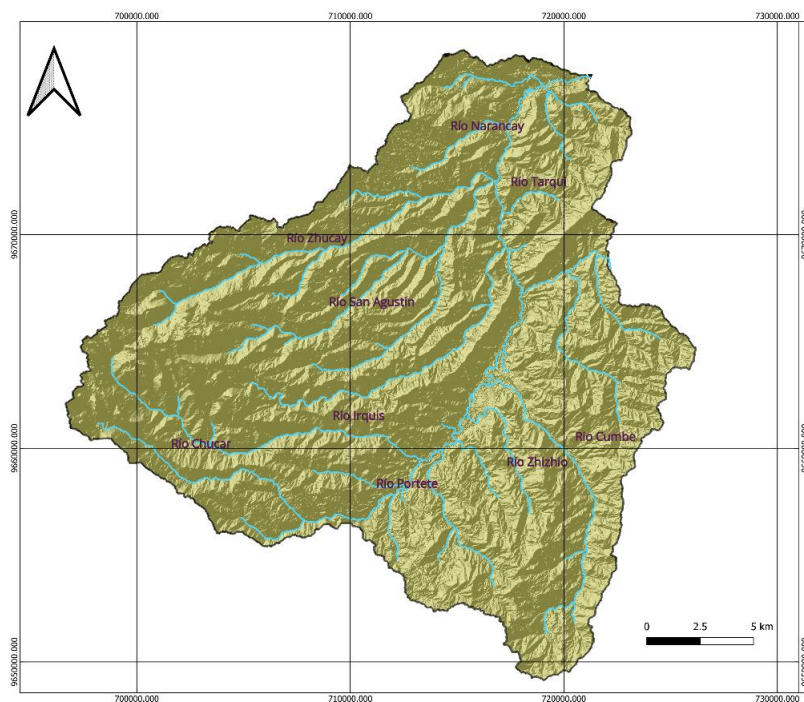


Figura 2-1: Ríos de aporte a la subcuenca del Río Tarqui

El flujo estará condicionado por diferentes eventos y condiciones de la cuenca; sin embargo, se pueden describir algunas características que influyen en la capacidad hídrica de la cuenca. Destaca el caudal pico más alto registrado en 2021, con un caudal de 328 m³/s (Sánchez & Velesaca, 2021). Asimismo, el caudal promedio se mantiene en 3.21 m³/s. La pendiente promedio, a pesar de las variaciones geomorfológicas, se establece en un 2.2%. La cuenca alcanza su punto más elevado a 3920 msnm, reflejo de su zona montañosa, mientras que su punto más bajo se encuentra a 2520 msnm. Es importante mencionar el uso de suelos de la zona, ya que, al ser una zona agrícola y ganadera, hay grandes áreas destinadas a la agro producción, lo que puede resultar perjudicial para las características hídricas de la cuenca (Vallejo , 2014). Finalmente, se tienen registros de precipitaciones máximas en 24 horas, registradas desde el año 1997 hasta 2016, con un promedio de 33.6 mm y un promedio anual de 825.5 mm (Cajamarca , 2022)

Además, la cuenca tiene áreas que pertenecen a zonas altoandinas, las cuales se caracterizan por tener bajas temperaturas durante gran parte del año, con heladas durante la noche y épocas secas que se extienden entre junio y agosto. También mantiene un régimen de humedad entre húmedo y subhúmedo, lo cual se describe junto a su temperatura, que se mantiene con un promedio diario de 7 °C a 12 °C (Palma & Eduardo , 2012).

Otra condición importante que resaltar es la geología, que consiste principalmente en rocas sedimentarias y volcánicas de las eras Mioceno superior y Pleistoceno inferior, junto con sedimentos no consolidados fluviales y glaciares del Pleistoceno inferior hasta la época actual (Vanacker, 2007).

2.2. Base de datos

2.2.1. Fuente de los datos

Para simular el fenómeno lluvia-escorrentía, los modelos basados en datos requieren información continua del mayor período posible y con la mejor cobertura espacial. Esta información debe ser validada mediante un control de calidad, que se detalla más adelante.

Las entidades que proporcionan la información son el Programa de Manejo de Agua y Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, que mantiene diversas estaciones de monitoreo hidrometeorológico en la región, y la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (ETAPA EP), con su red de monitoreo de los cuatro ríos de la ciudad de Cuenca: Tomebamba, Machángara, Tarqui y Yanuncay. PROMAS dispuso series de datos de precipitación con monitoreo automático y registro cada 0.2 mm, mientras que ETAPA EP dispuso series de datos de precipitación y niveles, ambas con monitoreo automático y registro cada 5 minutos.

2.2.2. Descripción de las series

Los datos crudos provistos cambian en relación a la variable que miden y según el instrumento que usa cada institución por lo que previo a la acumulación, tratamiento y control de calidad se ordena para verificar su distribución espacial y temporal.

2.2.2.1. Estaciones de monitoreo PROMAS-Universidad de Cuenca

A continuación, en la *Tabla 1* se presenta un resumen de la información de las estaciones de monitoreo ubicadas en la subcuenca del Río Tarqui. Estas series de pluviógrafo (PG) pertenecen a una red de monitoreo automático con registro en escala volumétrica por acumulación de 0.2 mm de lluvia. Las estaciones se encuentran ubicadas por coordenadas WGS84 UTM en la zona 17S y con cotas en msnm. Además, se incluyen las fechas de inicio y final del registro de datos.

Tabla 1: Resumen de series de datos crudos de PROMAS-Universidad de Cuenca

Estación	UTM x	UTM y	Cota	Tipo	Inicio registro	Fin registro
Cumbe alto	718689	9649644	3421	PG	7-mar-17	24-nov-20
Cumbe medio	720497	9653409	3009	PG	5-dic-17	11-dic-22
Cumbe bajo	719183	9661487	2662	PG	5-dic-17	10-dic-22
Portete	703530	9658960	2915	PG	14-jul-17	19-dic-20
Calluancay	698052	9661468	3735	PG	26-oct-06	18-oct-16
Baños	714362	9673997	2600	PG	17-oct-05	13-mar-13

2.2.2.2. Estaciones de monitoreo ETAPA EP

En la *Tabla 2* se presenta un resumen de la información de las estaciones de monitoreo ubicadas en la subcuenca del Río Tarqui. Estas series de pluviógrafo (PG) y vertedero (Q) pertenecen a una red de monitoreo automático con registro cada 5 minutos, que mide la cantidad de precipitación acumulada en mm y el nivel de agua en cm para la medición de caudales. Las estaciones se encuentran ubicadas según coordenadas WGS84 UTM en la zona 17S y con cotas en msnm. Además, se incluyen las fechas de inicio y final del registro de datos.

Tabla 2: Resumen de series de datos crudos de ETAPA EP

Estación	UTMx	UTM y	Cota	Tipo	Inicio registro	Fin registro
Tarqui D.J. Cumbe	716525	9663955	2630	PG	21-jul-97	7-abr-17
El Portete	712674	9653054	3174	PG	20-nov-97	18-oct-16
Narancay	714747	9678318	2773	PG	13-may-14	8-ene-23
Huizhil	716123	9675876	2728	PG	13-may-14	14-mar-23
Tarqui A.J. Yanuncay	721271	9677410	2528	PQ	19-jun-14	3-oct-23
Tarqui D.J. Cumbe	716525	9663955	2630	PQ	21-jul-97	9-sep-14

Junto a la serie de caudal se provee de una curva de descarga correspondiente a las mediciones realizadas, a continuación, se muestran tales ecuaciones donde la *Ecuación 1* tiene un R^2 de 0.876 y para la *Ecuación 2* un R^2 de 0.994.

$$Q = 0.107 * H - 8.5954$$

Ecuación 1: Curva de descarga para niveles menores a 120 cm

$$Q = 7.63569 \times 10^{-6} * (H - 26)^{3.01851}$$

Ecuación 2: Curva de descarga para niveles mayores a 120 cm

Sin embargo, como muestra la *Figura 2-2* el cambio en la curva de descarga genera una discontinuidad por lo que deben realizarse correcciones, las cuales se detallan más adelante.

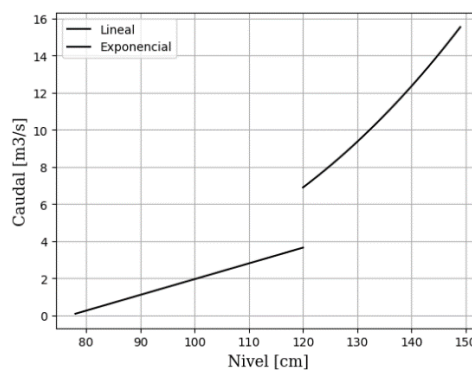


Figura 2-2: Discontinuidad en las curvas de descarga

2.2.3. Selección de estaciones y periodos de análisis

Para la selección de estaciones de precipitación se verificó la distribución espacial y temporal de las estaciones, ya que se requiere el mayor registro de información hidrológica y meteorológica para la correcta calibración del modelo.

2.2.3.1. Distribución espacial

Las estaciones antes descritas se muestran a continuación, destacando con color azul las estaciones pertenecientes a la red de monitoreo de PROMAS y con color rojo las de la red de ETAPA EP. Como se puede observar en la *Figura 2-3*, existen estaciones en diferentes zonas de la cuenca, siendo necesario contrastar su resolución temporal.

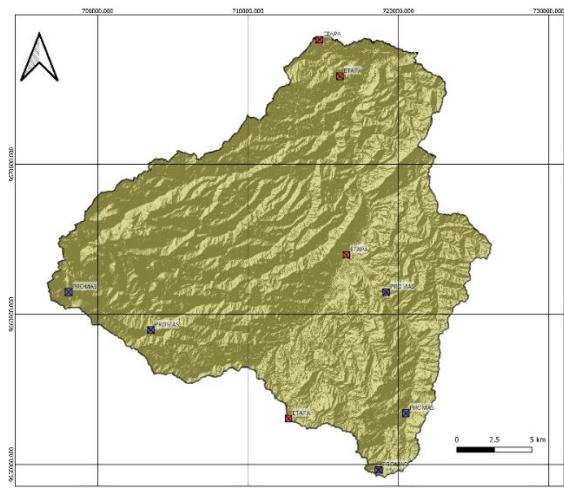


Figura 2-3: Ubicación de estaciones meteorológicas

2.2.3.2. Distribución temporal

Como muestra la *Tabla 2*, la estación hidrológica Tarqui AJ Yanuncay tiene registros entre los años 2014 y 2023. Sin embargo, existen vacíos de información en diversas temporadas, por lo que es necesario seleccionar el período más extenso. Como se muestra a continuación, el período comprendido entre mediados de mayo de 2015 y mediados de octubre de 2016

tiene una serie con tan solo 4 días de vacíos de información. Al ser la serie más extensa, este será el período para el cual se deberá validar la información meteorológica.

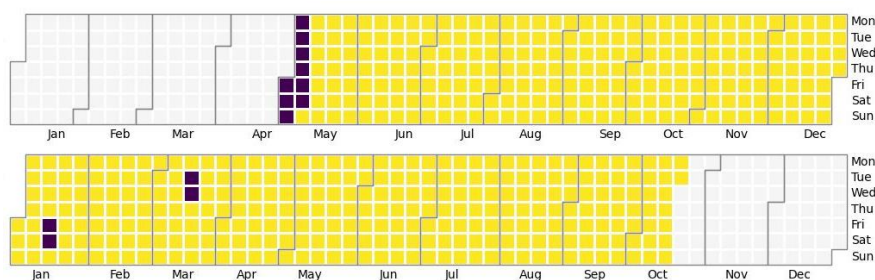


Figura 2-4: Serie más extensa en el registro hidrológico

2.2.3.3. Estaciones seleccionadas

Como muestran: *Tabla 1* y *Tabla 2* las estaciones que tienen información respecto al período antes mencionado son El Portete (A), Calluancay (B), Tarqui D.J. Cumbre (C), Narancay (D) y Huizhil (E). Estas comprenden el período entre el 10 de mayo de 2015 y el 18 de octubre de 2016.

Finalmente, mediante la metodología de polígonos de Thiessen se verifica la distribución espacial. Se muestra a continuación, cada estación tiene un área y una zona representativa en la cuenca, pero esta será validada mediante el control de calidad.

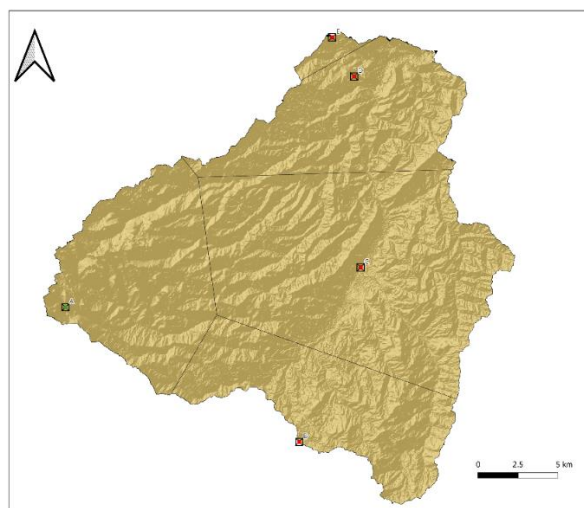


Figura 2-5: Distribución espacial de las estaciones

2.2.4. Control de calidad

El modelo requiere series continuas y homogéneas. Por ende, es necesario realizar un control de calidad a la información para identificar y rellenar vacíos, validar la homogeneidad entre

estaciones y verificar la continuidad en la tendencia del flujo. Este proceso permite detectar posibles errores de medición causados por daños en el equipo o mediciones incorrectas.

2.2.4.1. *Rellenado de datos*

Al trabajar con un modelo basado en datos, los vacíos de información dificultan la implementación de estos sistemas, por lo que tales vacíos deben ser rellenados usando las alternativas más eficientes para caudal o precipitación, como el método de factor de perturbación cuantil y el método de la curva de doble masa.

2.2.4.1.1. Método del factor de perturbación cuantil

Se optó por la metodología de Factor de perturbación cuantil en las series de datos de niveles de caudal ya que esta metodología consigue una gran precisión en el relleno de datos de eventos extremos (Mora, Wyseure, & Willems, 2014).

Este método se aplica para el relleno de datos de niveles, ya que se ajusta a los requerimientos de la metodología. Además, los datos a ser rellenados representan el 0.62% de la serie. La metodología del factor de perturbación cuantil genera la estimación de niveles altos, basada en:

- i. Identificar la estación con mayor correlación.
- ii. Selección y clasificación de las estaciones según qué tan significativa es su correlación.
- iii. Relleno de vacíos con la correlación significativa más alta.
- iv. Aplicar un factor de corrección basado en la diferencia de la distribución empírica mensual entre las estaciones.

Lo más novedoso de esta metodología se refiere al factor de corrección basado en el cuantil, calculado como el cociente de los valores con el mismo cuantil para el valor relleno. De esta forma, las perturbaciones nombradas hacen referencia a los cambios relativos entre las series (Mora, Wyseure, & Willems, 2014).

2.2.4.1.2. Método de la curva de acumulación

Esta metodología, además de servir para el relleno de datos, funciona para verificar la homogeneidad de los datos y asegurar que no existan anomalías en algún período. Por lo tanto, se utilizó también para las series de precipitación (Organización Meteorológica Mundial, 2018).

Se generan curvas de acumulación entre las estaciones de las que se lleva registros. En el caso que la información tenga buena correlación, se obtendrá una recta con el coeficiente de correlación cercano a uno (Carrera & Guevara, 2016). Identificando zonas con buena

correlación entre estaciones se pueden rellenar datos según la información de las otras estaciones.

2.2.4.2. Verificación de tendencia de las estaciones

Como parte del control de calidad, es necesario identificar posibles errores ocurridos durante las mediciones, por lo que se requiere un análisis de consistencia. Este análisis sirve para identificar y corregir cambios en la ubicación del instrumento de medición, cambios en la técnica e incluso errores instrumentales o de lectura. Detectar tales cambios es esencial, ya que los modelos simulan los cambios de tendencia meteorológica y la realización de las observaciones. Para esto, se optó por el método de la curva de doble masa, que se basa en que los valores acumulados del promedio de la precipitación no se ven afectados por un cambio en las estaciones individuales, ya que existe una compensación entre ellas (Arumi , Jara , & Salgado , 2000).

El método consiste en ubicar en el eje de las abscisas la suma acumulada de la estación con la que se compara y, en el eje de las ordenadas, la suma acumulada de la estación de estudio. Como muestra la *Figura 2-6*, esto podría resultar en una línea recta, lo que indicaría que no ha habido cambios en los métodos de observación. Sin embargo, si no es recta o existe un cambio de tendencia, se deberá realizar el ajuste respectivo.

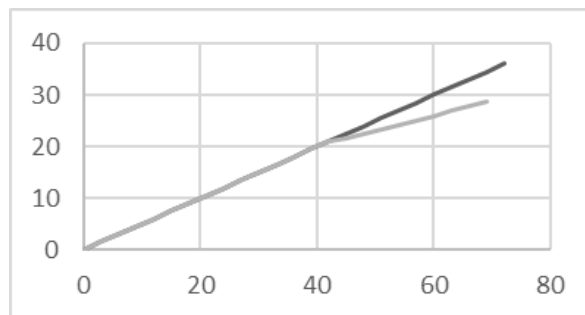


Figura 2-6: Ejemplo curva de doble masa

Para identificar posibles errores de tendencia en los registros de cada estación, se valida mediante las curvas de doble masa con cada estación. Se rectifica en función de los registros de otras estaciones junto a la cercanía de estas. Tras realizar dicha identificación, los datos son corregidos con los registros de otras estaciones.

2.2.4.3. Corrección en la curva de descarga

Como se mencionó, la curva de descarga genera diversos problemas, ya que al no ser continua no se puede realizar una inspección visual de la tendencia del flujo, lo que imposibilita la identificación de errores de medición. Por lo tanto, es necesario eliminar la discontinuidad.

Para corregir la curva, se utilizan los datos registrados para formar una ecuación lineal. Luego, se generan observaciones sintéticas mediante una ecuación exponencial. Dado que las observaciones de niveles inferiores a 120 tienen variaciones muy pequeñas, la curva exponencial estará muy sesgada por las observaciones sintéticas. Por lo tanto, como muestra la *Figura 2-7*, aplicando logaritmos a las observaciones se determina la pendiente y la intersección de la recta, que serán los parámetros que mejor ajusten la curva sin discontinuidad.

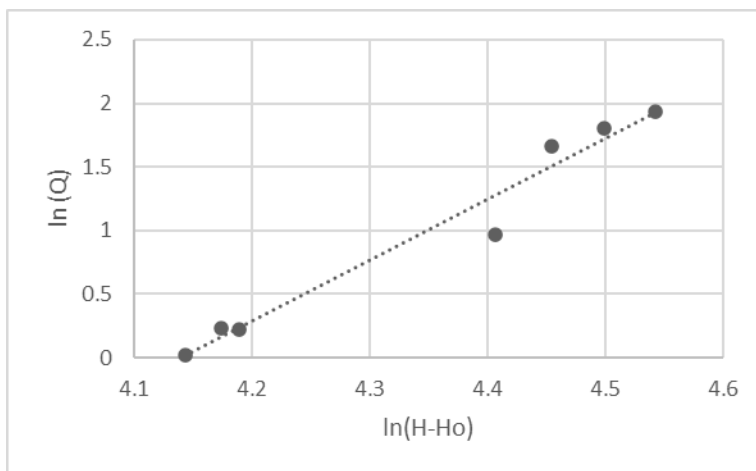


Figura 2-7: Recta producida por el logaritmo de las observaciones

2.2.4.4. Corrección de datos

Tras realizar las correcciones en el control de calidad, se pudieron observar variaciones en los registros, como muestra la *Figura 2-8*. Aunque se mantiene la tendencia de recesión, hay variaciones significativas en breves períodos.

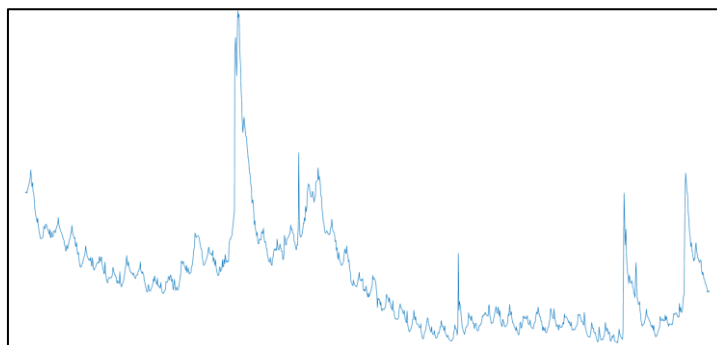


Figura 2-8: Ejemplo de problemas en el registro

Durante la fase de calibración del modelo, se constató la necesidad de solventar dichos errores, ya que, al realizar la identificación de la forma del modelo y la calibración de las diferentes opciones, los resultados de predictibilidad no eran eficientes. Además, tras verificar todos los modelos recomendados por la herramienta de identificación que consideran más de

un estado antecedente de caudal, las raíces de la función de transferencia, además de ser números complejos en ciertos casos, tenían al menos un valor mayor a uno. Esto significaría una incoherencia en la metodología del modelo. Por ejemplo, cómo podemos ver en la *Figura 2-9*, a la izquierda, el modelo 3-2-2 tiene raíces complejas y una de ellas es mayor a uno; de igual forma, el modelo 2-1-0 presenta una raíz mayor a uno.

<code>>> roots (aaa)</code>	<code>>> roots (aaa)</code>
<code>ans =</code>	<code>ans =</code>
<code>-1.2174 + 0.0000i</code>	<code>-1.1439</code>
<code>0.0724 + 0.1834i</code>	<code>0.0727</code>
<code>0.0724 - 0.1834i</code>	

Figura 2-9: Ejemplo de raíces en los modelos a) modelo 3-2-2 b) modelo 2-1-0

Entonces, como se mostró en la *Figura 2-10*, a medida que se reduce el flujo, las series tienen mayor ruido, lo cual se atribuye a la inestabilidad de los modelos. Por lo tanto, dada la necesidad de corregir la información, se optó por la herramienta de regresión armónica dinámica (DHR), la cual separa la serie en diferentes frecuencias (Bujosa , Garcia, & Young, 2010), permitiendo limpiar la información de recesión sin que se vean afectados los registros. Como se muestra a continuación en la *Figura 2-10*, se eliminan las frecuencias bajas, extrayendo así el ruido de las mediciones.

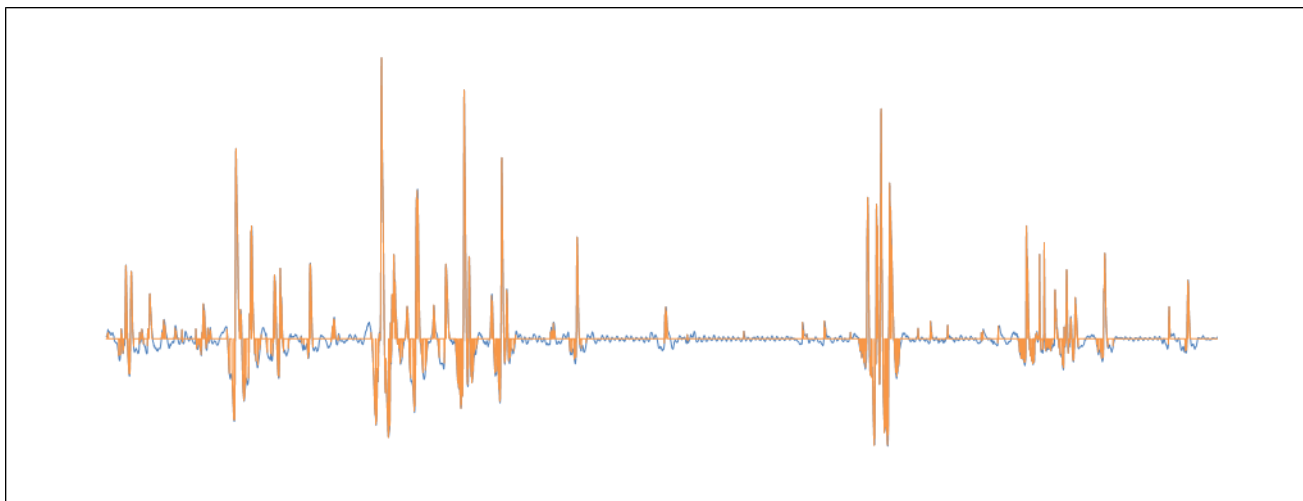


Figura 2-10: Filtro de frecuencias

Luego de realizar dicho proceso, se observó una mejora en los resultados de predictibilidad. Además, como se muestra en la *Figura 2-11*, la corrección de los datos mantiene el registro de los eventos extremos, pero disminuye el ruido de las mediciones.

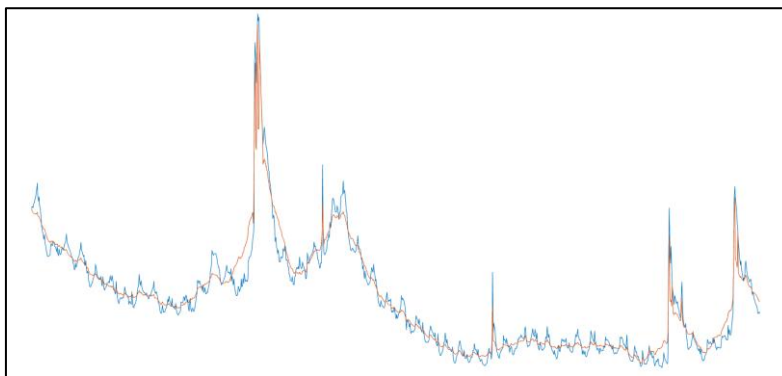


Figura 2-11: Ejemplo de comparación de datos corregidos

2.3. Modelo Data Based Mechanistic (DBM)

Como se mencionó, hubo investigaciones como (Naranjo, 2018) y (Vallejo, 2014) para determinar las condiciones de riesgo en eventos extremos, pero debido a la metodología, estas conclusiones se vieron limitadas. Por lo tanto, es necesario aplicar un modelo basado en datos que analice las condiciones antecedentes. Para esto, se considera el modelo DBM, que provee mediciones indirectas de las características de la cuenca mediante herramientas del parámetro estado dependiente, con las cuales se pueden interpretar los resultados y determinar las condiciones de riesgo.

El modelo DBM es un modelo basado en datos, comúnmente llamado de “caja gris”, donde los parámetros requieren calibración, ya que no pueden ser medidos directamente y requieren una interpretación física. Estos modelos representan los parámetros físicos tal como son observados, obteniendo abstracciones del conjunto de procesos (Morales & Sanchez, 2016).

El modelo está basado en las funciones de transferencia, como la *Ecuación 3* y *Ecuación 4*, en las cuales se describe el caudal predicho mediante el flujo antecedente, la ganancia de caudal mediante la lluvia y la precipitación efectiva descrita por una medición indirecta de la humedad del suelo. Aunque la ecuación tiene diversos valores, estos dependen de la calibración, ya que se deben probar diferentes formas hasta encontrar la que mejor describa la cuenca en términos de precipitación, caudal y el retraso para la respuesta hídrica de un fenómeno de precipitación (*lag*) (Young P., 2003).

$$q_t = \frac{b_0 + b_1 * z + \dots + b_m * z^m}{1 + a_1 * z + \dots + a_n * z^n} * u_{t-lag}$$

Ecuación 3: Función de transferencia del modelo DBM

$$u_{t-lag} = f(q_t) * p_{t-lag} * c$$

Ecuación 4: Función parámetro dependiente del modelo

Para la implementación del modelo se utiliza la herramienta *Captain Toolbox* (Young P., 2003), que son funciones de *Matlab* para el análisis de series de tiempo no estacionarias,

control y previsión. Este es un sistema de identificación, extracción de señales e interpolación. Esta herramienta tiene tres módulos, de los cuales, para la calibración se utiliza el módulo *RIVID*, que es una estimación optimizada para múltiples *inputs*, en tiempo discreto e híbrido en tiempo continuo y modelos de transferencia (Taylor, Pedregal, Young, & Tych, 2007). Además, se utiliza el módulo *TVPMOD*, que funciona para identificar componentes no observados del modelo, centrándose en parámetros estado-dependientes y tiempos variables del modelo (Taylor, Pedregal, Young, & Tych, 2007).

2.3.1. Calibración

Para la calibración del modelo se deben tener en cuenta diferentes consideraciones. Se utilizaron series de calidad diaria y horaria para el mismo período, sin embargo, estas dieron resultados distintos. La calibración del modelo consta de diferentes pasos, tales como identificar la forma del modelo, identificar los coeficientes de la ecuación, identificar la precipitación efectiva y, finalmente, en ciertos casos, identificar la constante de recesión de un reservorio lineal.

2.3.1.1. Forma del modelo

El modelo se basa en una función de transferencia de tipo MISO (*Multi-Input, Single Output*) con desplazamiento hacia atrás (Young P., 2011), es decir, es una función de transferencia con varias entradas en momentos anteriores de flujo y precipitación, pero una sola salida que será la predicción del caudal. La forma del modelo hace referencia al número óptimo de entradas para el modelo. Para identificar el modelo, se utilizó la función *RIVID* de *Captain*. Esta función requiere la serie de datos de flujo y precipitación, el rango de orden del modelo, los criterios de selección y un vector de parámetros adicionales (Taylor, Pedregal, Young, & Tych, 2007).

El rango de orden del modelo se refiere a las diferentes combinaciones que utiliza la función. En este caso, dado que el denominador hace referencia a los reservorios (*Buckets*), se recomienda usar un máximo de 3 por el sentido físico que describiría cada uno de ellos. (Young P., 2003)

Para el numerador, se probaron diferentes tiempos, pero los mejores resultados se obtuvieron con un máximo de 4. Respecto al *lag*, se consideraron hasta 4 tiempos atrás. Además, se analizó la forma de un reservorio con un tiempo de lluvia y sin *lag* como punto de partida (Beven, 2012).

Los modelos seleccionados son identificados mediante la descripción de tiempos atrás de caudal, precipitación y *lag* tienen de forma que por ejemplo un modelo 114, quiere decir que

este considera un modelo con un reservorio, un tiempo atrás de precipitación y cuatro tiempos atrás de lag.

La herramienta provee diversos criterios de selección, sin embargo, en este caso se da especial atención al coeficiente de Young (YIC) y al coeficiente de Akaike (AIC) (Young P. , 2003). Esto porque se precisa mantener una buena relación entre la predictibilidad con YIC y la interpretabilidad con AIC. Además, un vector de parámetros adicionales que es información que se le provee a la función, de forma que utiliza algoritmos de variable instrumental refinada y simplificada, o de variable instrumental refinada en función de los parámetros seleccionados. Finalmente, se obtienen las combinaciones más eficientes y se selecciona la forma en función de los criterios de selección antes mencionados.

2.3.1.2. Identificación de los parámetros del modelo

Tras identificar la forma del modelo, se realiza una primera aproximación de los coeficientes del modelo, eso se realiza mediante la herramienta *RIV*, la cual genera una estimación de un modelo de transferencia tipo MISO con desplazamiento hacia atrás, es decir considera un operador de retraso, donde la salida del sistema depende de las entradas en momentos anteriores y a su vez estos estarán relacionados a los coeficientes que se busca determinar (Beven, 2012).

La función *RIV* tiene solicitudes similares a las descritas anteriormente para la función de identificación, pero de las variables de salida provee los coeficientes estimados y la covarianza. Además, información como la serie simulada por los coeficientes estimados de las observaciones y los parámetros estadísticos de bondad de ajuste, que en este caso es el coeficiente R^2 .

2.3.1.3. Parámetros estado dependientes

Mediante el análisis de los parámetros estado-dependientes se implementa la parte física del modelo, determinando mediciones indirectas. Esta herramienta relaciona una condición antecedente de flujo o precipitación y la compara con la capacidad del suelo para generar escorrentía o recesión de un reservorio lineal, en función del parámetro que sea variado. Por medio de la función *SDP* de Captain, se realiza el modelado estado-dependiente no paramétrico mediante retro ajuste (Taylor , Pedregal, Young , & Tych , 2007).

Para la calibración de la función se utiliza como variable principal la serie de tiempo, los regresores que son las condiciones antecedentes de cada dato de la serie de tiempo, el estado del que depende los regresores como variable de remplazo a la humedad, el tipo de

modelo para los parámetros de tiempo variable y las restricciones de la relación ruido-varianza.

Para la precipitación efectiva, se utiliza la serie de caudal como serie de tiempo y los regresores como las series de caudal antecedente y precipitación antecedente, según la forma del modelo. Luego, el estado del que dependerá cada parámetro de los regresores será una serie de caudal antecedente. En el caso de la constante de recesión de un reservorio lineal, se utiliza como regresores las series de caudal antecedente y precipitación efectiva, según la forma del modelo. Para el tipo de modelo de los parámetros de tiempo variable, se tiene la opción de paso aleatorio o paso aleatorio integrado, seleccionando en función de cuál parámetro se hará variable. Para las restricciones de la relación ruido-varianza se opta por realizar una corrección aleatoria en un ajuste de dos pasos atrás.

Como se muestra a continuación en la *Figura 2-12*, el ejemplo es de un modelo 3-2, en el que se hace variar los parámetros de lluvia para encontrar la precipitación efectiva. El eje horizontal representa el estado en el que se encuentra la cuenca y el eje vertical el parámetro que mejor se ajusta a la serie de tiempo. Además, se pueden observar puntos azules de las primeras iteraciones y luego líneas grises con el reajuste de la curva, considerando la relación ruido-varianza y con un reordenamiento en relación a su estado.

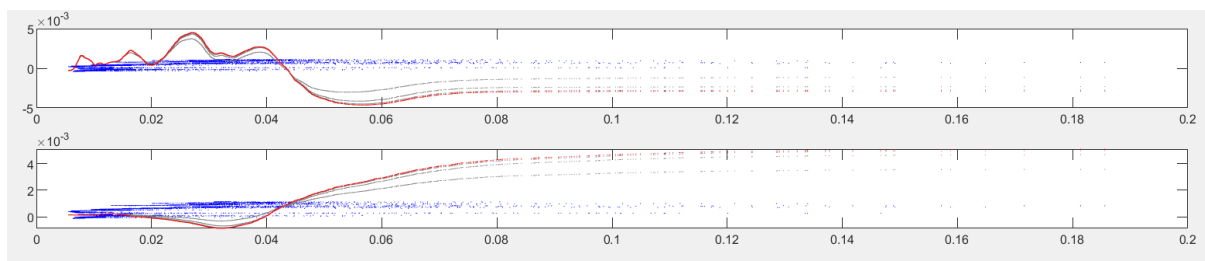


Figura 2-12: Ejemplo de variación de parámetros

La función provee diversos parámetros, como el modelo simulado, los parámetros estimados ordenados de menor a mayor y los estados ordenados de mayor a menor, por mencionar algunos. Entonces, con los estados ordenados se selecciona la curva que tenga una tendencia similar al comportamiento físico y se acopla a la serie de estados.

2.3.2. Validación

De la serie seleccionada, el modelo se calibra con el 70% de la serie y con el 30% restante se realiza la validación. La evaluación del rendimiento del modelo se realizó mediante el coeficiente de eficiencia *Nash-Sutcliffe*, el cual explica cuánta de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación (Beven, 2012). La ecuación mostrada a

continuación es el coeficiente, que relaciona por mínimos cuadrados el cambio entre el caudal simulado y la observación contra el cambio entre la observación y el caudal promedio.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Ecuación 5: Coeficiente Nash-Sutcliffe

La interpretación del coeficiente de eficiencia *Nash-Sutcliffe* considera un mejor ajuste cuanto más cercano a uno sea el valor. Para la selección, se opta por el criterio mostrado a continuación en la *Tabla 3*. Sin embargo, dado que el modelo depende del desplazamiento hacia atrás, se consideran dos series para la selección: una generada únicamente por el modelo y otra que simula la serie considerando los datos reales de la observación.

Tabla 3: Criterio de selección *Nash-Sutcliffe* (Molnar, 2011)

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

2.4. Caudales de riesgo y condiciones antecedentes

Los caudales de riesgo serán aquellos que ocasionan peligro de inundación, por lo cual se planteó cuantificar el riesgo de estos caudales en función del posible daño que ocasionarían. Para determinar los caudales, se comienza por identificar el caudal antecedente de riesgo, para luego contrastarlo con diversas precipitaciones.

Para la implementación de los modelos se trabajó con funciones estado dependientes, generando así variables de remplazo que cuantifican las abstracciones físicas del esquema matemático. Estas representaciones describen partes del fenómeno lluvia escorrentía, analizando la forma en que responde la cuenca a diversas condiciones. Se determinaron umbrales de máxima reacción de la cuenca, a partir de los cuales se desencadenarían eventos de inundación.

2.4.1. Precipitación efectiva

Como parte del modelo de la *Ecuación 4*, se describe la precipitación efectiva como el aprovechamiento de la precipitación según la función estado dependiente generada. Sin embargo, para la interpretación física del análisis, es necesario generar una constante c , la cual se muestra en la *Ecuación 6*. Esta es necesaria para que la precipitación efectiva no observada sea físicamente significativa en términos hidrológicos. Además, la inclusión de este parámetro no afectara el comportamiento entrada y salida del modelo, solo garantizara la sensibilidad física del mismo (Young P. , 2003). Al introducir el caudal como variable de remplazo, este representara la humedad o saturación de la cuenca.

$$c = \frac{\sum y_t}{\sum u_t}$$

Ecuación 6: Constante de proporcionalidad física

Tras incorporar la constante de proporcionalidad, el parámetro de estado se convierte en la descripción física de precipitación efectiva, como se observa en la *Figura 2-13*. Se definió como indicador de riesgo el punto a partir del cual se alcanza el máximo aprovechamiento de la precipitación. Es decir, analizando la curva, se establece el caudal en el que el aprovechamiento de la precipitación es máximo y constante.

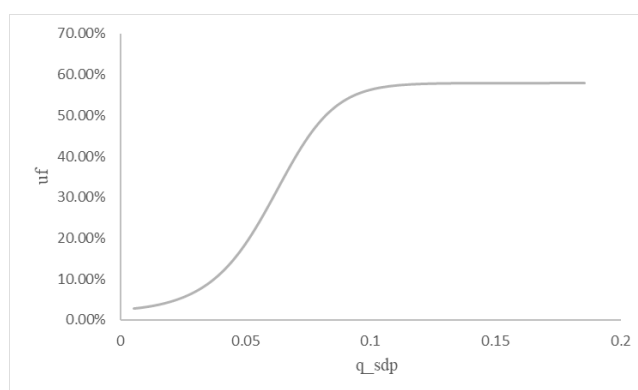


Figura 2-13: Ejemplo de grafica estado dependiente

2.4.2. Constante de recesión de un reservorio lineal

En el caso del modelo con un solo reservorio, se analiza el cambio de este en relación a la saturación del suelo, utilizando al caudal como serie de tiempo y como regresores el caudal antecedente y la precipitación efectiva correspondiente. Además, el estado de análisis para los regresores será una serie de caudal antecedente.

Considerando que cada tiempo atrás de caudal representaría un reservorio, en este caso, al ser un único reservorio, es necesario verificar el cambio del aporte de flujo con relación a la humedad del suelo. Con esto, se determina el caudal en el que se genera la recesión más corta y, por ende, un evento crítico. Como se puede observar en la *Figura 2-14*, el ejemplo muestra que, al aumentar el caudal, el coeficiente cambia de tal forma que el tiempo de recesión disminuirá. Por lo tanto, el indicador de riesgo representa el punto a partir del cual habrá una mayor descargar del reservorio (Young P. , 2003).

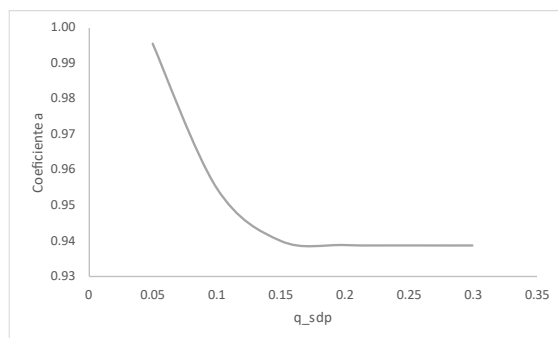


Figura 2-14: Ejemplo recesión de un coeficiente

Para determinar el tiempo recesión se determina mediante las raíces del polinomio del denominador ($r_1, r_2, \dots, r_n$), como muestra la *Ecuación 7*. Además, a medida que disminuye el coeficiente, el tiempo de recesión es menor.

$$T = \frac{1}{1 - r_n}$$

Ecuación 7: Tiempo de recesión

Incluso, el tiempo de recesión puede ser considerado como parte de los indicadores de riesgo, ya que representa un periodo en el que es necesario el monitoreo de la cuenca debido a la mayor descarga.

2.5. Revisión de caudales de riesgo

Finalmente, tras determinar los caudales de riesgo, el modelo requiere una precipitación antecedente para predecir el caudal que ocasionaría el evento de inundación. Para ello, se determinó la precipitación correspondiente a diferentes periodos de retorno utilizando la serie de precipitación seleccionada. Es importante mencionar que esta sección se vio muy limitada por la calidad temporal y espacial de los registros de precipitación. Utilizando los caudales de riesgo antes mencionados, se emplearon diferente precipitación de periodo de retorno para determinar caudales de inundación. Para cuantificar el riesgo que estos caudales representarían, se implementó un modelo de inundación que permitió modelar las áreas afectadas por los caudales.

2.5.1. Modelo de inundación

Dado que se trata de riesgo, es importante caracterizar el área de inundación en función del posible daño que podría ocasionar a la población. Por esto, se limita el área de análisis a las zonas con mayor densidad poblacional. Sin embargo, dado que el modelo se realiza con un vertedero anterior a la unión con el río Yanuncay, los caudales proyectados para poblados como victoria del Portete y Tarqui no serían precisos, ya que estarían sobredimensionado por el aporte de los ríos Zhucay, Cumbe, San Agustín y Portete. Por esta razón, la zona de análisis correspondería a la *Figura 2-15*, que muestra la zona mayor densidad urbana junto a la orilla y sin efluentes que sobredimensiones el área de inundación.

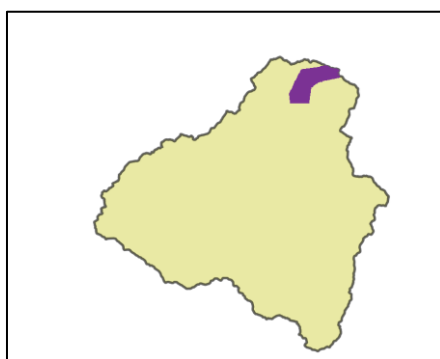


Figura 2-15: Zona de análisis de inundación

También se verificó, mediante el mapa de pendientes de la *Figura 2-16*, la forma que tendría el área de inundación. Sin embargo, como se puede observar, las zonas más cercanas al flujo pendientes ligeramente inclinadas.

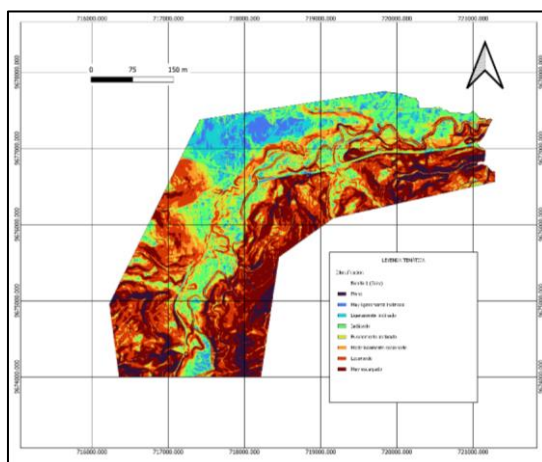


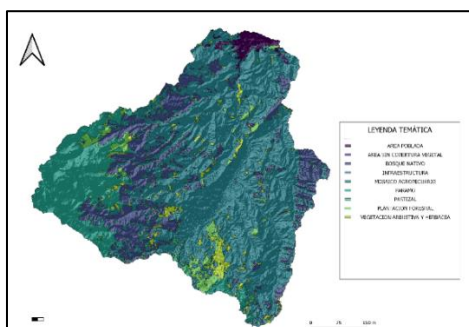
Figura 2-16: Mapa de pendientes

Para el modelo de inundación se optó por el programa HEC-RAS, ya que, junto con su complemento RIVER-GIS facilitará la implementación (Pasiok & Dębek, 2015). La información

2.5.1.1. Geometría del cauce

Figura 2-17: Ruta de flujo

Para la rugosidad del cauce se optó por utilizar el mapa de cobertura vegetal, como muestra la *Figura 2-18*. Con este se puede observar que, si bien la mayor parte de la cuenca tiene pastizales, la zona donde se analizara la inundación corresponde a su mayoría en área poblada. Sin embargo, una breve revisión de la zona permitiría clasificar fácilmente el material presente en el lecho del río.



Tras identificar el material presente en la zona del estudio, se define el coeficiente representativo para dicha zona área. Al contrastar con tablas, como la mostrada a

continuación, se determina el coeficiente generado, lo que permite establecer el área de inundación.

Tabla 4: Ejemplo tabla resumen de coeficientes de rugosidad (Moglen, 2015)

Natural streams	(1) Clean, straight banks, full stage no rifts or deep pools	0.025–0.033
	(2) Same as (1) but more weeds and stones	0.030–0.040
	(3) Winding, some pools, shoals, clean	0.033–0.045
	(4) Same as (3), lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040–0.055
	(5) Same as (3), some weeds and stones	0.035–0.050
	(6) Same as (4), stony sections	0.045–0.060
	(7) Sluggish reaches, rather weedy, very deep pools	0.050–0.080
	(8) Very weedy reaches	0.075–0.15

2.5.2. Caudales de riesgo

Tras realizar la calibración del modelo de inundación, se determinan diferentes caudales de riesgo generados por las condiciones de riesgo de caudal y una condición antecedente de precipitación. De esta forma, se tendrán diversos caudales a ser validados en el modelo de inundación. La precipitación de menor periodo de retorno que ocasione un área de inundación mayor será considerada como la de mayor riesgo.

Capítulo 3

3. Resultados y Discusión

3.1. Control de calidad

Tras identificar el periodo de análisis, se recopiló la información de precipitación y caudal. Como muestra la *Figura 3-1*, la serie de flujo refleja los cambios en la cuenca según los eventos de lluvia. Además, la serie mostrada será utilizada un 70% para la calibración del modelo y un 30 % para su validación.

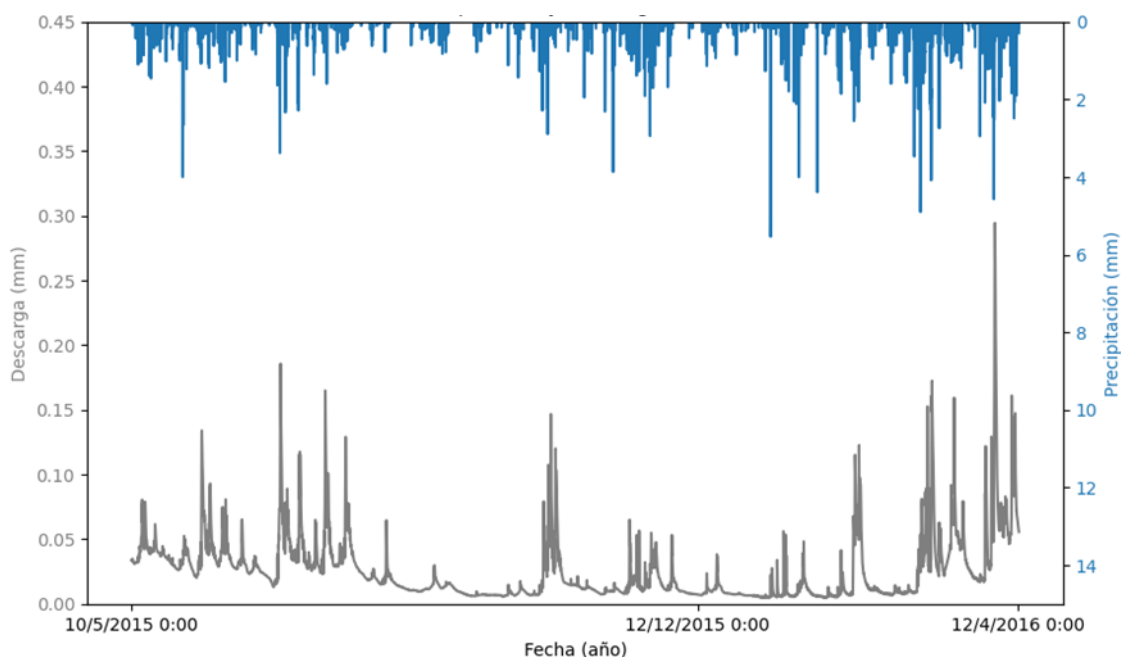


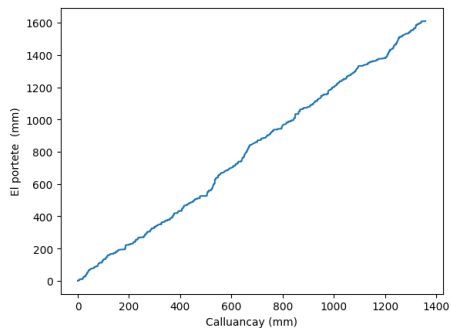
Figura 3-1: Serie de precipitación y caudal

Como parte de la calibración del modelo, es importante revisar la calidad de la información de entrada, ya que esto afectará la precisión del modelo. Por lo tanto, es necesario validar la calidad de las series de precipitación mediante curvas de doble masa y en las series de caudal corregir la curva de descarga y el filtrado.

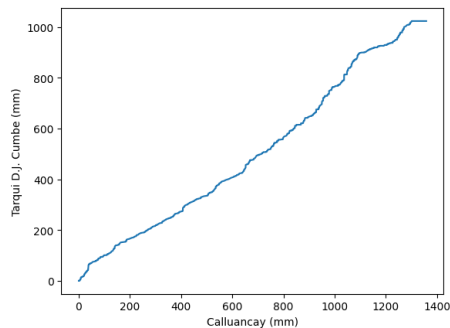
3.1.1. Serie de precipitación

Como se mencionó, la serie de precipitación está formada por diversas estaciones localizadas a lo largo de la cuenca de estudio, por lo que es necesario validar que los registros no hayan sido afectados de alguna forma. En la *Figura 3-2* se comparó la precipitación acumulada corregida de las estaciones de El Portete (EP), Calluancay (CAL), Tarqui D.J. Cumbe (TC), Huizhil (HZ) y Narancay (NA).

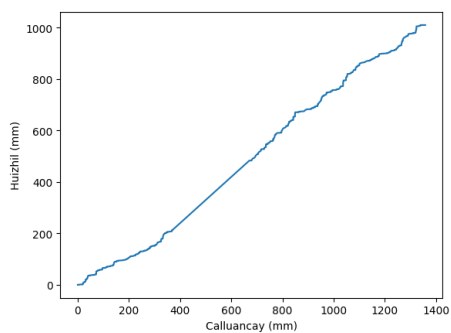
Como se puede observar en las diversas curvas tras realizar las correcciones en las series, donde se identificaron eventos que no se reflejan en estaciones cercanas, estas muestran un comportamiento acertado.



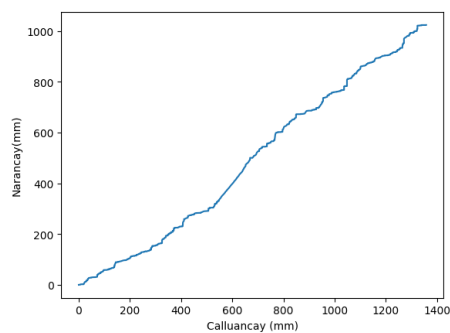
a.



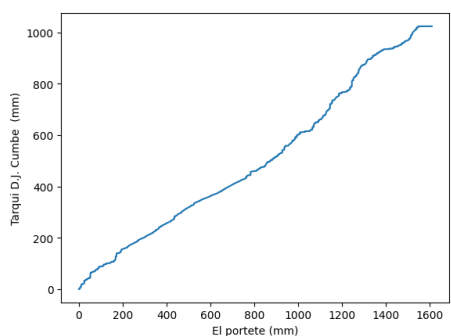
b.



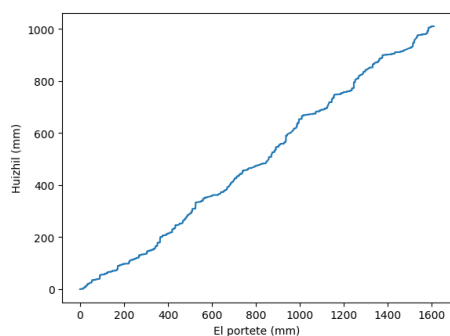
c.



d.



e.



f.

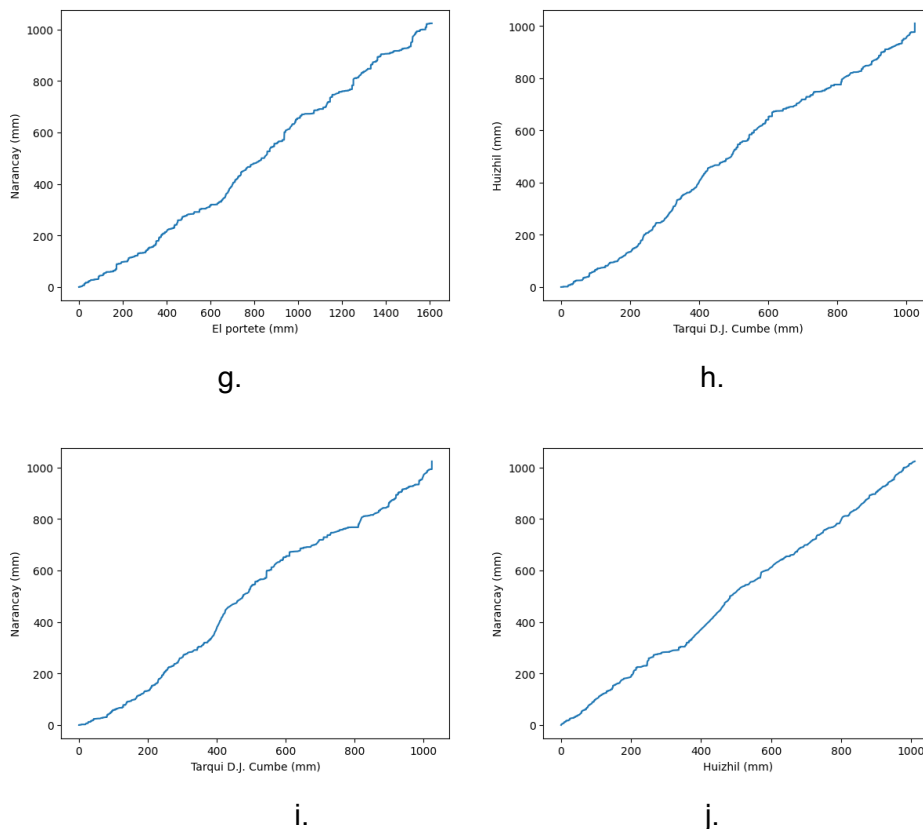


Figura 3-2: Curvas doble masa a. CAL-TC b. CAL-TC c. CAL-HZ d. CAL-NA
e. EP-TC f. EP-HZ g. EP-NA h. TC-HZ i. TC-NA j. HZ-NA

3.1.2. Serie de caudal

Para el tratamiento de la información de caudal, se comenzó por corregir la curva de descarga, ya que la presencia de discontinuidades representaría un inconveniente para la calibración del modelo. Tras realizar el procedimiento mencionado anteriormente, se generó la *Ecuación 8* para niveles inferiores a 120 cm y la *Ecuación 9* para niveles iguales o superiores a 120 cm. Además, se estableció un límite inferior de 26 cm, correspondiente a la altura mínima del sensor.

$$Q = 2.42662 \times 10^{-9} * (H - 26)^{4.7913}$$

Ecuación 8: Curva de descarga para
niveles menores a 120 cm

$$Q = 7.63569 \times 10^{-6} * (H - 26)^{3.01851}$$

Ecuación 9: Curva de descarga para
niveles mayores a 120 cm

Con dichas ecuaciones se corrige la forma de la curva de descarga, como se muestra en la *Figura 3-3*, de modo que se mantiene la forma potencial de la ecuación sin discontinuidades.

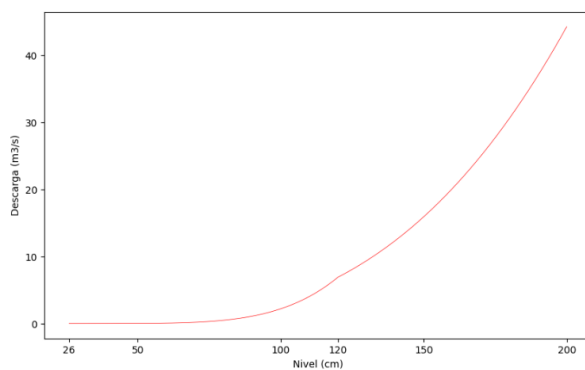


Figura 3-3: Curva de descarga corregida

Sin embargo, tras realizar la calibración con diversos modelos, estos resultaron inestables, por lo que se optó por filtrar la serie de caudal. Al disminuir el ruido de la serie, la identificación del modelo resultó ser más estable para la predicción. Como muestra la *Figura 3-4* existen cambios en la serie, pero se mantiene la representación de los eventos extremos.

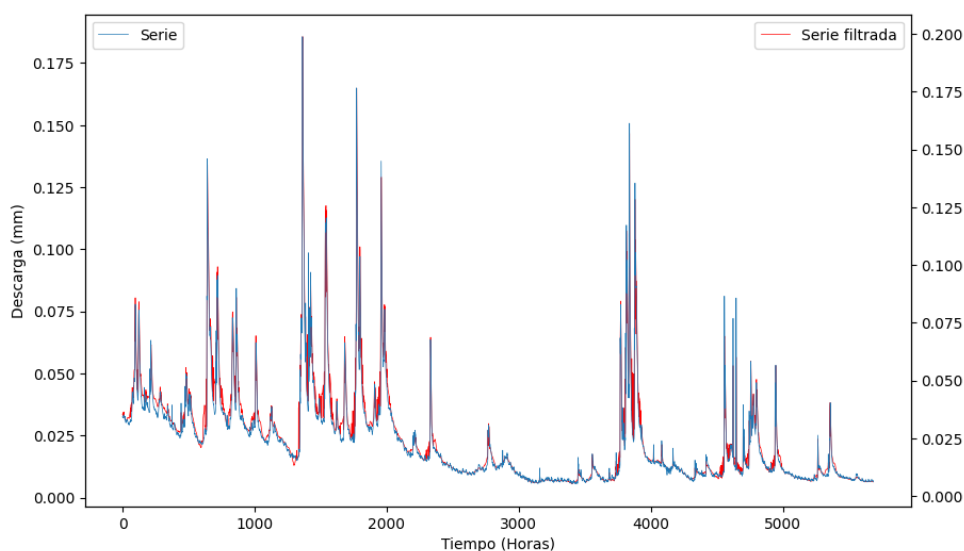


Figura 3-4: Comparación entre serie corregida y serie filtrada

3.2. Modelo DBM

Con la información tratada, se identifican diversos modelos, buscando la forma más eficiente de cada uno. Estas formas se utilizan para caracterizar las curvas y los coeficientes que describen la función de transferencia. Finalmente, tras implementar la función de transferencia, se realiza una validación de un paso adelante (*one step ahead*) para determinar la precisión del modelo.

3.2.1. Identificación del modelo

Tras evaluar diversas formas del modelo, el criterio de selección se basó en el coeficiente de Young, buscando el valor más negativo posible, y el coeficiente de Akaike, buscando el menor valor. Como se muestra en la *Tabla 5*, se analizaron hasta tres tiempos anteriores en caudal, tres tiempos anteriores en precipitación, y un *lag* de hasta cuatro tiempos anteriores. Además, la tabla está organizada en orden descendente según los mejores parámetros de selección. De estos, se seleccionaron tres formas de modelos con hasta tres tiempos anteriores de flujo, debido a su interpretación física.

El modelo 314 fue seleccionado sobre los modelos 310 y 311, ya que las curvas de estado dependiente de estos no presentaban una interpretación física adecuada. En conclusión, los modelos seleccionados fueron 114, 221 y 314.

Tabla 5: Tabla resumen de las 20 mejores formas del modelo

Caudal	Precipitación	Lag	YIC	AIC
1	1	4	-17.274	-8.566
1	1	3	-17.259	-8.565
1	1	2	-17.236	-8.561
1	1	1	-17.213	-8.557
1	1	0	-17.188	-8.553
2	2	0	-16.493	-8.642
3	1	1	-16.108	-8.597
2	2	1	-16.043	-8.693
3	1	0	-15.68	-8.604
3	1	4	-15.628	-8.593
3	1	3	-15.498	-8.591
3	1	2	-15.012	-8.594
3	2	0	-14.797	-8.732
3	2	1	-14.729	-8.735
3	2	2	-14.611	-8.74
3	2	3	-14.451	-8.743
2	1	0	-14.378	-8.56
3	2	4	-12.852	-8.292
2	3	0	-11.59	-8.682
2	3	2	-11.38	-8.561

3.2.2. Curvas estado dependientes

Con los modelos identificados, se realizó un análisis de estado independiente, utilizando la serie de caudal para evaluar la condición antecedente, que en este caso corresponde al caudal. Esto permite aproximar el comportamiento de la cuenca y su respuesta a un evento de precipitación en función de la serie ingresada. De esta manera, el modelo estima el aprovechamiento de la precipitación según el estado antecedente de la cuenca.

Probando con diferentes tiempos hacia atrás en el análisis de estado dependiente, se definieron las mejores curvas con un tiempo hacia atrás en el modelo 114 y dos tiempos hacia atrás en el modelo 221 y 314. Las ecuaciones resultantes, que se muestran a continuación, tienen una forma logística, ya que proporcionan un buen ajuste con los datos y mantienen un sentido físico.

$$f(q_{t-1}) = \frac{0.0004915}{0.045304 + e^{-213.38596 * q_{t-1}^{1.50720}}}$$

Ecuación 10: Forma estado dependiente del modelo 114

$$g(q_{t-2}) = \frac{2.3543E^{-8}}{1.8926E^{-5} + e^{-33.6354 * q_{t-2}^{0.32584}}}$$

Ecuación 11: Forma estado dependiente del modelo 221

$$h(q_{t-2}) = \frac{0.0001114}{0.007573 + e^{-25.8862 * q_{t-2}^{0.63811}}}$$

Ecuación 12: Forma estado dependiente del modelo 314

En el caso del modelo 114, se realiza un análisis de estado dependiente del coeficiente del denominador. Esto significa que se describe su influencia en el caudal antecedente en función de su estado tres tiempos atrás.

$$A(q_{t-3}) = 1 - \frac{2.4576E^{-6}}{3.99942E^{-5} + e^{-39.84172 * q_{t-3}^{0.5529}}}$$

Ecuación 13: Constante de recesión del reservorio del modelo 114

3.2.3. Modelos seleccionados

Tras identificar la función que describe el aprovechamiento de la precipitación, se procede a la identificación del modelo con las series evaluadas de precipitación efectiva. De esta manera, se determinan los coeficientes y la forma que describe el modelo. A continuación, se muestran las funciones de transferencia que los describen.

$$q_t = \frac{0.066}{1 + A(q_{t-3}) * z} * \{p_{t-4} * f(q_{t-1})\}$$

Ecuación 14:*Modelo 114*

$$q_t = \frac{0.010158 - 0.0005051 * z}{1 - 0.9697 * z - 0.01702 * z^2} * \{p_{t-1} * g(q_{t-2})\}$$

Ecuación 15:*Modelo 221*

$$q_t = \frac{2.0888E^{-6}}{1 - 2.9799 * z + 2.9608 * z^2 - 0.9809 * z^3} * \{p_{t-4} * h(q_{t-2})\}$$

Ecuación 16:*Modelo 314*

3.2.4. Validación de los modelos

Para su posterior interpretación física, es necesario realizar una validación de los modelos calibrados. Dado que para dicho proceso se utilizó información filtrada, es esencial utilizar registros no modificados para la validación. Para esto, se utilizó el 30% de la serie mencionada anteriormente y se evaluó según el coeficiente Nash-Sutcliffe para una validación de un paso adelante, lo que implica que el modelo no se utiliza para pronóstico. En la *Tabla 6* se muestran los resultados de la validación, donde se puede observar que el mejor resultado corresponde al modelo 114. Sin embargo, todos los resultados reflejan que los modelos son muy eficientes en la predicción de un paso adelante.

Tabla 6: Resultados de validación one step ahead

Modelo	N-S
114	0.96
221	0.96
314	0.79

A continuación, en la *Figura 3-5* se puede observar la serie de observaciones junto con la simulación del modelo 114 a un paso adelante. Esto permite visualizar la precisión del modelo.

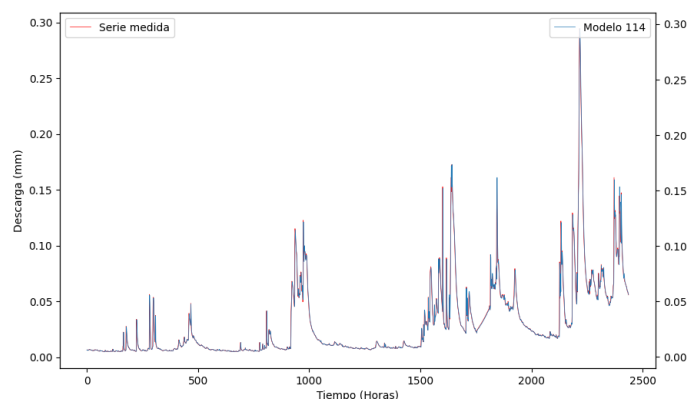


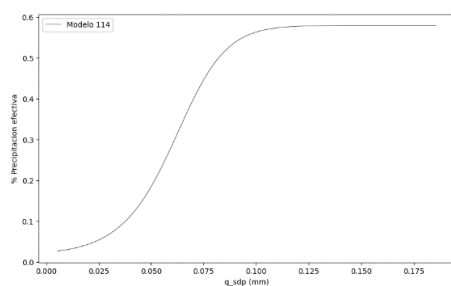
Figura 3-5: Serie observada y serie simulada

3.3. Identificación de caudales de riesgo

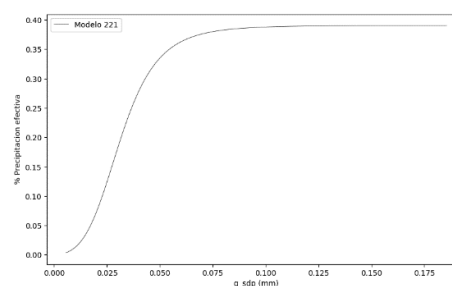
Con los modelos identificados y validados, se pueden realizar las interpretaciones físicas necesarias para determinar los indicadores de riesgo. Al haber determinado las funciones que describen el aprovechamiento de la precipitación en función del caudal antecedente, se puede utilizar esta medición indirecta de la humedad de la cuenca como una condición de riesgo. Debido a la forma logística de dichas funciones, a partir de cierto caudal se genera un máximo aprovechamiento de la precipitación. Además, en el caso de la función del reservorio lineal, a partir de cierto caudal habrá un mayor aprovechamiento del caudal antecedente en el flujo.

3.3.1. Precipitación efectiva

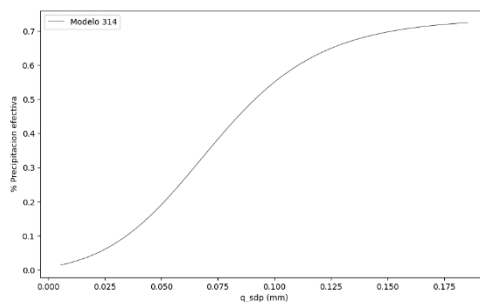
Las ecuaciones estado dependiente tienen forma logística, pero: *Ecuación 10*, *Ecuación 11* y *Ecuación 12* describen el aprovechamiento efectivo de la precipitación. Es decir, a mayor caudal, la cuenca tiene una mayor humedad, lo que hace que la precipitación efectiva aumente hasta llegar al punto de máxima saturación. Luego, como se muestra en la *Figura 3-6*, la última sección de la curva se vuelve recta. Por lo tanto, al definir el caudal en el punto donde comienza este comportamiento, se correspondería al indicador de riesgo.



a.



b.



C.

Figura 3-6: Curvas de precipitación efectiva a. Modelo 114 b. Modelo 221 c. Modelo 314

3.3.2. Recesión del reservorio lineal

En el caso del modelo 114, se tiene la *Ecuación 13*, la cual describe que, a mayor caudal, cambia la relación con el caudal antecedente, es decir, el aporte del caudal antecedente es mayor según un flujo de tres tiempos atrás. Como muestra la *Figura 3-7*, esta relación llega a ser constante en la parte inferior, por lo que el caudal en el que comienza este comportamiento correspondería a otro indicador de riesgo.

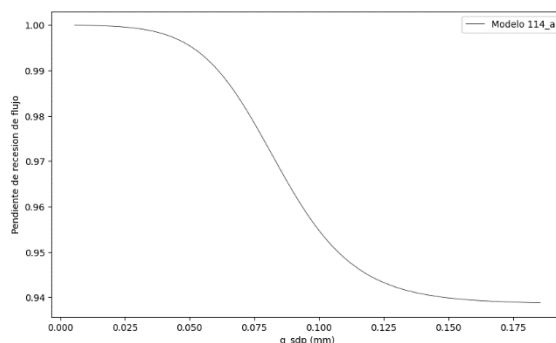


Figura 3-7: Variación del coeficiente de un reservorio

Finalmente, con esto se determinan los caudales presentados en la *Tabla 7*, donde el menor caudal corresponde a la *Ecuación 10*, mientras que el indicador con mayor tiempo de anticipación corresponde a la *Ecuación 13*. Considerando que ambos pertenecen al modelo con mejor validación, se plantean dos niveles de seguridad: un primer nivel con 15.5 m³/s una hora previa al posible riesgo y un segundo nivel con un caudal de 21.8 m³/s tres horas antes del evento. Esta última situación corresponde al mayor riesgo, ya que el flujo se incrementaría, aprovechando al máximo cualquier evento de precipitación y una menor recesión del caudal antecedente.

Tabla 7: Indicadores según el modelo

Modelo	Tiempo atrás	Caudal (m3/s)
114 - Precipitación	1 hora	15.5
114 - Reservorio	3 horas	21.8
221	2 horas	24.5
314	2 horas	24.5

3.3.3. Tiempo de recesión

De los modelos descritos en la sección 3.2.3, las raíces del polinomio del denominador se resumen en la *Tabla 8*, donde se toma las raíces del coeficiente a mínimo. Además, se considera la Ecuación 7 para determinar tiempo de recesión de cada reservorio. Se destaca el tiempo de recesión del modelo 114, ya que durante este periodo la cuenca tendrá especial sensibilidad a eventos de precipitación, por lo que se recomendaría un monitoreo continuo de los eventos de precipitación en la cuenca.

Tabla 8: Resumen del tiempo de recesión de los modelos

334		221		114	
r	Tiempo [Horas]	r	Tiempo [Horas]	r	Tiempo [Horas]
0.9972	357.14	0.987	76.92		
0.9914	116.28			0.9392	16.45
0.99114	112.87	0.0172	1.02		

3.4. Revisión de los caudales de riesgo

Los caudales de riesgo corresponden a los caudales generados por un evento de precipitación en condiciones de riesgo como las descritas anteriormente. Para esto, se optó por utilizar el modelo 114, ya que, al requerir solo una condición antecedente, facilita su simulación. Luego, asumiendo que en todos los tiempos se mantuvo un mismo caudal, se determinaron los caudales de riesgo. Para cuantificar el riesgo que estos caudales representarían, se implementó un modelo de inundación que permitió modelar las áreas afectadas.

3.4.1. Precipitaciones de diseño

Para la precipitación, se optó por definirla como un único evento, utilizando diferentes periodos de retorno para caracterizar el evento. Tras realizar una prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov, se determinó que la serie se ajusta mejor a una distribución normal. En la *Tabla 9* se muestran los resultados mencionados.

Tabla 9: Precipitaciones de diseño

Periodo de retorno [años]	P [mm/h]
2	2.94
5	4.56
10	5.41
15	5.83
25	6.31
50	6.89
100	7.41

3.4.2. Caudales de riesgo

Tras definir las precipitaciones de diseño, estas se evalúan en el modelo para ejemplificar el aumento del flujo debido a un único evento. Sin embargo, como se muestra en la *Tabla 10*, aunque un único evento genera un cambio en el flujo, es necesario revisar el cambio en el área de inundación.

Tabla 10: Tabla resumen de los caudales de riesgo

Periodo de retorno [años]	Caudal de riesgo (m ³ /s)	
	Caudal antecedente	
	15.5	21.8
2	16.96	23.20
5	17.81	24.06
10	16.95	24.50
15	18.48	24.72
25	18.73	24.97
50	19.04	25.28
100	19.30	25.56

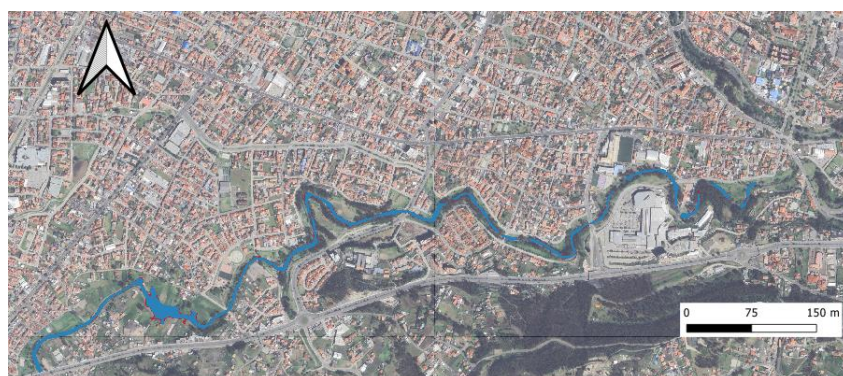
3.4.3. Área de inundación

Para esto, se determinó el área de inundación mediante el programa HEC-RAS y el complemento RIVERGIS. Cabe recalcar que el modelo de inundación está limitado por el alcance de la investigación, ya que se utilizó información referenciada para su calibración y no se calibró mediante mediciones como se recomienda. Tras definir las características geométricas y de rugosidad, se corrió el modelo con las condiciones antecedentes y el caudal de riesgo para un periodo de retorno de 10 años.

Como se muestra en la *Figura 3-8*, tanto en las secciones a y b, que comparan el cambio del caudal tras el evento de precipitación, los cambios en las áreas no son considerables. Esto se debe a que, al ser bajo el caudal para la geometría del cauce, el cambio se da únicamente en la velocidad del flujo. En el gráfico a continuación, se puede observar el área de inundación de la condición antecedente superpuesta con la del caudal producido, mostrando en rojo las áreas donde se observa el cambio en el flujo.



a.



b.

Figura 3-8: Modelo de inundación de condiciones antecedentes

a. Caudal 15.5 sobre 16.95 b. Caudal 21.8 sobre 24.5

Capítulo 4

4. Conclusiones, observaciones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

Con los modelos calibrados y validados, se determinó los indicadores de riesgo de las funciones estado dependientes. Como muestra la *Tabla 7*, los caudales representan el punto en el que la cuenca tiene una máxima reacción a eventos de precipitación y con el menor tiempo de recesión. Según esto, se plantearon dos niveles de seguridad con el modelo 114, ya que ambos indicadores representan condiciones distintas, pero al hablar de riesgo es importante tener diferentes tiempos de respuesta para reducir el peligro a la población. El primer nivel corresponde un caudal de una hora atrás, que representa la máxima precipitación efectiva y el segundo nivel es un caudal de tres horas atrás, con el menor tiempo de recesión. Este tiempo, también se recomendó como periodo de monitoreo en caso de llegar a dichos indicadores de riesgo. Con la relación entre umbral y tiempo atrás, se pueden generar estrategias de monitoreo y gestión de riesgos.

Mediante la estación de caudal, se determinó la distribución espacial y temporal de las series de precipitación, pues ambas debían mantener una temporalidad semejante, por lo que como se muestra en la *Figura 3-1*, se optó por una serie de alrededor de 236 días para la calibración y 102 días para la validación del modelo, siendo la mejor opción trabajar con calidad horaria para aprovechar de mejor manera la información. Luego, mediante el control de calidad de la información se verifico los patrones estacionales y eventos extremos con caudal y precipitación, de forma que el modelo tendría la capacidad de simular eventos similares.

Mediante el control de calidad, fueron identificadas las funciones estado dependientes y calibrado el modelo, tal que al realizar la validación de un paso adelante los resultados son muy alentadores ya que significarían que todos los modelos simulan de forma precisa las características de la cuenca. Con esto, se puede asumir de forma acertada las interpretaciones físicas de las condiciones representadas. Además, los modelos identificados consideran varias formas de tiempos atrás por lo que pueden ser utilizados en diferentes estrategias de gestión de riesgos.

Con el análisis de las funciones estado dependientes se determinó los caudales de riesgo como el umbral para la máxima reacción, estos en base a las condiciones antecedentes, tal como se había planteado. Entonces, se verifica que se cumplen ambos niveles de seguridad planteados. Sin embargo, revisando la serie histórica, se observa que, si bien los eventos

extremos sobrepasaron dicho indicador, el tiempo para llegar al máximo del evento fue mayor a tres horas, que corresponde al segundo indicador.

Por el alcance limitado de la investigación, se validó el crecimiento mediante un único evento de precipitación, lo cual no generaría un cambio significativo en el área, como muestra la *Figura 3-8*. Sin embargo, se muestra que los indicadores de riesgo definidos pueden ser una herramienta útil para estrategias de gestión de riesgos. Mediante los modelos desarrollados, junto con los caudales determinados, se pueden instaurar sistemas para la gestión y reducción de posibles riesgos de inundación.

4.2. Observaciones

Si bien las series tuvieron buenos resultados de validación, se considera un periodo pequeño 236 días, por lo que fuera mejor utilizar una serie mayor para la calibración, además que los parámetros calibrados corresponden al estado de la subcuenca del periodo descrito, y que cualquier cambio en el uso del suelo puede inferir en la variable de remplazo, por lo que hay que habría que actualizar periódicamente estos parámetros con nuevas calibraciones.

Si bien el análisis de estas precipitaciones no muestran grandes cambios, ya que, al trabajar con un modelo de calidad horaria, los cambios en el flujo muestran un cambio gradual, esto podría ser refinado de forma que se simulen tormentas de diseño o revisando el cambio en el modelo con precipitaciones menor a la horaría.

4.3. Recomendaciones

La investigación estuvo muy limitada por la calidad de la información, pues el ruido de las mediciones y los períodos vacíos condicionaron la calibración del modelo. Para mejorar posibles análisis similares, se requiere un mejor monitoreo y mantenimiento constante de las estaciones de medición y caudales, así como la actualización de la ecuación de curva de descarga de la estación.

A pesar de que en el periodo considerado en el presente estudio se incluyeron eventos con un máximo de 45 m³/s, se recomienda actualizar el mismo con eventos de mayor dimensión de al menos 90 m³/s para validar el modelo y actualizar su calibración.

La revisión de los caudales de riesgo fue muy limitada, por lo que se podrían realizar nuevas investigaciones validando con registros históricos la temporalidad de los indicadores o implementando el modelo para tormentas de diseño. Además, estas podrían complementar de mejor manera un modelo de inundación que establezca un límite claro del caudal que ocasionaría riesgos de inundaciones en la cuenca.

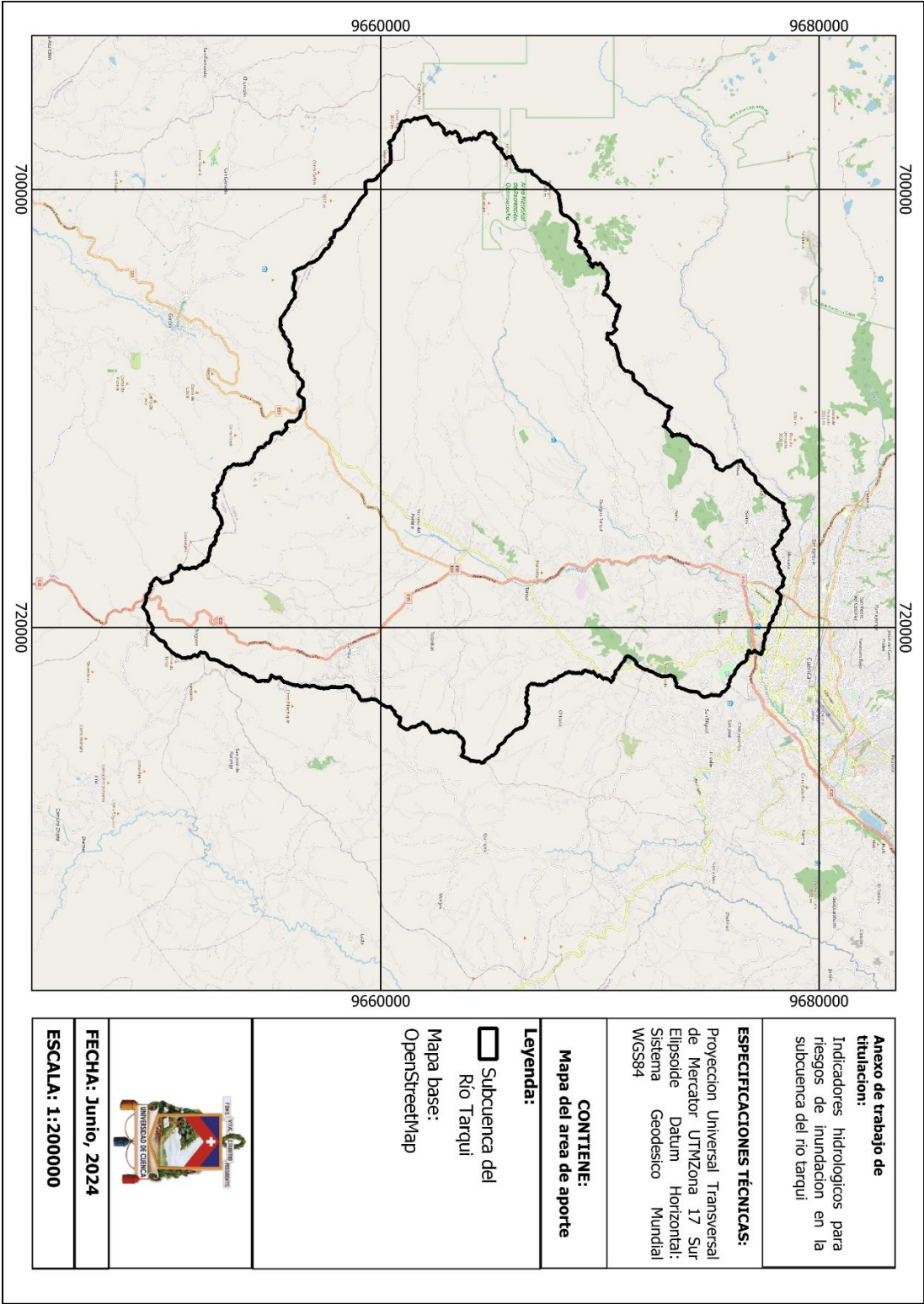
Referencias

1. Arumi , J. L., Jara , J., & Salgado , L. (2000). *Analisis hidrológico*. Temuco: Universidad de Concepcion.
2. Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling*. Lancaster: John Wiley & Sons, Ltd.
3. Bujosa , M., Garcia, A., & Young, P. (3 de 05 de 2010). Introduccion a la Regresion Armonica Dinamica (DHR). Madrid : Universidad complutense de madrid .
4. Cajamarca , J. (2022). *La importancia de ordenar las subcuencas hidricas y regular los rios de Cuenca*. Cuenca : Universidad Politecnica Salesiana.
5. Carrera, D., & Guevara , P. (2016). *Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media*. Chile : IDESIA.
6. El Universo. (11 de Julio de 2011). *Alerta por creciente de ríos en varias zonas de Cuenca*. Obtenido de El Universo : <https://www.eluniverso.com/2011/07/12/1/1447/alerta-creciente-rios-varias-zonas-cuenca.html>
7. Moglen, G. (2015). *Fundamentals of open chanel flow*. N.Y.: CRC Press.
8. Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling* . Zurich: Institute of Environmental Engineering.
9. Mora, D. E., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Gap Filling Based on Quantil Perturbation Factor technique. *International conference on hydroinformatics* .
10. Morales , A., & Sanchez , J. (2010). *Aplicación de un modelo parsimonial conceptual de precipitación -escorrentía (VHM) en la subcuenca del río Tomebamba en Monay: evaluación temporal y espacial*. Cuenca : Universidad de Cuenca.
11. Morales , A., & Sanchez , J. (2016). *Trabajo de titulacion*. Cuenca : Universidad de cuenca.
12. Naranjo, D. (2018). *Elaboracion de hidrogramas de crecida de las cuencas del rio Tomebamba, Tarqui y Yanuncay desde el año 1997 a 2017*. Cuenca, Azuay, Ecuador: Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8304/1/14027.pdf>

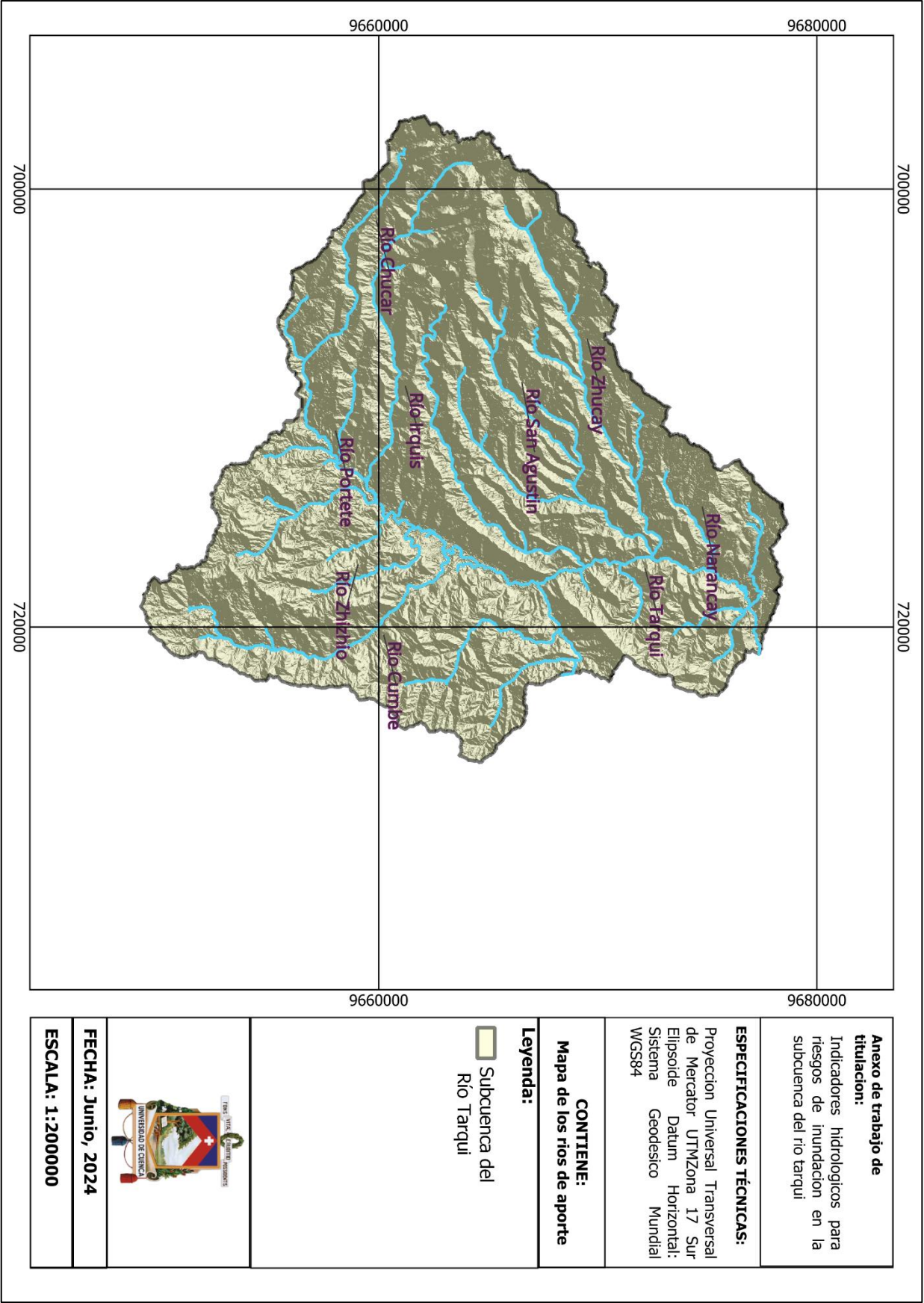
13. Organizacion Meteorologica Mundial. (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. Genève 2: Organización Meteorológica Mundial.
14. Palma , E., & Eduardo , V. (2012). *Analisis, Evaluacion y Propuesta de una red de monitoreo hidrogeologico para la subcuenca del rio Tarqui* . Cuenca : Universidad de Cuenca.
15. Pasiok , R., & Dębek, L. (2015). *River Gis*. Obtenido de <http://rivergis.com/about.html>
16. Quichimbo , A., Vazquez, R., & Samaniego, E. (2013). Aplicabilidad de los modelos NAM y DBM para estimar caudales en subcuencas alto andinas de Ecuador. *Maskana*, 4(2), 85-103. doi:<https://doi.org/10.18537/mskn.04.02.07>
17. Sánchez, C., & Velesaca, I. (17 de Mayo de 2021). La crecida más grande del río Tarqui en tres décadas deja a decenas de familias damnificadas. *La crecida más grande del río Tarqui en tres décadas deja a decenas de familias damnificadas*, pág. 8. Obtenido de <http://elmercurio.com.ec/2021/05/17/la-crecida-mas-grande-del-rio-tarqui-en-dos-decadas-deja-a-decenas-de-familias-damnificadas/>
18. SNGR, S. (2011). MAPA PRELIMINAR DE AMENAZAS POR INUNDACIONES. Quito, Ecuador: SNGR.
19. SNGR, S. (2019). *Plan específico de gestion de riesgos 2019-2030*. Quito, Ecuador: SNGR.
20. Taylor , C., Pedregal, D., Young , P., & Tych , W. (2007). *Environmental Time Series Analysis and Forecasting with the Captain Toolbox*. Environmental Modelling and Software. doi:<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.envsoft.2006.03.002>
21. Vallejo , E. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los ríos Tarqui, Yanuncay*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5494/1/Tesis.pdf>
22. Vanacker, V. (2007). *Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador Human Impact and Geomorphology in Tropical Mountain Areas*. Cuenca: Geomorphology.
23. Young, P. (2003). *Top-down and data-based mechanistic modelling of rainfall–flow dynamics at the catchment scale*. Lancaster : Wiley InterScience .
24. Young, P. (2011). *Recursive estimation and Time-Series analysis*. Landcaster, United kingdom: Springer-Verlag.

Anexos

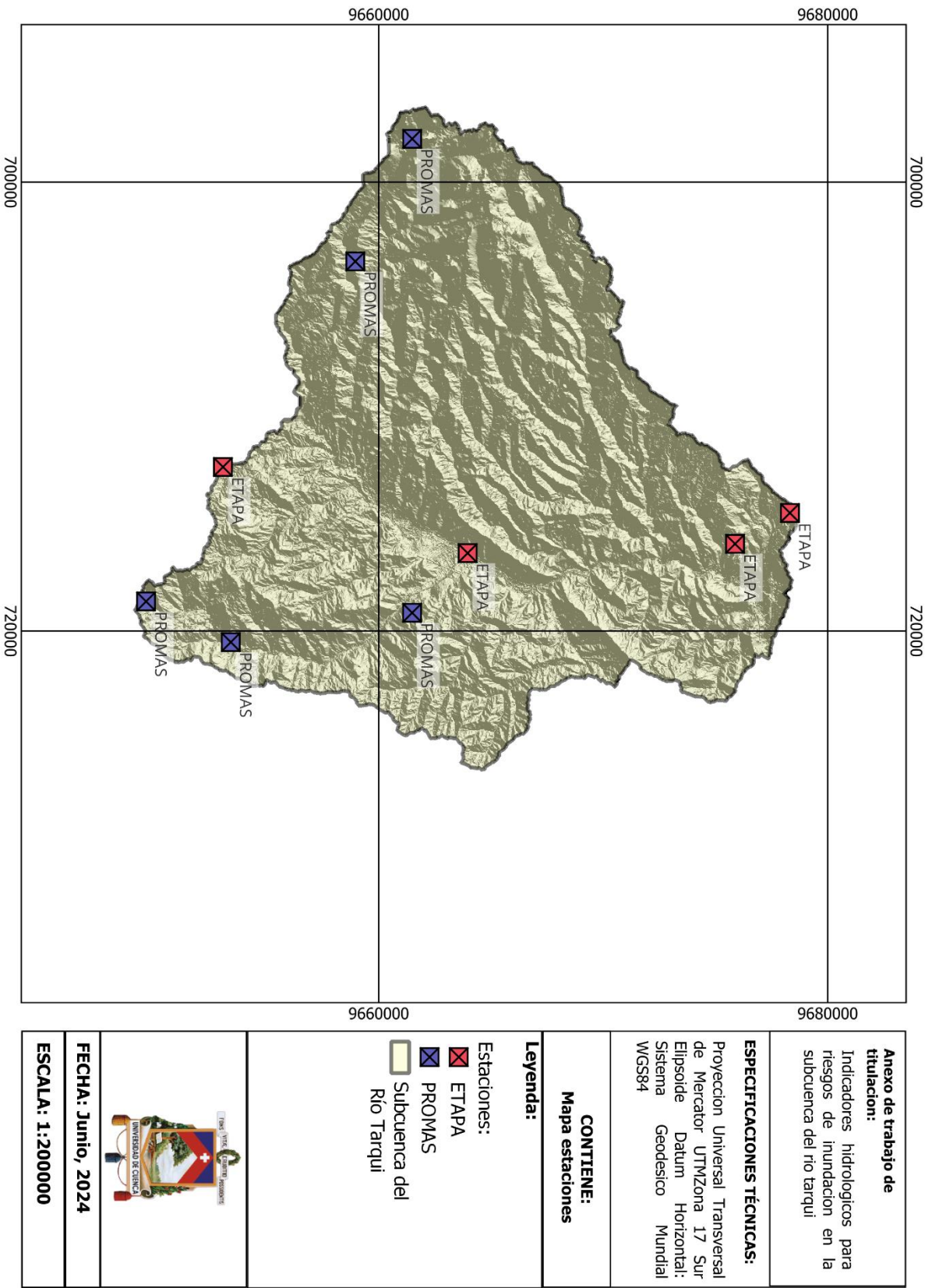
Anexo A. Mapa del área de aporte



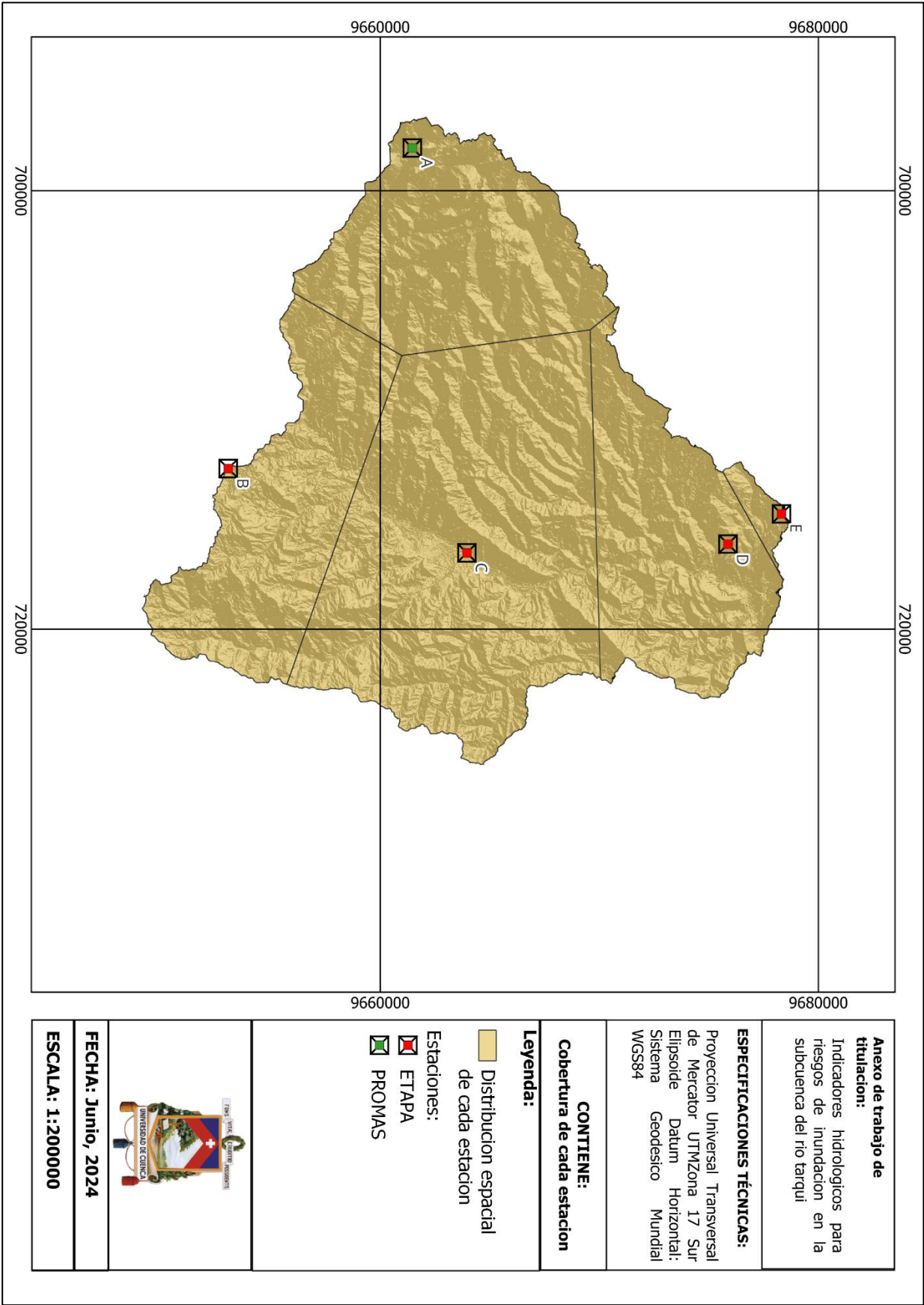
Anexo B. Mapa de Ríos de aporte

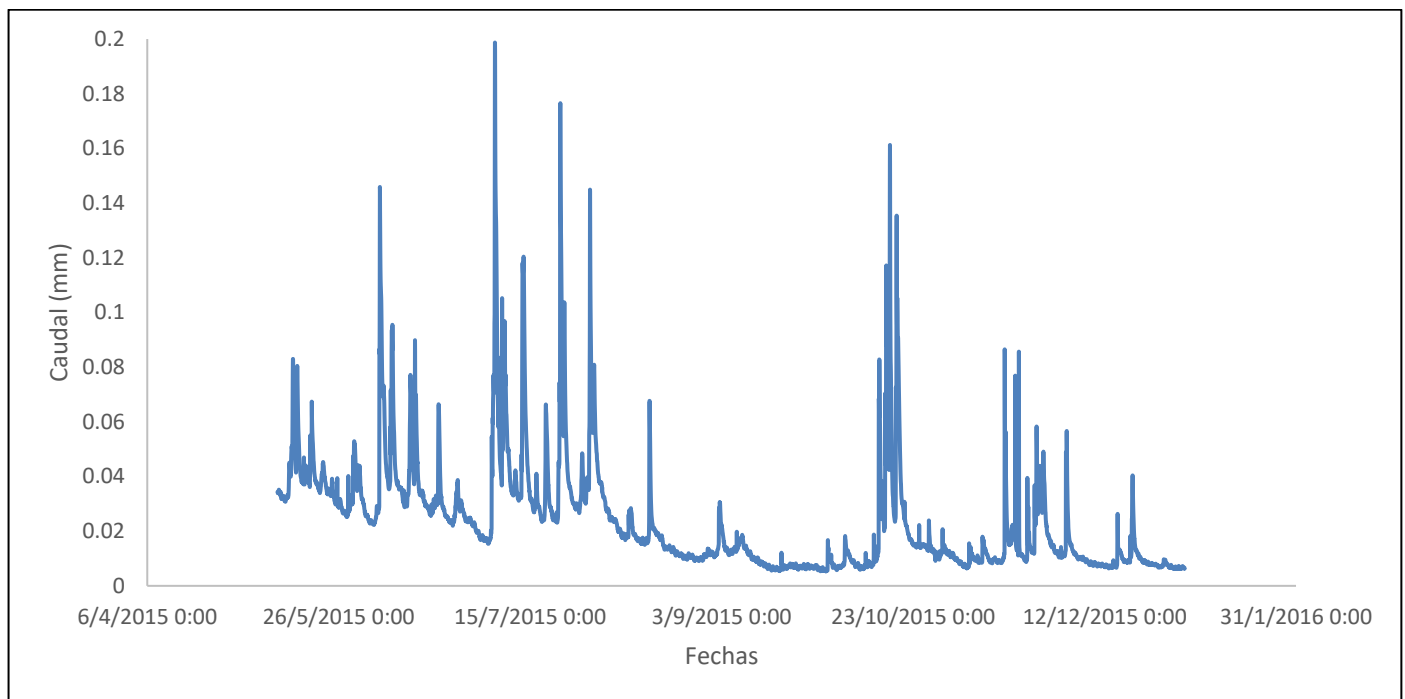
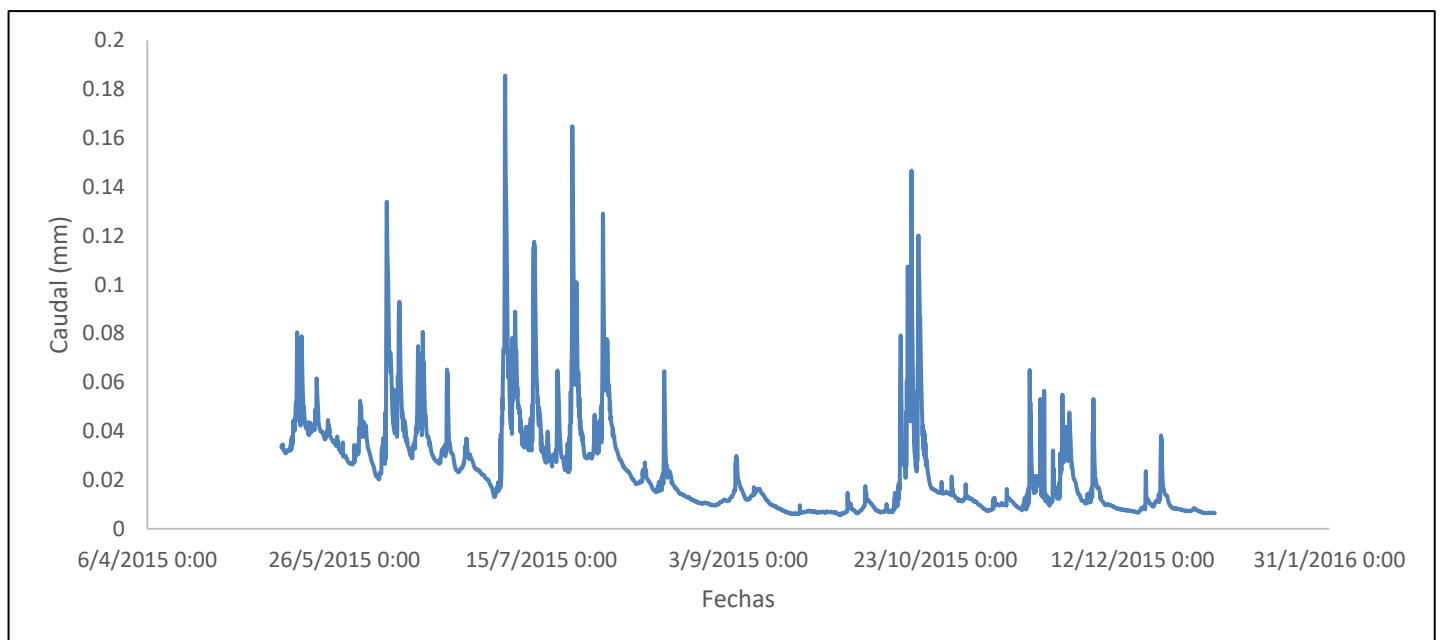


Anexo C. Estaciones revisadas



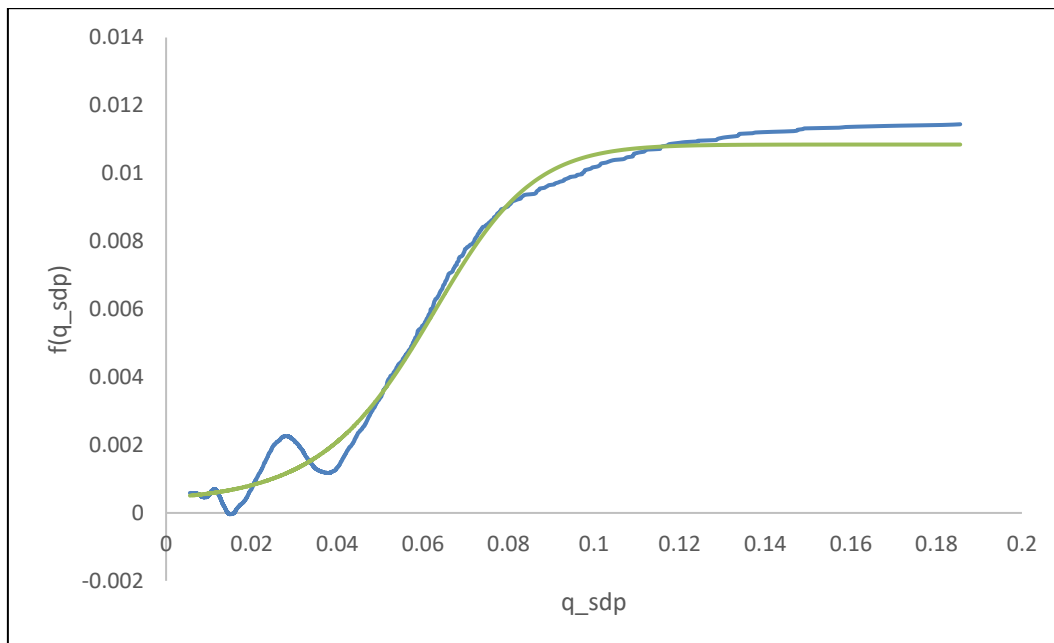
Anexo D. Estaciones Seleccionadas



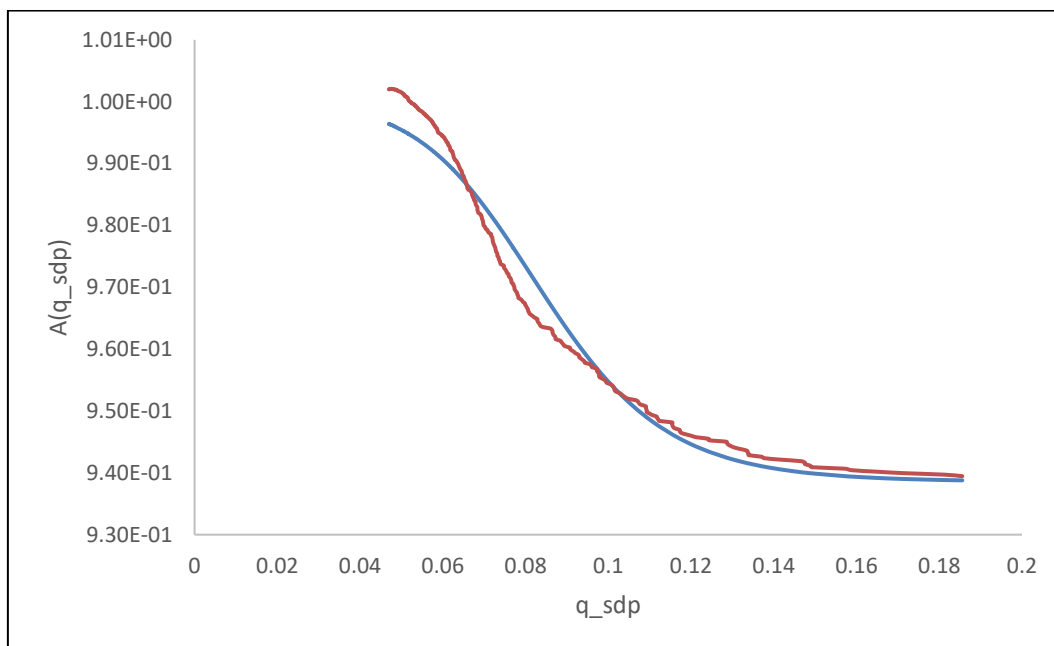
Anexo E. Histograma sin filtro**Anexo F. Histograma filtrado**

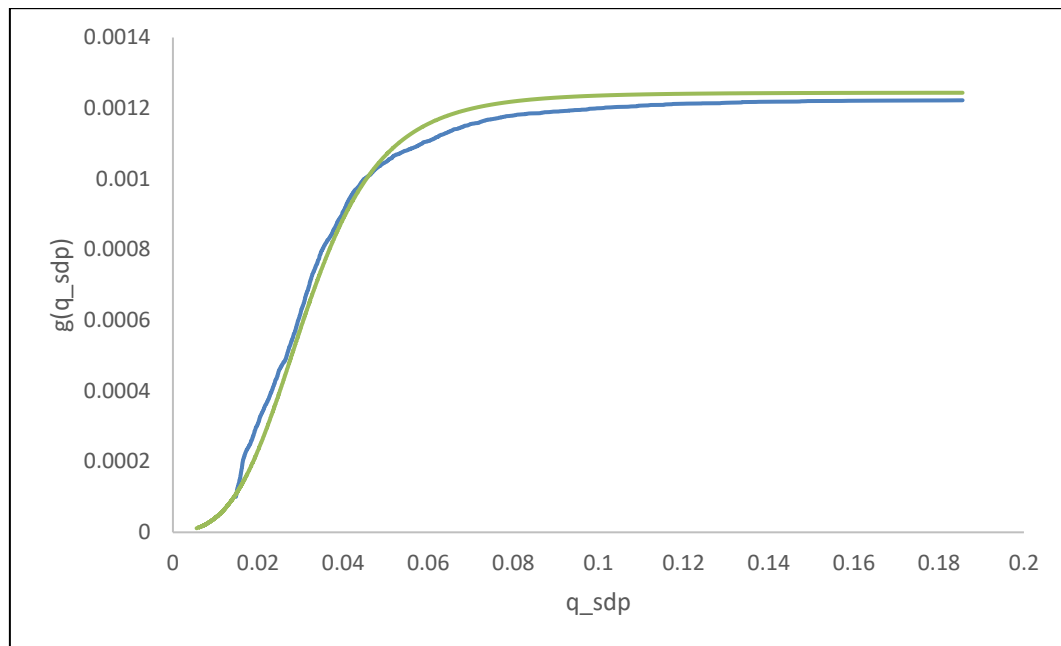
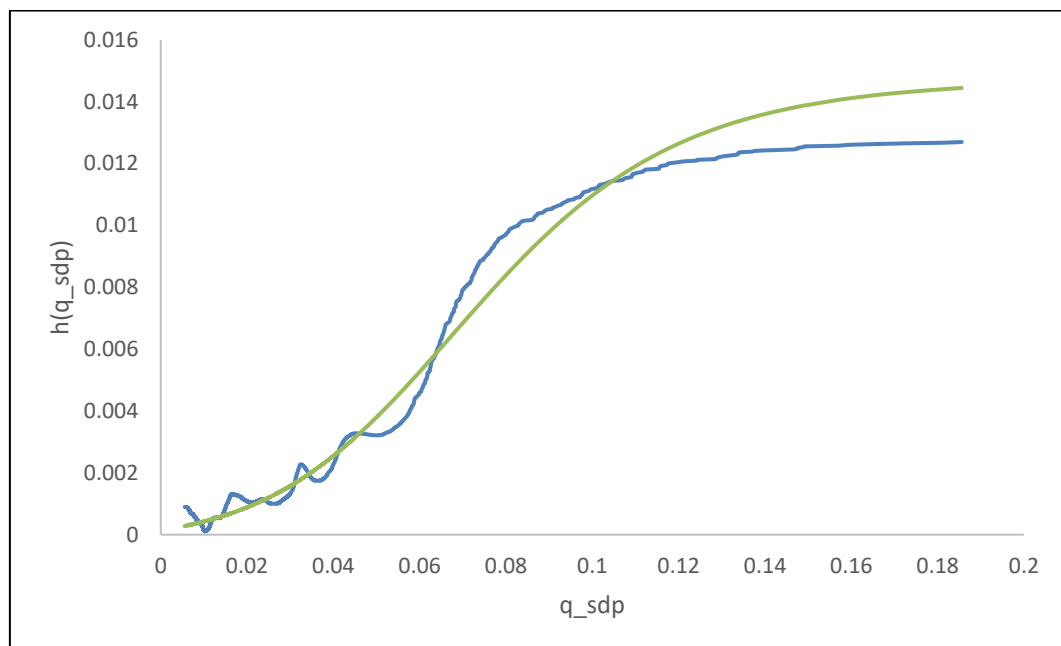
Anexo G. Acople de funciones estado dependientes

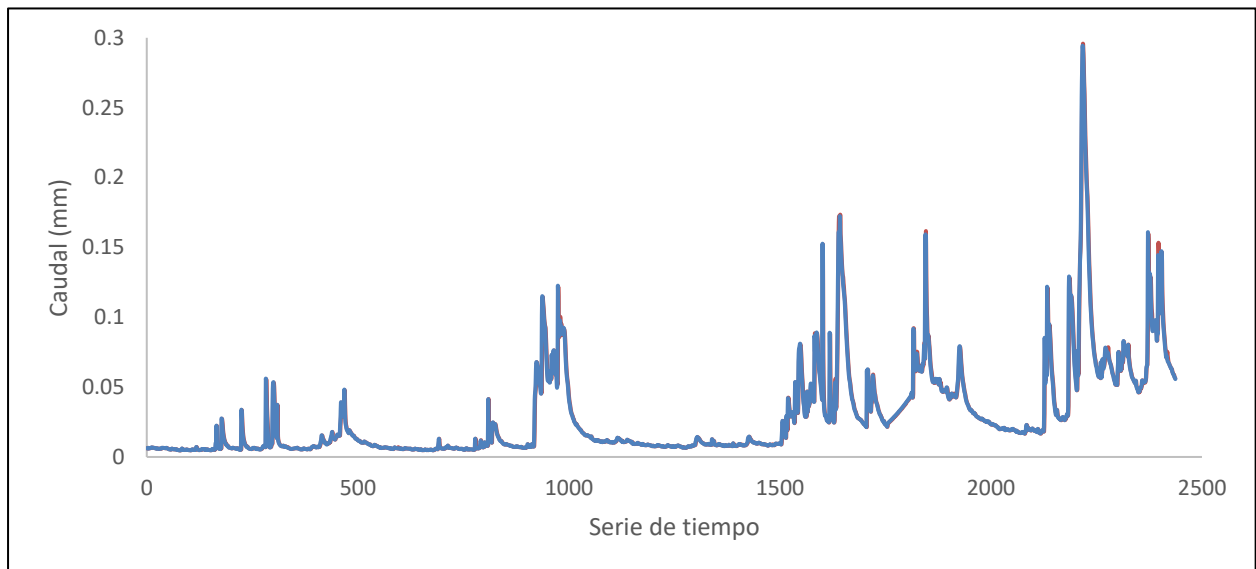
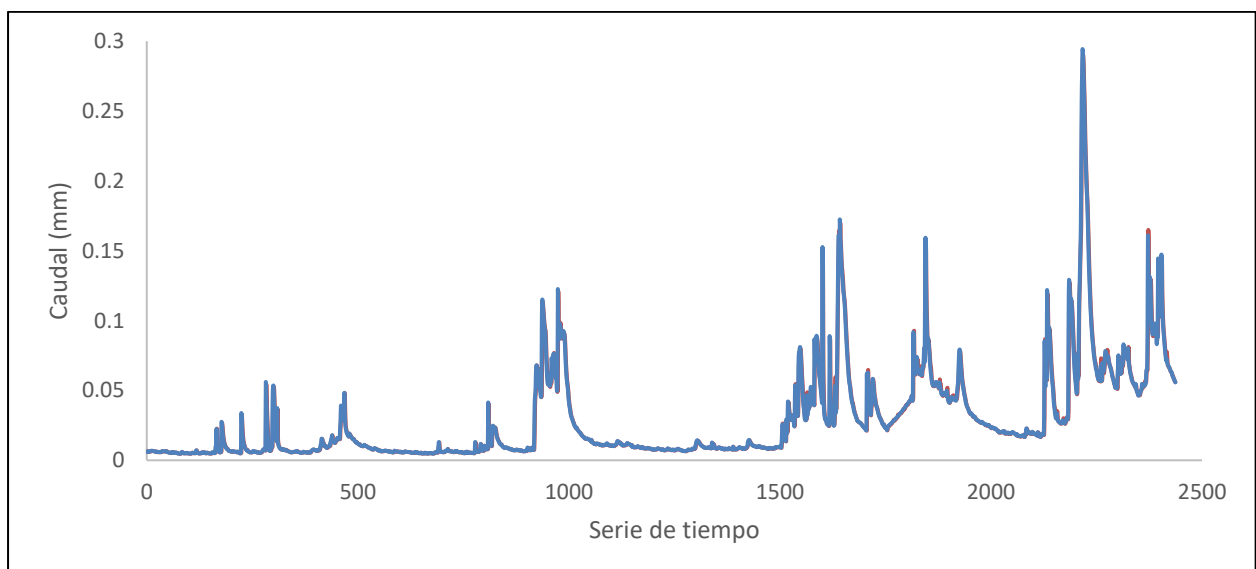
a. Modelo 114 – Precipitación efectiva



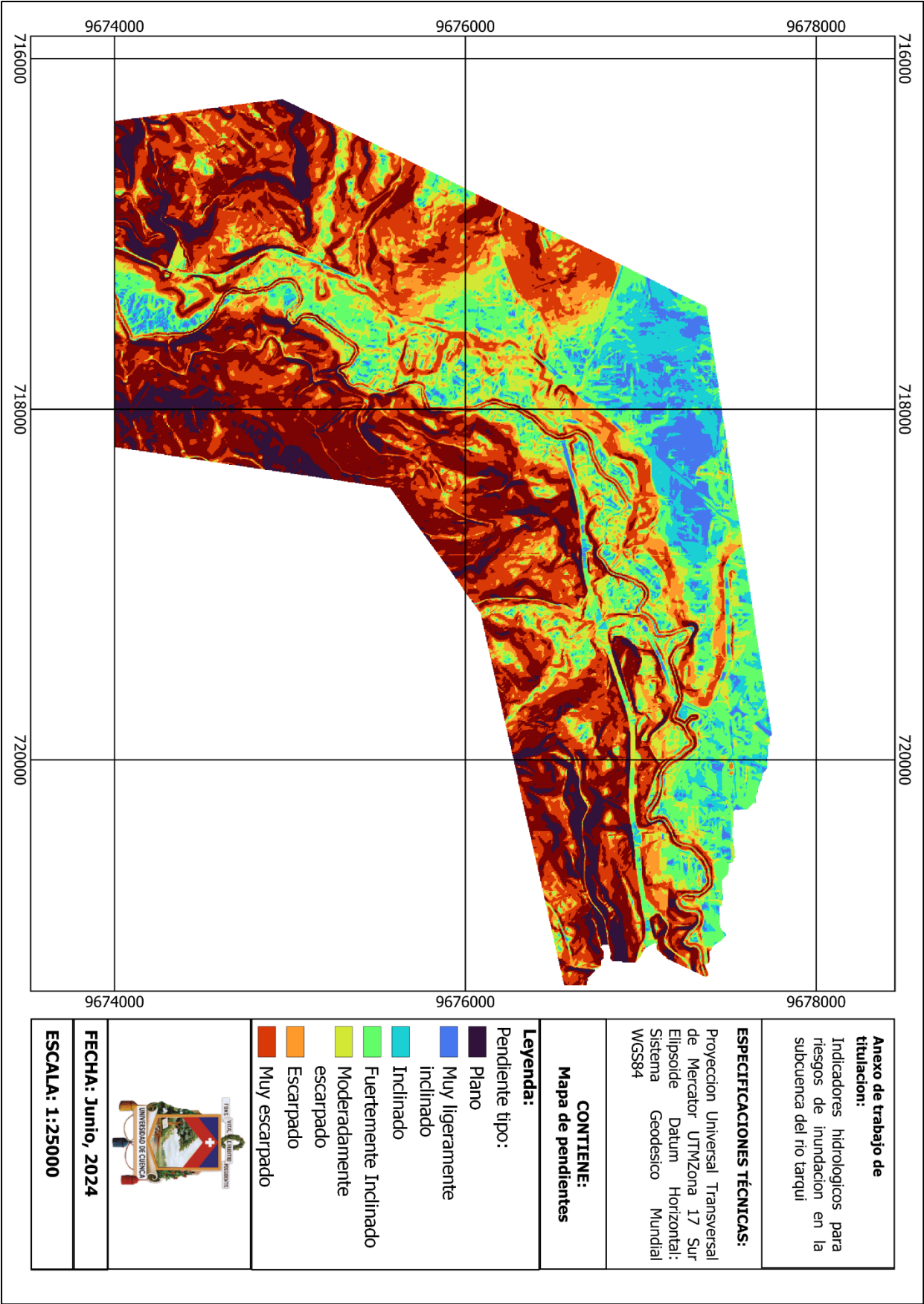
b. Modelo 114 – Coeficiente de recesión del reservorio



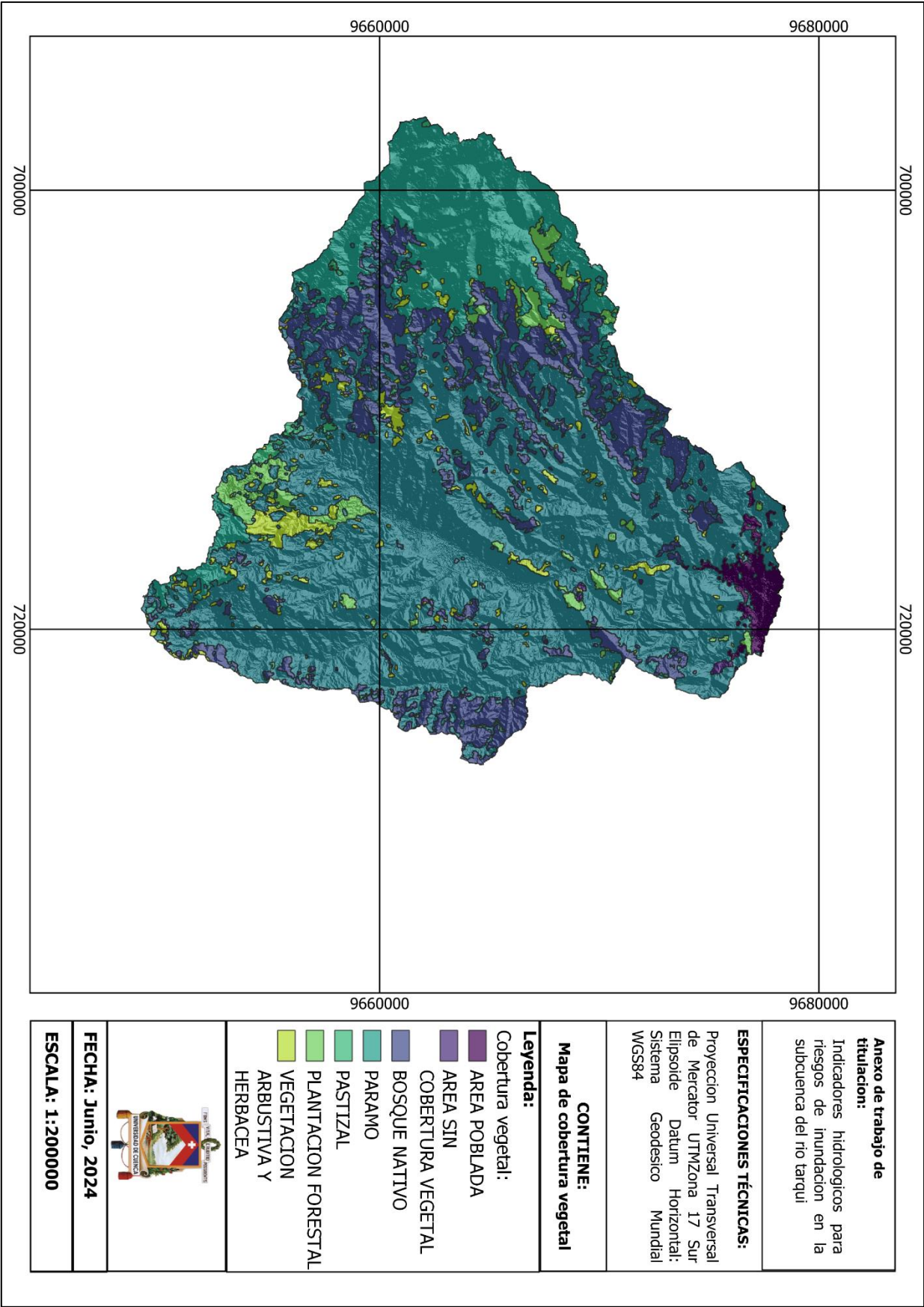
c. Modelo 221 – Precipitación efectiva**d. Modelo 314 – Precipitación efectiva**

Anexo H. Validación de los modelos**e. Modelo 114****f. Modelo 221**

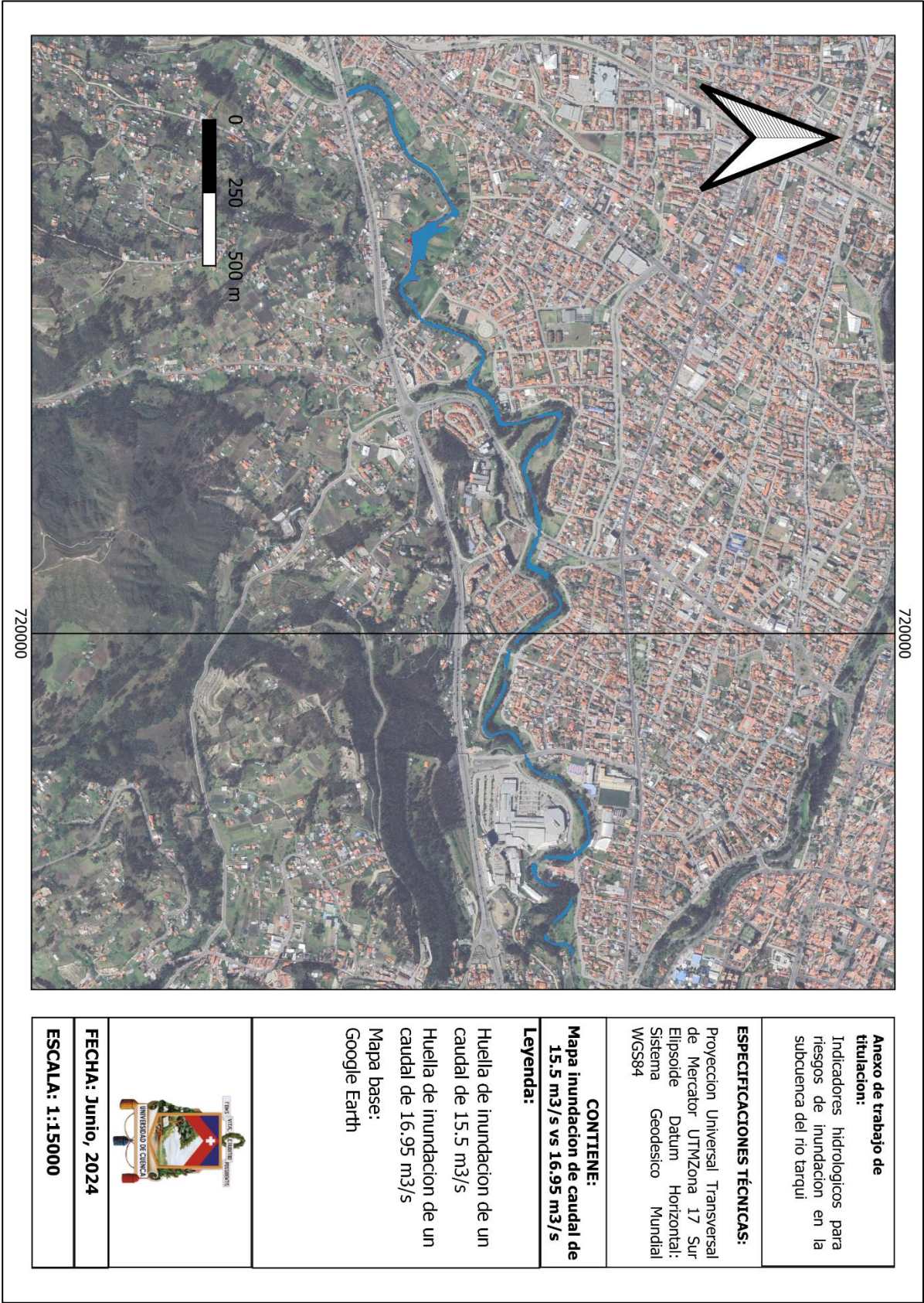
Anexo I. Mapa de pendientes



Anexo J. Mapa de cobertura vegetal



Anexo K. Mapa de inundación primer nivel de seguridad



Anexo L. Mapa de inundación primer segundo de seguridad

