



**UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“Análisis de la regulación hidrológica de lagunas en una zona de páramo del Aus-
tro Ecuatoriano”.**

Tesis de Posgrado

previo a la obtención del título de:

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

AUTORA:

Ing. María Verónica Rodas Ochoa

C.I: 0104077250

DIRECTOR:

Ing. Diego Esteban Mora Serrano, Ph.D.

C.I: 0102423506

Cuenca – Ecuador

2018



RESUMEN

Los ecosistemas andinos de meseta, en especial los humedales y zonas de páramo, son esenciales para las tierras bajas en las cuencas hidrográficas de los Andes tropicales. Las regiones montañosas suelen capturar la humedad de las masas de aire, lo que ha conllevado a una incertidumbre en que el páramo puede llegar a tener ciertos grados de humedad. En este trabajo se aplica cuantificar los procesos de regulación hidrológica en zonas de páramo en una pequeña cuenca en los Andes ecuatorianos. Se identificó y caracterizó dos subcuencas pareadas: Tomebamba y Culebrillas. Se implementó los modelos hidrológicos TOPMODEL y VHM, los cuales revelaron que, para la calibración y para la validación, los caudales simulados de la cuenca del Tomebamba subestiman los caudales observados. Por la cual se determina que el rendimiento del modelo VHM y TOPMODEL de la cuenca del Tomebamba obtiene un NSE satisfactorio (0.82 y 0.85) y la cuenca del Culebrillas un NSE aceptable (0.74 y 0.73). La cuenca del Tomebamba tiene un área de páramo más deteriorada con respecto a la otra estudiada; y, a pesar de su tamaño e influencia de otros factores externos presenta una modelación mucho mejor que la otra que se supone debería ser más simple. La cuenca de Tomebamba guarda procesos de páramo; y, además, la capacidad de regulación en esta cuenca es mayor comparada con la Culebrillas debido a la existencia de las lagunas. El desempeño del modelo TOPMODEL es más simple, y, por tanto, el más recomendado para modelar cuencas de páramo.

PALABRAS CLAVES: LAGUNAS, MODELO HIDROLÓGICO, PÁRAMO, REGULACIÓN HIDROLÓGICA, CUENCAS PAREADAS.



ABSTRACT

Andean plateau ecosystems, especially wetlands and páramo areas, are essential for the lowlands in the watersheds of the tropical Andes. The mountainous regions usually capture the humidity of the air masses, which can lead to an uncertainty in which the páramo can reach certain degrees of humidity. In this work, it was quantified hydrological regulation processes in páramo zones for a small watershed in the Ecuadorian Andes. Two paired subbasins were identified and characterized: Tomebamba and Culebrillas. The TOPMODEL and VHM hydrological model were implemented, which revealed that, for calibration as well as for validation, the simulated flows of the Tomebamba catchment underestimate the observed flows. Therefore, it was determined that the yield of the VHM and TOPMODEL model of the Tomebamba catchment resulted in a satisfactory NSE (0.82 and 0.85); whereas the Culebrillas catchment showed an acceptable NSE (0.74 and 0.73). The Tomebamba catchment has a more deteriorated climate area than the other one; its weight and the influence of other external factors show a much better modeling results than the other (supposedly much simpler). Finally, the Tomebamba catchment holds páramo processes, being its regulation capacity higher compared to the Culebrillas one, due to the existence of lagoons. The performance of TOPMODEL is simpler, and, therefore, the most recommended for modeling páramo basins.

KEY WORDS: LAKES, HYDROLOGICAL MODEL, PÁRAMO, HYDROLOGICAL REGULATION, PAIRED BASINS.



Índice

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
CAPITULO 1	11
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	11
1.1 ANTECEDENTES.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.4 HIPOTESIS.....	13
CAPITULO 2	14
2. MARCO TEÓRICO	14
CAPITULO 3	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1 AREA DE ESTUDIO.....	18
3.1.1 La cuenca experimental.....	18
3.1.2 Precipitación	19
3.1.3 Clima	19
3.1.4 Uso del Suelo	19
3.1.5 Suelo.....	20
3.1.6 Identificación en la cuenca alta del Tomebamba 2 cuencas pareadas.....	21
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	23
3.2.1 Recolección y depuración de la base de datos.....	23
3.2.2 Procesamiento de Información	24
3.2.3 Cálculo de la precipitación media sobre una cuenca.....	24
3.3 SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO	25
3.3.1 MODELO VHM	26
3.3.1.1 Herramienta WETSPRO Separación del flujo	26
3.3.1.2 División de la serie de tiempo en eventos de flujo rápido y lento	27
3.3.1.3 Extracción de valores extremos de flujo rápido y lento	28
3.3.1.4 Análisis de valores extremos	29



3.3.1.4.1	Distribución de valores extremos	29
3.3.1.4.2	Periodo de retorno.....	29
3.3.1.5	Calibración del Modelo	30
3.3.2	TOPMODEL.....	32
3.3.2.1	Índice topográfico	33
3.3.2.2	Función Acumulativa de Retraso.....	33
3.3.3	Criterios de evaluación del desempeño del modelo hidrológico	34
3.4	COMPARACIÓN DE LAS CUENCAS PAREADAS A TRAVÉS LA SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS.....	35
CAPITULO 4	36
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1	SEPARACIÓN DE LAS CUENCAS PAREADAS	36
4.2	CARACTERIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS	36
4.3	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO VHM.....	39
4.3.1	Análisis para la separación de flujos	39
4.3.2	Eventos independientes de flujo rápido y lento (extracción de valores extremos)	42
4.3.3	Análisis de valores extremos y periodo de retorno	44
4.3.1	VHM.....	46
4.3.1.1	Calibración.....	46
4.4	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TOPMODEL.....	57
4.4.1	Función acumulativa de retraso de la cuenca en TOPMODEL	57
4.4.2	TOPMODEL.....	59
4.5	SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS DE LAS CUENCAS PAREADAS MEDIANTE LOS MODELOS VHM Y TOPMODEL	65
CAPITULO 5	70
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
5.1	MODELO VHM.....	70
5.2	MODELO TOPMODEL.....	70
5.3	COMPARACIÓN DE MODELOS	71
REFERENCIAS	74



Tabla de Figuras

Figura 1. Ubicación de la cuenca de estudio.....	18
Figura 2. Uso de suelo del área de estudio Fuente: FAO, UAZUAY	20
Figura 3. Tipo de suelo del área de estudio Fuente: FAO, UAZUAY	21
Figura 4. Cuencas pareadas y distribución de estaciones hidrometeorológicas disponibles; Fuente: ETAPA EP	23
Figura 5. Diagrama de técnicas de separación de flujos propuestas por Chapman, (1991). Fuente: (Willems, 2009).....	26
Figura 6. Modelo de reservorio lineal	27
Figura 7. Parámetros usados en el método independiente de los sub-flujos.....	28
Figura 8. Estructura generalizada del modelo VHM (Morales and Sánchez, 2015).....	30
Figura 9. Estructura esquemática del modelo hidrológico TOPMODEL. Fuente: (Beven et al., 1995).....	32
Figura 10. Mapa Geológico de la Cuenca del Culebrillas y Cuenca del río Chulco. Fuente: ETAPA EP .	37
Figura 11. Precipitación y caudal de la cuenca del Tomebamba	37
Figura 12. Precipitación y caudal de la cuenca del Culebrillas	38
Figura 13. Evapotranspiración real de la cuenca en la estación Culebrillas	38
Figura 14. Evapotranspiración real de la cuenca del Tomebamba.....	39
Figura 15. Flujo Base de la Cuenca Tomebamba Calibración.....	40
Figura 16. Flujo Total Cuenca Tomebamba Calibración	40
Figura 17. Calibración del Flujo Base de la Cuenca Culebrillas	41
Figura 18. Calibración del Flujo Total Cuenca Culebrillas	41
Figura 19. División de la serie de caudales de la cuenca del Tomebamba, eventos de flujos rápidos y flujos lentos independientes	43
Figura 20. División de la serie de caudales de la cuenca del Culebrillas, eventos de flujos rápidos y flujos lentos independientes.....	43
Figura 21. Pendiente de Pareto Q-Q (Cuenca del Tomebamba).....	45
Figura 22. pendiente Exponencial Q-Q (Cuenca del Culebrillas).....	45
Figura 23. Diagrama de cuantiles Pareto, eventos de caudal diario (Cuenca del Tomebamba).....	45
Figura 24. Diagrama de cuantiles Pareto, eventos de caudal diario (Cuenca del Culebrillas)	46
Figura 27. Variación de la humedad en el suelo y la precipitación en la cuenca del Culebrillas	47
Figura 28. Variación de la humedad en el suelo y la precipitación en la cuenca del Tomebamba	48
Figura 29. Modelo de almacenamiento de la cuenca del Culebrillas	48
Figura 30. Modelo de almacenamiento de la cuenca del Tomebamba.....	49
Figura 31. Box-Cox flujo base ($\lambda=0.25$) cuenca del Culebrillas.....	49
Figura 32. Box-Cox flujo base ($\lambda=0.25$) cuenca del Tomebamba	50
Figura 33. Almacenamiento de agua en el suelo versus fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial, cuenca del Culebrillas.....	50
Figura 34. Almacenamiento de agua en el suelo versus fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial, cuenca del Tomebamba	51



Figura 35. Efecto de los antecedentes de lluvia sobre un factor residual de la escorrentía superficial cuenca del Culebrillas.....	52
Figura 36. Efecto de los antecedentes de lluvia sobre un factor residual de la escorrentía superficial cuenca del Tomebamba	52
Figura 37. Parte de almacenamiento, modelo de flujo subsuperficial de la cuenca del Culebrillas	53
Figura 38. Parte de almacenamiento, modelo de flujo subsuperficial de la cuenca del Tomebamba	53
Figura 39. Flujo Total de la cuenca del Tomebamba	54
Figura 40. Flujo Total de la cuenca del Culebrillas	54
Figura 41. Validación de los eventos simulados y observados para eventos de caudal máximo ($\lambda = 0.25$) de la cuenca del Culebrillas	55
Figura 42. Validación de los eventos simulados y observados para eventos de caudal máximo ($\lambda = 0.25$) de la cuenca del Tomebamba	56
Figura 43 Caudales acumulados de la cuenca del Culebrillas	56
Figura 44. Caudales acumulados de la cuenca del Tomebamba	57
Figura 45. Mapa de índice topográfico $\ln(a/\tan\beta)$ de la cuenca del Culebrillas, basado en una grilla raster de 3m., del modelo digital de elevaciones	58
Figura 46. Mapa de índice topográfico $\ln(a/\tan\beta)$ de la cuenca del Tomebamba, basado en una grilla raster de 3m., del modelo digital de elevaciones.....	59
Figura 47. Valores optimizados de Monte Carlo para cada parámetro de TOPMODEL implementado en la microcuenca del Tomebamba	60
Figura 48. Valores optimizados de Monte Carlo para cada parámetro de TOPMODEL implementado en la cuenca de Culebrillas	61
Figura 49. Almacenamiento de la cuenca del Culebrillas (izq.) del Tomebamba (der).....	62
Figura 50. Resultados obtenidos con los modelos para las microcuenca Culebrillas (izq.) Tomebamba (der)	63
Figura 51. Caudales observados y simulados de los modelos hidrológicos TOPMODEL y VHM para la la cuenca del Tomebamba.	64
Figura 52. Caudales observados y simulados de los modelos hidrológicos TOPMODEL y VHM para la cuenca del Culebrillas.....	65
Figura 53. Datos de simulación de los procesos hidrológicos que han producido en época de lluvia para las cuencas del Tomebamba (izq) y Culebrillas (der)	66
Figura 54. Datos de simulación de los procesos hidrológicos que han producido en época seca para las cuencas del Tomebamba (izq) y Culebrillas (der)	67
Figura 55. Escenario de almacenamiento del programa TOPMODEL de las cuencas pareadas en época seca	68
Figura 56. Escenario de humedad del suelo del programa VHM de las cuencas pareadas en época seca..	68
Figura 57. Escenario de almacenamiento del programa TOPMODEL de las cuencas pareadas en época de lluvia	69



Tablas

Tabla 1. Porcentaje de área de cobertura de uso de suelos en la cuenca de estudios.....	19
Tabla 2. Porcentaje de área de cobertura del tipo de suelos en la cuenca de estudios	20
Tabla 3. Lagunas ubicadas en la cuenca del Culebrillas mediante la fotografía aérea	22
Tabla 4. Descripción de los tipos de cuerpos de agua	22
Tabla 5. Lagunas ubicadas en la cuenca del Tomebamba mediante la fotografía aérea	22
Tabla 6. Serie de Datos temporales diarias disponibles de cada equipo	24
Tabla 7. Clasificación general del desempeño de NSE y PBIAS (Moriasi et al., 2007).....	35
Tabla 8. Parámetros de entrada al programa WETSPRO para las 2 cuencas	39
Tabla 9. Método y parámetros para la selección de eventos	42
Tabla 10. Parámetros de la distribución de probabilidad	44
Tabla 11. Parámetros de calibración para el modelo VHM para las cuencas pareadas	46
Tabla 12. Parámetros validados para los caudales de paso en ambas cuencas	53
Tabla 13. Función acumulativa de retraso para la cuenca del Culebrillas.....	57
Tabla 14. Función acumulativa de retraso para la cuenca del Tomebamba	58
Tabla 15. Parámetros óptimos de TOPMODEL para la cuenca del Tomebamba y Culebrillas.....	61
Tabla 16. Eficiencia de los modelos hidrológicos VHM y TOPMODEL.....	64
Tabla 17. Parámetros óptimos de TOPMODEL para la cuenca del Tomebamba y Culebrillas considerando la época seca y lluviosa	67
Tabla 18. Eficiencia de los procesos hidrológicos VHM y TOPMODEL en un período de 90 días.....	67



**Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional**

Maria Verónica Rodas Ochoa en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de la regulación hidrológica de lagunas en una zona de páramo del Austro Ecuatoriano", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 13 de septiembre de 2018

Maria Verónica Rodas Ochoa

C.I: 0104077250



Cláusula de Propiedad Intelectual

María Verónica Rodas Ochoa, autora del trabajo de titulación “Análisis de la regulación hidrológica de lagunas en una zona de páramo del Austro Ecuatoriano”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 13 de septiembre de 2018



María Verónica Rodas Ochoa

C.I: 0104077250



CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES

El páramo es un ecosistema de pastizales alpinos neo-tropicales que cubre la parte alta de la región Andina, entre los 11° N y 8° S de latitud. Estas regiones de montaña proveen de una fuente constante de agua de muy buena calidad, generada desde precipitaciones de tipo orográficas, que permite sustentar ecosistemas, agricultura, regiones rurales y urbanas que de otra forma no existirían (E. Buytaert et al., 2007). Donde la precipitación es una variable importante del sistema climático (Guenni et al., 2008). Según Buytaert & Beven, (2010) el cambio ambiental va desde pequeña escala con los cambios de uso del suelo. Por tanto, se espera que tenga un fuerte impacto en el comportamiento hidrológico.

Es crítico entonces tratar de entender como el clima interactúa con la hidrología de montaña, como los cuerpos de agua superficiales y los ecosistemas serán afectados y como estos cambios se traducirán en impactos sobre el suministro de agua para los ecosistemas, la agricultura y la sostenibilidad de las poblaciones que dependen de ellos (Guenni et al., 2008). Mora (2013) indica que las regiones montañosas suelen capturar la humedad de las masas de aire, lo que ha llevado a una incertidumbre en que el páramo puede llegar a tener ciertos grados de humedad. Por otro lado, Buytaert et al. (2006) indica que, el ciclo del agua en el páramo es desconocido, sobre todo en la vegetación del páramo natural; es por esto la importancia de esta investigación, el conocer el comportamiento de la regulación hídrica del páramo conjuntamente con los reservorios naturales en la cuenca alta del Tomebamba.

En el sur de los Andes Ecuatorianos se encuentra la Cuenca del río Tomebamba, que es considerada unas las cuencas más monitoreadas del Ecuador desde el año 1963 (Mora et al., 2014). La precipitación y la temperatura en esta cuenca varía según su altitud, régimen hidrológico y orientación, dando como resultado temperaturas más cálidas ocurridas dentro de los años de 1978-1984, teniendo una relación directa con el fenómeno de El Niño, o también conocido como Oscilación Sur - ENSO (Amay and López, 2015). La cuenca se encuentra constituida por praderas tropicales alpinas o páramo y bosques nativos (D. Mora et al., 2014), que oscilan entre los 3500 a los 4000 m s.n.m. Esta cuenca se caracteriza por tener varios reservorios naturales, por lo que es considerada área protegida denominada Parque Nacional “El Cajas”. Existen 235 lagunas bien definidas, además de que los ríos Tomebamba, Mazán y Miguir nacen en el páramo alto y abastecen de agua potable a la ciudad de Cuenca. En especial, se hace énfasis en las áreas de lagunas y humedales donde ETAPA-EP monitorea continuamente. De ahí la importancia de esta tesis de maestría, con el aval de la empresa que permitió utilizar su base de datos y proporcionar toda la información base para realizar esta propuesta de investigación.

Por tanto, interesa estudiar el comportamiento del páramo mediante la modelación hidrológica asumiendo una variable extra importante que es el reservorio natural o lagunas. La modelación numérica dentro de la investigación hidrológica es importante, ya que este permite representar de una manera económica y adecuada el sistema evaluado y además permite analizar los efectos de escenarios de alteración sobre su comportamiento hidrológico (F. Duque and Vázquez, 2015)). En ese sentido, un modelo se puede clasificar en concentrado o agregado, semi-distribuido y distribuido.



Dentro de este estudio se pretende realizar la modelación hidrológica mediante dos modelos semi distribuidos el VHM y el TOPMODEL, la diferencia entre estos modelos son las ecuaciones que utilizan cada uno de los subsistemas. Se conoce que la mayoría de modelos semi distribuidos usan las ecuaciones de Darcy para poder simular el flujo de agua en el suelo, el método del servicio de Conservación de Suelos (NRCS, antes SCS) con el fin de simular el caudal y el método semi empíricos para el cálculo del aporte de las aguas subterráneas.

Para la realización de esta investigación, esta tesis se divide en varios subcapítulos. Como primer punto se brinda una breve descripción de casos de estudio en la zona de páramos y su relación con las lagunas. Como siguiente capítulo se describirá la metodología en la cual abarcarán como se recolectaron los datos y el análisis de los mismos, cómo se validaron los datos que limitaciones y delimitaciones se encontraron en el proceso de recolección de datos y su producto final. En un tercer capítulo se plantea la modelación hidrológica mediante los modelos TOP MODEL y VHM, continuando con el cuarto capítulo, que incluye los resultados obtenidos. Finalmente, el quinto capítulo trata las conclusiones establecidas después de analizar los resultados.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El proyecto se encuentra ubicado en una zona de alta vulnerabilidad hidrológica como es el páramo, y, de manera específica en la cuenca alta del Tomebamba. En este contexto, y de la revisión de literatura se demuestra la necesidad de estudiar los principales procesos hidrológicos de este ecosistema que, por un lado, da continuidad a la investigación científica; y, por otro, profundiza en el estudio de la hidrología de estos ecosistemas enfocados en el comportamiento hidrológico del páramo con los reservorios naturales. De esta forma, la sustentabilidad del ecosistema puede ser mejor enfocada y entendida, puesto que la información levantada permitirá establecer adecuadas prácticas de manejo y conservación en beneficio del buen vivir de la población en general.

A su vez, resulta importante destacar que el presente proyecto de tesis se enmarca en un programa de investigación que lleva adelante el PROMAS-Universidad de Cuenca y ETAPA EP dentro de la maestría en Gestión de Recursos Hídricos y con el soporte académico de las siguientes instituciones: La Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), Escuela Politécnica Nacional (EPN).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *OBJETIVO GENERAL*

El objetivo general de esta investigación es cuantificar la regulación hídrica de lagunas en cuencas de páramo presentes en la cuenca alta del río Tomebamba, con dos modelos hidrológicos el VHM y TOPMODEL para asegurar que efectivamente el suelo del páramo tiene una alta capacidad de retención hídrica.

1.3.2 *OBJETIVO ESPECÍFICO*

- Identificar un área de estudio que cumpla con las características de regulación hídrica, es decir se analizará dos cuencas pareadas con mayor y menor número de lagunas que tengan las mismas características hidrológicas.



- Caracterizar el área de estudio mediante la información levantada en campo de las estaciones meteorológicas e hidrológicas obtenidas de la cuenca alta del Tomebamba.
- Seleccionar e Implementar un modelo hidrológico mediante un modelo conceptual semi distribuido para simular los procesos hidrológicos de las 2 cuencas.
- Comparar las cuencas pareadas mediante el modelo matemático, a través la simulación de los procesos hidrológicos que han producido.

1.4 HIPOTESIS

El presente proyecto de investigación tiene como meta aportar e incrementar el conocimiento de los procesos de regulación hídrica en zonas de páramo. Este ecosistema alto andino consiste de una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas (De Biévre et al., 2008). Por tanto, es de suma importancia la comprensión de los procesos de regulación en zonas de páramo, ya que no se cuenta con estudios de las lagunas naturales no definiendo con claridad sus características morfológicas (Mosquera, 2016). Además que la calidad de las aguas provenientes de estas zonas es óptima (Buytaert and Beven, 2010), abasteciendo a más del 60% de la población de la ciudad de Cuenca.

Los lagos en las zonas andinas tropicales cumplen con el papel de regular el flujo y la disponibilidad de agua (Mosquera, 2016), a pesar de su importancia socioeconómica, la hidrología del páramo y sus procesos hidrológicos son muy poco comprendidos (De Biévre et al., 2008).

Por tanto, se pretende descubrir si las lagunas tienen un impacto significativo en la regulación del agua o en la alteración del flujo base. Finalmente, se pretende resolver si el aporte de las lagunas en la cuenca del páramo influye de manera significativa o no en la regulación hídrica ya que actualmente, existe una incertidumbre comparada con la retención morfológica (lagunas), es decir cuánto se está almacenando actualmente en los reservorios naturales sin ninguna intervención humana. Esto puesto que según estudios recientes (D. Mora et al., 2014) influye en los suelos del páramos y de los reservorio de agua natural.



CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

La región montañosa se conoce como “las torres de agua del mundo”, y sobre todo a los ecosistemas de humedales que se encuentran en las montañas de los Andes altos sobre los 3000 m s.n.m., ya que su función es la de suministrar agua confiable para uso urbano, para la agricultura y la industria (Buytaert et al., 2008). Las regiones alpinas neotropicales, o páramos, cubren alrededor de 36.000 km² de los Andes tropicales, formando un cinturón discontinuo que se extiende desde el páramo de Mérida en Venezuela hasta la depresión de Huancabamba en el norte de Perú. Al sur, el páramo está bordeado por el Jalca, que es un bioma de transición entre el páramo y la puna más seca que domina las tierras altas en el sur de Perú y Bolivia (W Buytaert and Beven, 2011).

En las montañas altas o páramo es formado de planicies y valles accidentados de origen glacial con diversidad de lagunas, pantanos y praderas húmedas. Con estas ventajas y con poca presencia humana, la calidad del agua es excelente, y los ríos que descienden desde el páramo tienen un alto y sostenido flujo base (De Biévre et al., 2008). Al igual que en muchas otras regiones montañosas del mundo, los páramos tienden a tener un régimen de precipitación más alto que las tierras bajas circundantes debido a la precipitación orográfica (W Buytaert and Beven, 2011). Debido al terreno montañoso y a la influencia de varios sistemas climáticos (Vuille et al., 2000), la variabilidad espacial de la precipitación en los Andes es alta (Buytaert et al., 2006; Célleri, 2007); por esta razón los páramos ecuatorianos reciben en promedio un 16% más de precipitación que las estaciones en el valle interandino entre 2500 y 3000 m.

Por otra parte las aguas meteóricas que provienen de la humedad atmosférica y que caen sobre la superficie de la tierra (precipitación) oscilan desde 500 mm en los páramos secos alrededor de Chimborazo hasta más de 3000 mm en los páramos más húmedos de la Cordillera Oriental que están influenciados por masas de aire de la cuenca amazónica aproximadamente (W Buytaert and Beven, 2011). Según Buytaert et al., (2006) (Buytaert et al., 2006) el flujo base sostenido es el resultado de la elevada capacidad de regulación del agua del páramo siendo amenazada por un incremento de la actividad humana. La capacidad de los suelos y vegetación de los páramos para almacenar y luego liberar reguladamente el agua es conocida como regulación del agua, siendo éste el origen de lagunas, quebradas y ríos de este ecosistema. Aproximadamente el 70% del agua que llega a las grandes ciudades en los Andes proviene a de los páramos (Vásquez and Buitrago, 2011).

La vegetación en el páramo está formada por gramíneas y arbustos donde existen manchas locales de vegetación arbórea, dominadas por especies indígenas de Polylepis (W Buytaert and Beven, 2011). Muchas de las especies vegetales se adaptan a las condiciones fisicoquímicas y climáticas específicas, como la baja presión atmosférica, la intensa radiación ultravioleta y los efectos secante del viento (Luteyn, 1999). La transpiración está limitada por las bajas temperaturas, la alta frecuencia de niebla, la nubosidad y la alta humedad relativa. Esto resulta en bajas tasas de evapotranspiración global y una alta proporción de escorrentía. Los valores de la evapotranspiración oscilan entre 0.8 y alrededor de 1.5 mm cada día (Buytaert, 2004; Hofstede et al., 1995) y las proporciones de escorrentía del páramo natural varían alrededor del 50-70% (Buytaert et al., 2007).



Los lagos en las zonas andinas tropicales cumplen con el papel de regular el flujo y la disponibilidad de agua (Mosquera, 2016), a pesar de su importancia socioeconómica, la hidrología del páramo y sus procesos hidrológicos han sido muy poco estudiados (De Biévre et al., 2008). Las lagunas tienen un impacto significativo en la regulación del agua o en la alteración del flujo base. Por tanto, se pretende resolver si el aporte de las lagunas en la cuenca del páramo influye de manera significativa o no en la regulación hídrica ya que actualmente, existe una incertidumbre comparada con la retención morfológica (lagunas); es decir, cuánto se está guardando actualmente en los reservorios naturales sin ninguna intervención humana. La descomposición de la materia orgánica en el suelo páramo es muy baja, es por esto cuando hay poca intervención humana siempre se encuentra un suelo humífero de color negro. Gran cantidad de materia orgánica puede adsorber agua por una carga eléctrica pequeña y es por esto que los suelos humíferos tienen una gran capacidad de retención de agua (Hofstede, 2001).

En definitiva, la variabilidad temporal de la precipitación es baja en muchos páramos. Estos procesos hidrológicos son vulnerables a la perturbación. Al ser las cuencas de captación, los páramos dependen del agua meteorológica. Por consiguiente, los cambios espaciales y temporales en el patrón de precipitación pueden tener un fuerte impacto en los procesos hidrológicos, así como en la formación del suelo y en la dinámica de los ecosistemas. De esta manera un modelo hidrológico y la predicción es de importancia en la gestión sostenible de los recursos hídricos (W Buytaert and Beven, 2011).

En un estudio de Fenicia et al., (2008) analiza una cuenca hidrográfica a 380 m de altitud, se llevó a cabo varios experimentos a escala de la parcela para investigar los procesos de captación a pequeña escala y su posible relación con el comportamiento de cuencas a gran escala. Las mediciones estuvieron disponibles para un año hidrológico (2003-2004), mediante un modelo lluvia-escorrentía conceptual. Los resultados mostraron que la tasa anual de interceptación del dosel es aproximadamente el 13% de la precipitación incidental total. Además, la interceptación (durante el mes de noviembre) asciende alrededor del 35% de la precipitación, lo que indica que la evaporación total anual de la interceptación es superior al 43%.

Nash y Sutcliffe, (1970) indican que, para producir pronósticos exactos para cuencas específicas, las experiencias con modelos conceptuales del proceso de escorrentía indican un progreso considerable. Los resultados obtenidos no siempre se presentan de una manera que permita evaluar la eficiencia relativa de estos modelos, ni parece existir un acuerdo general sobre el método de desarrollo y prueba de un modelo para una cuenca o grupo de cuencas. Si se requiriera un modelo únicamente para predecir el flujo de una cuenca particular, sería probablemente adecuado especificar la forma del modelo y los valores paramétricos de tal manera que la producción calculada fuera una reproducción suficientemente cercana de la producción observada. Además, los autores antes mencionados indican que, la simulación debe ayudar a comprender el proceso de conversión de la precipitación en descarga y la importancia de los diferentes elementos en este proceso; sobre todo si se espera utilizar el modelo para cuencas sin registros estableciendo relaciones entre los parámetros del modelo y las características de la cuenca. Por tanto, los parámetros del modelo se fijan mediante optimización o comparación de salidas calculadas y observadas. Cuanto más detallado y complejo sea la simulación, más difícil será establecer los valores de los parámetros, especialmente si son interdependientes; y, por tanto, en la determinación de valores paramétricos,



sólo si la mayor versatilidad del modelo hace que sea mucho más probable obtener un buen ajuste entre la producción observada y calculada.

En la investigación realizada por Morales and Sánchez, (2015), sobre la aplicación del programa VHM se realizó un análisis de la Cuenca del Tomebamba, en la estación Monay para un periodo de 30 años, donde los resultados indicaron que existe una variación progresiva en los parámetros del modelo – escorrentía; donde los valores de eficiencia son aceptables. La modelización realizada en zonas cercanas a cuenca del Tomebamba, mostraron que la modelización ha sido satisfactoria para cuencas pequeñas, sin embargo, el problema principal está con la calidad de los datos de entrada.

En esa misma investigación se realizó la simulación hidrológica con el programa TOPMODEL donde fueron ejecutados para períodos consecutivos de 52 días la microcuenca de 2.58 km², dentro de la cuenca del río Machángara, ubicada al noroeste de la ciudad de Cuenca. Se concluyó que, el juego de parámetros óptimos fue escogido de acuerdo con el valor más alto del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (Beven, 2002). Luego de ello, los diferentes parámetros óptimos fueron analizados de acuerdo con su significado físico y a su dependencia del tiempo. El valor más alto de la eficiencia de Nash y Sutcliffe fue de 0.77, lo que representa una simulación satisfactoria.

Otro estudio realizado por Barrera and Torres, (2010) en la microcuenca de páramo en la zona de Quimsacocha, dentro de la cuenca del Tarqui, se realizó el proceso hidrológico de la microcuenca mediante el modelo TOPMODEL. El modelo había sido calibrado durante un año y logró alcanzar una eficiencia superior a 0.70, indicando que simula apropiadamente la hidrología de las cuencas y sus parámetros representando adecuadamente las características de los suelos.

En la investigación realizada por Buytaert et al., (2010), en la cuenca de Huagrahuma (2.58 km²) entre 3690 a 4100 m s.n.m., ubicada al nor-oeste de la ciudad de Cuenca y con datos entre el año 2001 y 2005. Interpretó varios resultados de la predicción del modelo y el análisis de incertidumbre de los parámetros del modelo revelando importantes conocimientos en la evapotranspiración, generación de escorrentías y flujo de base en el páramo, pero encontraron limitaciones en la variabilidad espacial de la precipitación, encontrando diferencias en las representaciones del modelo. Para el estudio se realizó como primera alternativa con el modelo topográfico TOPMODEL ya que, representa bastante bien la hidrología del páramo, ya sea por la importancia del flujo saturado, los altos gradientes en pendiente y los suelos poco profundos. Este modelo funciona mejor durante los períodos cortos, con eficiencias de hasta 0.89 (Barrera and Torres, 2010).

Otra investigación realizada por Martínez, (2015) en cuatro microcuencas de alta montaña ubicadas en la cuenca alta del Río Bulubulu (ortigas) , en la cuenca del Río Chanchán (Lise), y otras 2 en la cuenca del río Tomebamba (Pajonal y Pinos), todas ubicadas al sur del Ecuador. El objetivo fue definir el estado de conservación del páramo, empleando el modelo WETSPRO para la separación de los flujos y se determinaron otros índices hidrológicos comparando así la respuesta hidrológica de las cuatro microcuencas. Los resultados del balance hídrico evidenciaron una mayor pérdida de agua por evapotranspiración en las cuencas alteradas. Además, se determinó que, los porcentajes de caudal base, subsuperficial y superficial revelan la capacidad de amortiguamiento ante eventos de precipitación. Se muestra que las cuencas de



bosque nativo y pajonal presentan caudales específicos elevados y una buena capacidad de regulación, comprobando, por tanto, la importancia del tipo de suelo y de la topografía.

Con todas estas investigaciones y según algunos autores citados en (Vuille, 2013) revelan que los ríos provenientes del páramo se caracterizan por tener un caudal base elevado, por la capacidad de retención de agua de los suelos y de la vegetación. En adición, se enfrentan con la amenaza del cambio climático. Tal situación se debe a que las temperaturas más altas provocan mayores tasas de evapotranspiración y, por tanto, una menor producción de agua de los páramos (Andrade and Ríos, 2014).

A medida que la ciudad de Cuenca se desarrolla progresivamente, ocurren cambios de usos de suelo en las zonas altas de los páramos, ya sea por intervención de la población aledaña a la zona o por construcciones indebidas lo que genera alta contaminación y donde se ven afectados el futuro de nuestro líquido vital. Es por esto que, la preocupación que tenemos todos los cuencanos sobre el futuro de los páramos que rodean nuestra ciudad, es lo que nos lleva analizar la regulación del agua en esta zona de estudio. En especial las áreas de lagunas y humedales donde ETAPA-EP monitorea continuamente, de ahí la importancia de esta tesis de maestría, con el aval de la empresa que permite emplear su base de datos y proporcionar toda la información base para realizar esta investigación propuesta.



CAPITULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS

A medida que la ciudad de Cuenca se desarrolla progresivamente, ocurren cambios de usos de suelo en las zonas altas de los páramos ya sea por intervención de la población aledaña a la zona o por construcciones indebidas. Esto genera alta contaminación y afectación al balance hídrico de la zona de estudio; razón por la cual la preocupación de la ciudad de Cuenca, va enfocada sobre el futuro de los páramos que les rodean, es lo que lleva analizar la cantidad del agua en esta zona de estudio.

3.1 AREA DE ESTUDIO

3.1.1 La cuenca experimental

El área de estudio corresponde a la cuenca de río Tomebamba, la misma que es parte de la cuenca del Río Paute, y se localiza al noroeste de la ciudad de Cuenca, en el sur de los Andes ecuatorianos (Figura 1). La cuenca del río del Tomebamba se delimita a partir de la estación meteorológica Matadero en Sayausí, debido a que desde este punto se está monitoreando el caudal de la cuenca. De esta zona se conoce que, durante la estación seca, los flujos base de los reservorios son sostenidos por el ecosistema de páramo proporcionando alrededor del 90% del agua de Cuenca. Como tal, los procesos hidrológicos de los páramos circundantes son importantes para el desarrollo socioeconómico local (Buytaert and Beven, 2010).

En la primera fase de estudio se estableció la zona o cuenca para el análisis de la información hidrológica. En la Figura 1 se dispone un mapa de ubicación de la Cuenca alta del Tomebamba, seleccionada para el análisis. La microcuenca se encuentra a 5 km al oeste de la ciudad de Cuenca a la entrada del parque Nacional “El Cajas” (área sombreada).

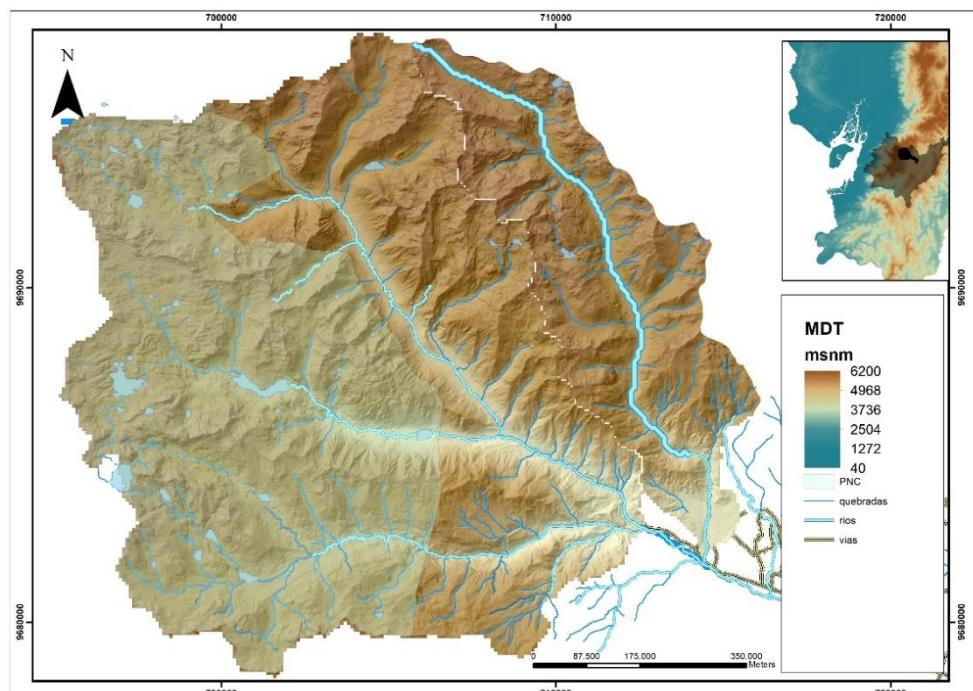


Figura 1. Ubicación de la cuenca de estudio
Fuente: (ETAPA EP., 2017)



3.1.2 Precipitación

El régimen de lluvias de la cuenca del Tomebamba es oriental, es decir que, el estiaje corresponde a los meses de octubre y marzo, los períodos lluviosos entre abril y septiembre. Sin embargo, presenta una pequeña influencia del régimen del Océano Pacífico. La precipitación ponderada anual de la cuenca alta del Tomebamba es de 1012 mm/año; y para la estación de Matadero-Sayausí, la precipitación anual promedio es de 907 mm/año (PROMAS, 2011).

Los picos de lluvia oscilan entre los meses de abril y octubre en promedio, característica principal del páramo en la región interandina del sur del Ecuador; existe abundancia de precipitación, por lo que, supone un aumento de la humedad relativa del aire y la presencia de lluvias orográficas abundantes; la orientación con respecto a los vientos dominantes y el sol es de resultado vital (Morales and Sánchez, 2015).

3.1.3 Clima

Para la cuenca alta, el clima de montaña (1200 - 4000 m s.n.m.), se caracteriza por una gran variedad de temperaturas y precipitaciones con dos máximos en abril y en octubre. La influencia de la altitud en la temperatura es importante. Las zonas montañosas suelen presentar condiciones climáticas diferentes del clima zonal donde se encuentran. “El descenso normal de las temperaturas con respecto al incremento de la distancia en relación con la superficie terrestre, tiene un valor de 6.5 °C/1000m.” (Tapia A, 2009)

3.1.4 Uso del Suelo

El tipo de suelo predominante en el área de estudio es el páramo (Figura 2), además se corrobora esta información con la Tabla 1 ya que, el suelo páramo se encuentra alrededor del 80%. Durante varias décadas fue utilizado para pastoreo. Últimamente las comunidades iniciaron el desarrollo del páramo con actividades agrícolas y existen algunas evidencias de que esta interferencia humana alteró la hidrología en algunas microcuenca (Morales and Sánchez, 2015), como se puede observar que el porcentaje de cultivos es el suelo que le sigue al páramo entre 3-16%.

Tabla 1. Porcentaje de área de cobertura de uso de suelos en la cuenca de estudios

Descripción	Culebrillas	Tomebamba
Bosque	3.9%	4%
Cultivos	16%	3%
Pasto	0%	3%
Afloramiento rocoso	0%	0.06%
Nieve y hielo	0%	0.04%
Paramo	80%	87%
Cuerpo de agua natural	0.1%	2%

El páramo consiste en planicies y valles accidentados de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas. Como resultado de la poca presencia humana, la calidad del agua en la zona de estudio es excelente, y los ríos que descienden desde el páramo tienen un alto y sostenido flujo base. En la parte alta de la hoyada, existe un conjunto de valles, lagos, altas vistas y formaciones rocosas de páramo. El suelo del páramo se encuentra recubierto por una

gran capa de paja además de una gran variedad de plantas en forma de almohadilla, que se constituyen en verdaderos reservorios de agua en el suelo. También se encuentran un sin número de especies de pequeños arbustos. Una característica común del páramo es la presencia de temperaturas muy frías. La temperatura media a 3500 m está alrededor de 7° C (Buytaert, 2004). Por otro lado, el consumo natural de agua en el páramo es muy bajo, debido a la predominancia de pajonales y de hierbas xerofíticas con características de baja evaporación, a pesar de la radiación alta a estas altitudes y latitudes. Como consecuencia un gran excedente de agua está disponible para ser evacuado por los ríos que descienden del páramo.

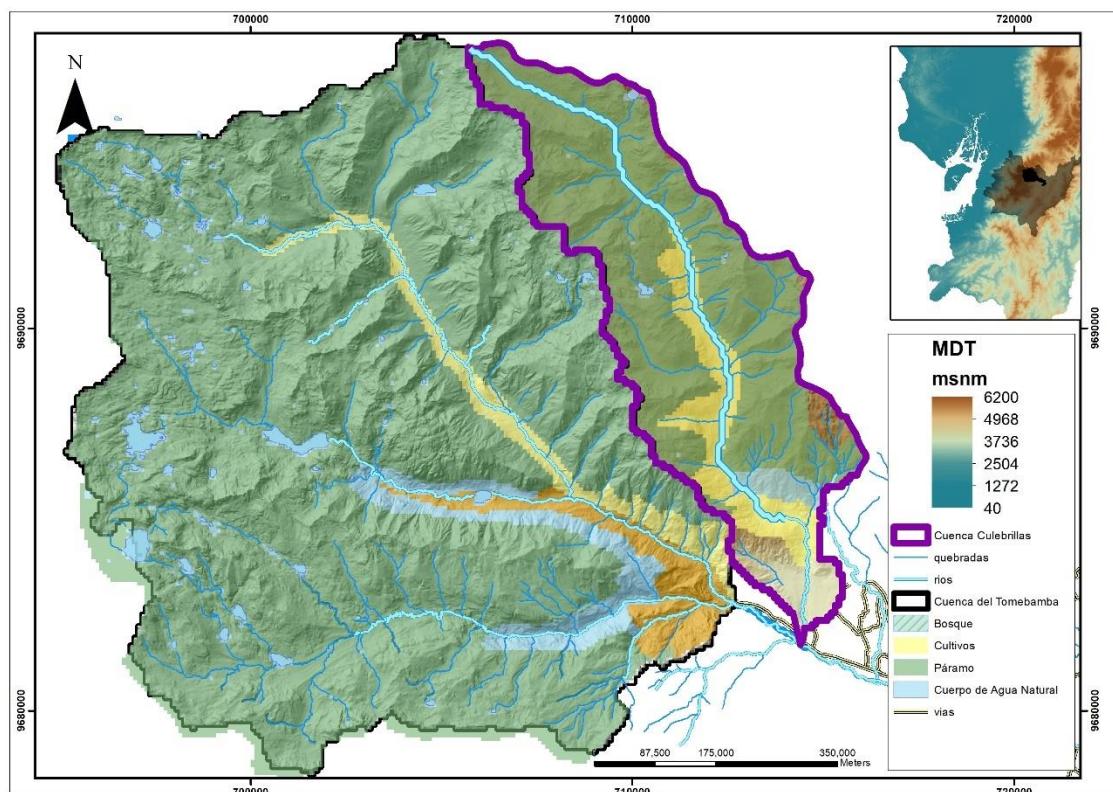


Figura 2. Uso de suelo del área de estudio Fuente: FAO, UAZUAY

3.1.5 Suelo

El mapa de suelos parte de la descripción de las zonas agroecológicas (Figura 3), según Dercon et al., (1998), define a estas áreas en las cuales el clima, la fisiografía y el patrón del suelo se comportan de una manera uniforme. Cabe indicar, que el páramo cuenta con un área aproximada de 113.794 ha (alrededor del 80%), y el tipo de suelo que resalta de esta Cuenca es el inceptisol (Tabla 2); se caracteriza por ser un suelo joven todavía en evolución, además son suelos muy poco meteorizados y desarrollados, no presenta acumulación de materia orgánica, hierro o arcilla (Ibáñez-Asensio et al., 2011).

Tabla 2. Porcentaje de área de cobertura del tipo de suelos en la cuenca de estudios

Descripción Tipo de suelo	Culebrillas %	Tomebamba %
Ultisol	12%	5%



Eriales	2%	2%
Cuerpos de Agua	0.6%	2%
Inceptisol	82%	86%
Alfisol	3%	4%
Mollisol	0.3%	
Vertisol	0.1%	1%

Los suelos del Austro es un medio pedogenéticos (Dercon et al., 1998). En la Tabla 2 se observa que el ultisol es el suelo que le sigue al inceptisol alrededor del 10%, se encuentran en amplio rango de altura de 1600 a los 3.200 m s.n.m., se caracterizan por ser un material arcilloso proveniente del terciario, además se utilizan para algunos tipos de cultivos (Dercon et al., 1998). Es por esta razón que en esta zona hay uso de suelo mixto entre los cultivos, se utilizan para algunos cultivos como el maíz (Dercon et al., 1998).

El carbón orgánico típicamente está alrededor del 10 %; en sitios húmedos (>900 mm/año). Los contenidos de carbón orgánico se encuentran por encima del 40 % (Morales and Sánchez, 2015).

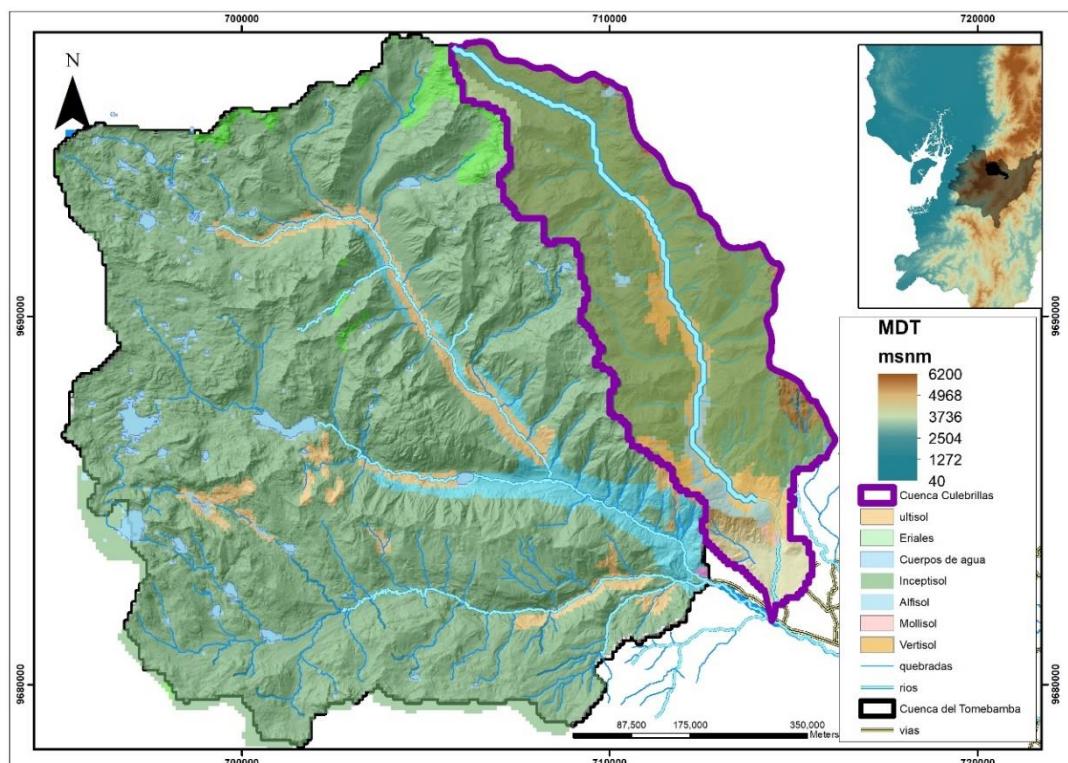


Figura 3. Tipo de suelo del área de estudio Fuente: FAO, UAZUAY

3.1.6 Identificación en la cuenca alta del Tomebamba 2 cuencas pareadas

Una vez identificadas las características hidrológicas de la cuenca de estudio, se cuenta con 2 cuencas pareadas (Figura 4). La cuenca sin lagunas (Culebrillas), cuenta con un área de 55 km² aproximadamente, de la cual existen 3 lagunas identificadas en la fotografía aérea con una resolución espacial de 30 metros (Tabla 3). ETAPA EP monitorea la cuenca con una estación meteorológica PTAP antes de la captación de la planta de Sayausí y la estación hidrológica Culebrillas.

*Tabla 3. Lagunas ubicadas en la cuenca del Culebrillas mediante la fotografía aérea*

Cuerpos de Agua	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Laguna Cushnihuaycu	70300	2812
laguna Estrellacocha	9800	392
laguna Pucacocha	85200	3408

La cuenca con lagunas o Tomebamba se denomina así debido a que atraviesa el río Tomebamba a lo largo de la cuenca; cuenta con un área de 232 km² aproximadamente. Dentro del estudio realizado por Mosquera, (2016) identificó 202 lagos de origen glaciar en el Parque Nacional Cajas (PNC); de los cuales se describen como lagunas, charca y lagos por su tamaño (Tabla 4).

Tabla 4. Descripción de los tipos de cuerpos de agua

Descripción	Rango mínimo m ²	Rango máximo m ²
Charca	0.59	≤89.88
Lagunas	>89.88	≤92959.06
Lagos	>92959.06	14022606.29

Fuente: (Mosquera, 2016)

Por tanto, en ese estudio identificó a 8 lagunas, 13 charcas y 32 lagos, con un total de 53 masas de agua que se encuentran dentro del área de estudio, para el respectivo estudio se denominarán a todos como lagunas. Además, se identificaron 7 lagunas fuera del PNC mediante un rastreo y análisis en la fotografía aérea. ETAPA EP monitorea la cuenca con 5 estaciones meteorológicas y 3 estaciones hidrológicas.

Las 53 lagunas monitoreadas cuentan con un volumen aproximado de 36'775,645.1 m³, las 7 lagunas identificadas mediante la fotografía aérea cuentan con un volumen aproximado de 48167.81 m³. El volumen de las 3 lagunas en la cuenca del Culebrillas es de aproximadamente de 6612.2 m³. Por esta razón se considera a la del Culebrillas como la cuenca sin lagunas ya que, el aporte de la masa de agua es el 0.01% con respecto a la cuenca del Tomebamba.

Tabla 5. Lagunas ubicadas en la cuenca del Tomebamba mediante la fotografía aérea

Cuerpos de Agua	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Lago 1	159407	43039.89
Laguna 1	5279	211.16
Laguna 2	63604	2544.16
Laguna 3	40846	1633.84
Laguna 4	15514	620.56
Laguna 5	1270	50.8
Laguna 6	1685	67.4

Cabe indicar que, la diferencia del área que existe entre las 2 cuencas no se ha tomado en cuenta en este estudio, ya que en el estudio se resume a caudales específicos. Para el análisis de la cuenca del Tomebamba, se considera los caudales observados de la estación Tomebamba DJ Mazán siendo el cierre de esa microcuenca, y para la cuenca de Culebrillas, se considerará los caudales observados en la estación PTAP.

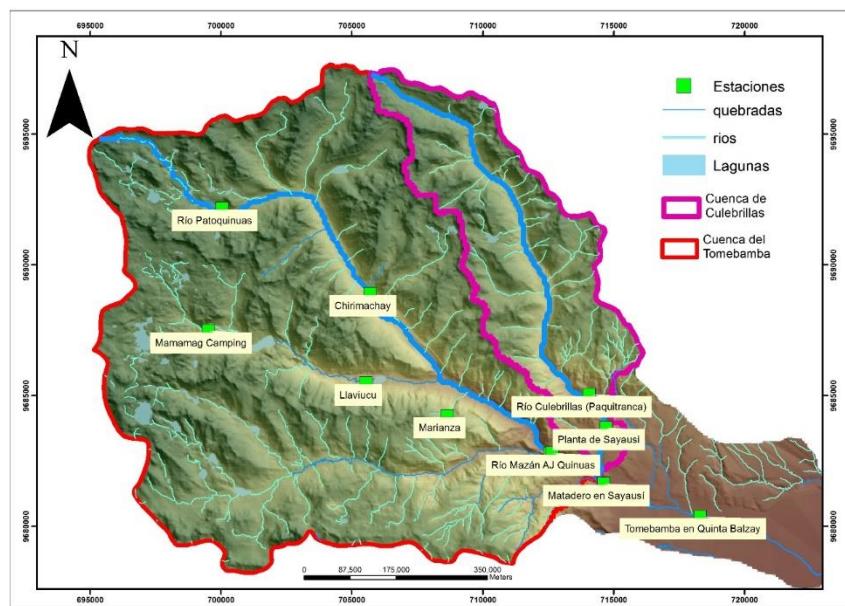


Figura 4. Cuencas pareadas y distribución de estaciones hidrometeorológicas disponibles; Fuente: ETAPA EP

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1 Recolección y depuración de la base de datos

Para determinar los procesos hidrológicos y fundamentalmente el flujo base aportante de las lagunas dentro de la zona de estudio, se debe tener en cuenta que las características hidrológicas sean similares (suelo, clima, tipo de suelo, temperatura, geología). Por esta razón, dentro de la Cuenca del río Tomebamba, se analizarán dos subcuencas (con y sin lagunas). Las subcuencas seleccionadas cubren un gradiente altitudinal entre 3500 y 4000 m s.n.m. Esta zona de páramo se cuenta con una base de datos extensa gracias a la red hidrográfica instalada por ETAPA EP disponible desde el año de 2014 hasta la presente fecha.

Adicionalmente, se cuenta con información a detalle de 202 lagos (batimetrías) dentro del Parque Nacional Cajas (zona sombreada Figura 1.), realizada como parte la de tesis de maestría de Mosquera (2016). Este estudio fue financiado y validado por ETAPA EP, el mismo que sirvió como base para el proyecto “Características morfométricas y el régimen de estratificación térmica de los principales lagos del Parque Nacional Cajas (PNC)”. El estudio consideró una superficie de 285 km². Cabe destacar que el PNC es un sistema de montaña conformado por los tributarios del Océano Pacífico y Atlántico, donde el 34% corresponde a las nacientes de las cuencas de los ríos Balao y Cañar, y el 66 % corresponde a la naciente de la cuenca del río Paute (subcuencas del río Tomebamba y del Yanuncay), respectivamente.

Para el análisis de caracterización se empleó el software ArcGIS 10.2, en la cual se modeló el terreno (DEM) con topografía a detalle (3x3m), así como los usos de suelo, geología, geomorfología. Los recursos a emplearse para analizar las cuencas pareadas fueron la topografía a nivel general que actualmente se encuentra disponible a escala: 1:5.000 y la orto foto de la ciudad de Cuenca, del



año 2015 (“Instituto Geográfico Militar,” 2013).. Esta información es proporcionada por ETAPA EP.

La base de datos generada cuenta con la información del modelo digital de elevación, además se obtuvo los usos de suelo con información de la Universidad del Azuay y la FAO (FAO, 2001; UAZUAY, 2008), y para la obtención de las taxonomías se obtuvo de la Secretaría de Planificación del Ecuador (ODEPLAN, 1998). Finalmente, de la base de datos de ETAPA EP, se cuenta además con temperatura máxima, mínima, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento de cada estación.

La serie de datos disponible para cada estación se presenta en la Tabla 6, la resolución temporal de los datos hidrológicos y meteorológicos es diario y la ubicación espacial de las estaciones hidrológicas y meteorológicas se puede observar en la Figura 4.

Tabla 6. Serie de Datos temporales diarias disponibles de cada equipo

Estación	Inicio de serie	Fin de serie	Hidrológicos	Meteorológicos	% Datos Vacíos
Labrados	Ene-15	May-18	x		17%
Chirimachay	Dic-09	Ene-18	x	x	11%
Culebrillas Paquitrancal	Jun-14	Feb-18	x		14%
Llaviucu	Ene-16	May-18		x	57%
Mamamag Camping	May-14	Abr-18		x	15%
Mazan AJ Quinuas	Jun-14	May-18	x		3%
Patoquinuas	Ago-14	May-18	x		26%
Sayausi PTAP	May-14	May-18		x	12%
Tomebamba DJ Mazán	Jun-14	May-18	x		4%

3.2.2 Procesamiento de Información

De la base de datos, la información de precipitaciones promedias diarias entregada por ETAPA EP y PROMAS se validó mediante la aplicación de pruebas estadísticas no paramétricas como las curvas de doble masa, eliminando datos dudosos que podrían deberse a errores de medición de los equipos (Tabla 6). Para el relleno de datos faltantes se emplearon análisis de regresión y técnicas de correlación con otras estaciones (Martínez et al., 2017).

Los caudales medios diarios a lo largo de toda la serie de tiempo, se realizó el relleno por medio del método de curvas de doble masa.

Dada la serie de datos de clima, Temperatura, humedad y radiación solar, se procedió al cálculo de la evapotranspiración potencial aplicando el modelo de FAO Penman-Monteith (Barrera and Torres, 2010).

3.2.3 Cálculo de la precipitación media sobre una cuenca

El cálculo de la precipitación media en una cuenca o un área, se basa en la información de los datos de las estaciones meteorológicas. Esto se obtiene a partir de la ponderación de los datos de precipitación que se tiene de las estaciones de la cuenca del Tomebamba y de la cuenca del Cu-



lebrillas. Es necesario que la distribución de las estaciones en la cuenca sea bastante uniforme en zonas bajas y adecuadamente elegida en zonas de montaña.

Para determinar la precipitación media de la cuenca por medio del método de los polígonos de Thiessen. La red poligonal se traza formando los polígonos mediante las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones.

El método consiste en que cada estación es representativa del área del polígono que la encierra, de manera que la precipitación media de la superficie limitada por cada polígono es la que se registra en la estación meteorológica correspondiente. Por tanto, la precipitación media de la cuenca se obtiene sumando los productos de las precipitaciones de cada estación por el área del polígono correspondiente y dividiendo la suma entre el área total de la misma cuenca:

$$P = \frac{\sum p_n a_n}{A}$$

Donde:

P precipitación media de la cuenca.

p_n precipitación media de cada polígono (precipitación media de la estación limitada por cada polígono).

n número de estaciones meteorológicas localizadas dentro de la cuenca.

A área correspondiente a cada polígono

Las áreas de los polígonos se calculan mediante el sistema de información geográfica ARCGIS 10.2.

3.3 SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO

Para que un modelo pueda predecir correctamente la variación de caudales, los datos de ingreso ya sea precipitación, evapotranspiración deben representar correctamente lo que realmente ocurre en las microcuenca (Buytaert et al., 2004). Es por esta razón que dentro de esta investigación la versatilidad de los modelos hidrológicos sería proporcionar un marco conceptual para estudiar las relaciones entre el clima, las actividades humanas y los recursos hídricos (Legesse et al., 2003).

Los modelos hidrológicos han sido desarrollados con la finalidad de comprender los procesos hidrológicos, (Martínez, 2015). Por tanto, es de vital importancia el nivel de detalle para la representación de los diferentes procesos del ciclo hidrológico a nivel de cuenca (El-Nasr et al., 2005). Se han considerado dos modelos hidrológicos dentro de esta investigación, el modelo hidrológico TOPMODEL desarrollado por Keith Beven y Kirkby en el año 1979; y el modelo VHM desarrollado por Willems en el año 2009.

TOPMODEL se ha desarrollado para simular las condiciones del páramo, y como parte de estudio ha sido demostrado en una cuenca pequeña Huagrahuma ubicado en el Austro Ecuatoriano (W Buytaert and Beven, 2011). En su única aplicación en Latinoamérica (Barrera and Torres, 2010). De esta cuenca las principales características se destacan la topografía accidentada del lugar, la presencia de lagunas aisladas y la alta porosidad que induce a una alta capacidad de infiltración. La capacidad de infiltración implica la generación de escorrentía en áreas saturadas como proceso



dominante (Martínez, 2015), las cuales pueden ser identificadas por medio de la estimación del índice topográfico (Buytaert and Beven, 2011).

El modelo VHM, fue desarrollado por el laboratorio de Hidráulica de la Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica; el modelo tiene como datos de entrada la precipitación media, el caudal observado y la evapotranspiración, dando como resultados los datos de caudal.

3.3.1 MODELO VHM

VHM es una abreviación holandesa para “generalizar un modelo estructural conceptual y parsimonioso de identificación y calibración” siguiendo el proceso desarrollado por Willems (Taye et al., 2011); requiere de datos de entrada como la precipitación media, la evapotranspiración y los subflujos separados en flujo base, superficial y subsuperficial; esta separación se realiza mediante la herramienta WETSPRO.

3.3.1.1 Herramienta WETSPRO Separación del flujo

Una serie temporal de descargas totales de lluvia-escorrentía se pueden agrupar en grandes clases en función de los diferentes órdenes de magnitud de las respuestas de subflujo (flujo superficial, sub-superficial y base) a la precipitación (Willems, 2008). Se aplica una generalización del filtro Chapman que consiste en la variación de tiempo de una fracción del caudal total que está relacionado con el componente del flujo filtrado (Ochoa and Rodas, 2009). Su interpretación física se basa en el concepto del modelo lineal, propuesto por Chapman, (1991) debido a la vinculación directa entre los parámetros del filtro digital recursivo y las características hidrológicas agrupadas de la cuenca de captación en estudio.

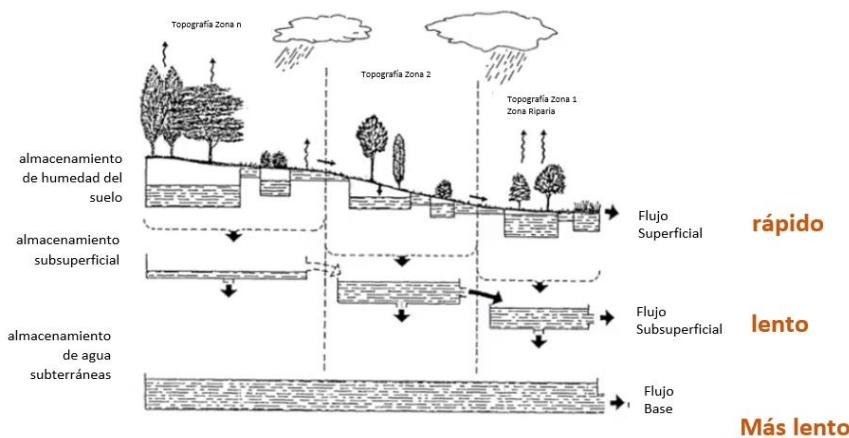


Figura 5. Diagrama de técnicas de separación de flujos propuestas por Chapman, (1991). Fuente: (Willems, 2009)

La separación de flujos (Figura 5) permite la evaluación por separado de los subflujos de precipitación por pérdida, además de que, los procesos del modelo subterráneo requieren que las series observadas de escorrentía total se dividan en sus subflujos. Por tanto, la separación de flujos se realiza con la herramienta Water Engineering Series de Tiempo PROcessing tool (WETSPRO por sus siglas en inglés). Sin embargo, según Willems, (2004) en la región andina del Ecuador, el software debe ser usado con precaución ya que no es siempre fácil distinguir entre el flujo su-



perficial y subsuperficial debido al horizonte orgánico rico y poroso de los Andosoles. Por otra parte se les conoce como flujos lentos a los flujos subsuperficiales y al flujo base debido a que, la geomorfología propia de las microcuenca de montaña en la zona consiste de un suelo superficial relativamente poroso sobre roca que no permite una separación apropiada del flujo lateral subsuperficial y el flujo base (Crespo et al., 2010; Ochoa and Rodas, 2009).

El programa utilizado para la separación de los flujos es el WETSPRO mediante la técnica del filtro digital numérico basado en el concepto de modelo de reservorio lineal (Ecuación 1).

$$b(t) = \alpha b(t-1) + (1-\alpha) \left(\frac{q(t-1) + q(t)}{2} \right)$$

Ecuación 1. Modelo del reservorio lineal

Donde:

$b(t)$ caudal de salida

$q(t)$ caudal de entrada

$$\alpha = \exp\left(-\frac{1}{k}\right)$$

Ecuación 2. Tiempo de constante de recesión

k constante del reservorio o “tiempo de recesión”. Δt intervalo de tiempo $[t-1, t]$.

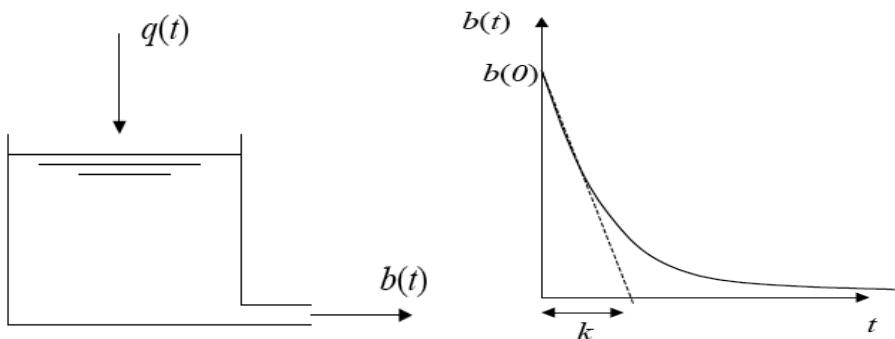


Figura 6. Modelo de reservorio lineal

3.3.1.2 División de la serie de tiempo en eventos de flujo rápido y lento

Los eventos de flujo rápido y lento son obtenidos del programa WETSPRO. El procedimiento se basa en la diferencia de las magnitudes de las constantes de recesión de los sub-flujos. El flujo base es primero separado del caudal total de precipitación-escorrentía. A continuación, el flujo sub-superficial es separado de la combinación del caudal de escorrentía superficial y sub-superficial.

Las constantes de recesión de los sub-flujos pueden ser calibrados como el valor promedio de la inversa de la pendiente en los períodos de recesión Ecuación 3. Cuando se considera un número de tiempos de paso durante los períodos de recesión, la constante de recesión puede ser calculada de acuerdo con:



$$\frac{\ln(q(t-s)) - \ln(q(t))}{s} = \frac{1}{k}$$

Ecuación 3. Promedio de la inversa de la pendiente

Donde:

q = caudal (m³/s)

t = número de tiempo de pasos

s= constante de recesión

3.3.1.3 Extracción de valores extremos de flujo rápido y lento

El programa WESTPRO incluye un sub-modulo para la extracción de los POT (Peak-Over-Threshold), basado en tres métodos:

- Método basado en el flujo base:
- Método basado en flujo base + flujo sub-superficial.
- Método independiente de los sub-flujos:

Dos picos sucesivos son considerados independientes cuando el tiempo p entre dos picos es más grande que la constante de recesión k, y cuando el caudal mínimo entre esos dos picos es más pequeño que una fracción f del caudal pico.

$$p > k \quad y \quad \frac{q_{min}}{q_{max}} < f$$

Un último criterio es necesario para evitar que pequeños picos máximos sean seleccionados

$$q_{max} > q_{lim}$$

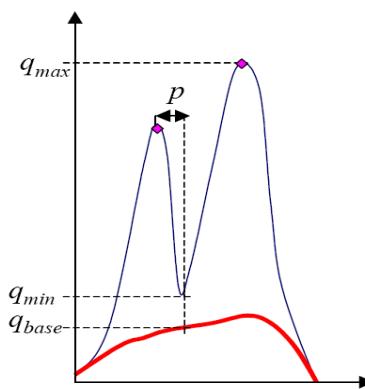


Figura 7. Parámetros usados en el método independiente de los sub-flujos



3.3.1.4 Análisis de valores extremos

De los resultados obtenidos de los valores extremos, éstos son analizados mediante la herramienta ECQ¹. Uno de sus principales usos será el de identificar las curvas IDF para diferentes períodos de retorno. Dentro de esta tesis no se analiza los valores extremos, sin embargo, se explica brevemente su uso- además de que, se convierte en una herramienta importante que podría ser aplicada en estudios posteriores.

3.3.1.4.1 Distribución de valores extremos

Los valores extremos son ajustados a la Distribución Generalizada de Pareto (GPD) con la siguiente expresión matemática:

$$G(x) = 1 - \left(1 + \gamma \frac{x - x_t}{\beta}\right)^{-1/\gamma} \quad \text{si } \gamma \neq 0$$

$$G(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - x_t}{\beta}\right) \quad \text{si } \gamma = 0$$

donde γ es el índice de valores extremos y determina la forma a la cola de la distribución.

Para identificar a qué distribución pertenecen los datos, se analiza la cola de la distribución con ayuda de los gráficos de cuantiles (Q-Q Plot):

- La cola de la distribución puede ser considerada normal ($\gamma=0$) cuando:
- La cola de la distribución es pesada ($\gamma>0$) cuando:
- La distribución de la cola es liviana ($\gamma<0$) cuando:

3.3.1.4.2 Período de retorno

Si $G(x)$ representa la distribución de probabilidad de los valores extremos sobre un umbral x_t , calibrado para t observaciones en n períodos, el “periodo de retorno” T de un nivel de excedencia es igual a:

$$T = \frac{n}{t} \frac{1}{1 - G(x)}$$

Ecuación 4. Número de años

Donde:

$G(x)$ distribución de probabilidad sobre el umbral x

t observaciones

N número de períodos

¹ ECQ: Hydrological extreme value analysis tool



3.3.1.5 Calibración del Modelo

En la Figura 8 se observa la entrada de precipitación del modelo, donde es separada en diferentes fracciones que contribuyen a los diferentes subflujos mediante una válvula de distribución de tiempo variable.

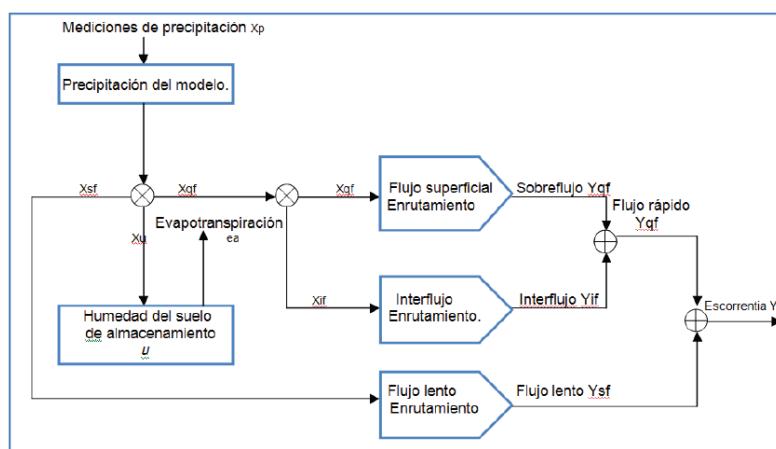


Figura 8. Estructura generalizada del modelo VHM (Morales and Sánchez, 2015)

- La serie $X_{QF}(t)$ representa la porción de lluvia que contribuye al flujo rápido, y pueden ser subdivididos en las porciones de lluvia $X_{OF}(t)$ que va al flujo superficial y $X_{IF}(t)$ que va al interflujo.
- La serie $X_{SF}(t)$ es la porción de lluvia que va al flujo lento, y $X_U(t)$ de la escorrentía total que es la suma de las partes de escorrentía del flujo rápido y lento. Estas porciones de lluvia son fracciones (f) de la lluvia de entrada x .
- Las fracciones f representan en una cuenca de forma agrupada los efectos de los procesos de separación de flujo. (infiltración y percolación). Con el fin de llegar a la continuidad de agua lluvia.

La variabilidad del tiempo de las fracciones f_{QF} y $f_{U,O}$ la regulación de la válvula, se encuentra en casi todas las estructuras del modelo conceptual relacionando la variabilidad del tiempo con la humedad del suelo, o la relativa fracción de humedad, la ecuación típica aplicada es la ecuación lineal Ecuación 5 o la ecuación exponencial Ecuación 6:

$$f(t) = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{u(t)}{u_{max}}$$

*Ecuación 5. Ecuación lineal*

Donde:

U_{max} máxima capacidad de almacenamiento del suelo

U humedad de suelo

t tiempo

a_1 y a_2 parámetros del modelo

$$f(t) = a_1 \exp(a_2 \frac{u(t)}{umax})$$

Ecuación 6. Ecuación exponencial

Todas las fracciones tienen valores entre 0 y 1. Las Proporciones relativas de estas fracciones de los diferentes subflujos están dadas por las variables w.

$$x_{QF}(t) = \frac{f_{OF}(t)}{f_{TF}(t)}$$

Ecuación 7. fracción de escorrentía del flujo rápido de la escorrentía total y.

$$x_{OF}(t) = \frac{f_{OF}(t)}{f_{QF}(t)}$$

Ecuación 8 fracción de la escorrentía del flujo rápido.

El almacenamiento u es una representación agrupada del total de la superficie del suelo, y el almacenamiento de agua en el suelo en la cuenca, que no contribuye a la escorrentía y que puede dar lugar a la evapotranspiración. Porque para la mayoría de las cuencas de almacenamiento la humedad del suelo se está llevando a la mayor fracción de este, se vacía por evapotranspiración real $e_s(t)$ que es una fracción de la evapotranspiración potencial $e_p(t)$. La serie de e_p es un dato de entrada para el modelo.

Luego de la separación de flujos, estos son transferidos a descargas y escorrentía mediante los modelos de enrutamiento. Los modelos de reservorio lineales son los más utilizados para estos enrutamientos, debido a que tienen recesiones exponenciales del flujo durante largos períodos de tiempo seco, similar a lo que se observa típicamente en series de escorrentía.

Una vez que se obtienen estos datos se procede a la calibración de los parámetros a ser utilizados en el modelo y termina con una validación entre los caudales observados y los caudales modelados.

Se ingresan los datos de entrada (flujos separados, los eventos independientes), la precipitación media y la evapotranspiración.

En la calibración de los parámetros para el suelo, se evaluarán la humedad máxima del suelo, la humedad de máxima evapotranspiración, la humedad inicial del suelo y los coeficientes c_1 y c_2 que serán los propios parámetros que calibrar.



Se deberá calibrar el modelo subsuperficial y superficial, en los que se evaluarán dos partes, una dedicada a la contribución al acumulado del agua en el suelo, evaluando los parámetros c1 y c2, y otra en la que se evaluará la contribución al flujo en particular, con los parámetros c3 y c4.

Se calibrarán además los diferentes tipos de flujos, en los que se deberán introducir como valores la constante de recessión y el caudal inicial para cada tipo de flujo que se obtuvieron del WETS PRO. Se evaluará los picos y el flujo lento, en este solamente se introducirá el valor de lambda donde sea necesario debido a la transformación Box-Cox.

Finalmente, los datos acumulados se presentarán los resultados de la calibración del modelo, los resultados consisten principalmente en descargas o caudal, pero con la posibilidad de verlos separados por flujos (Willems, 2004b).

3.3.2 TOPMODEL

TOPMODEL es un modelo hidrológico-topográfico para reproducir el comportamiento de las cuencas distribuida o semidistribuido; en particular la dinámica superficial y subsuperficial de las áreas contribuyentes, característica que aprovecha la homogeneidad y poca profundidad de los suelos y, por lo tanto, simula de mejor manera el comportamiento de las microcuencas de páramo. Considera dos objetivos (Barrera and Torres, 2010):

- Desarrollo de un modelo práctico de simulación.
- Desarrollo de una estructura teórica en la que se distingue procesos hidrológicos, problemas de escala y de realismo.

En la Figura 9 se observa los flujos por componentes; el caudal total, escorrentía superficial, escorrentía superficial por exceso de infiltración, escorrentía superficial por exceso de saturación, flujo vertical, flujo subsuperficial, flujo base y enrutamiento del agua en el canal principal.

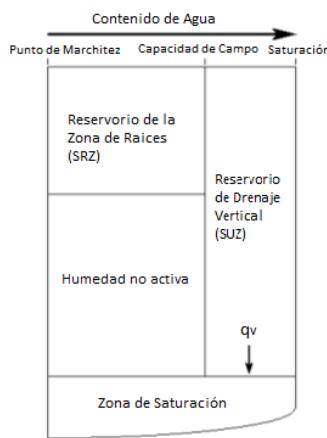


Figura 9. Estructura esquemática del modelo hidrológico TOPMODEL. Fuente: (Beven et al., 1995)

La zona de saturación indica que es el área más lenta para responder (Kirkby, 1975). Es por esta razón que, TOPMODEL utiliza un reservorio no lineal en la zona saturada, y un simple reservorio lineal en la zona dinámica (Barrera and Torres, 2010).



La modelación relaciona una serie de etapas de simplificación:

1. El comportamiento dinámico de las zonas saturadas puede ser aproximado a representaciones sucesivas por comportamiento estático.
2. El gradiente hidráulico de las zonas saturadas puede ser aproximado a la pendiente topográfica de la superficie local.
3. El gradiente hidráulico en una función exponencial del déficit de almacenamiento o la profundidad hacia el nivel freático. La distribución de transmisividad donde, el reservorio de drenaje vertical es controlado por el déficit de saturación, “Si”, lo que equivale a la cantidad de agua necesaria para llenar por completo esta zona de almacenamiento superior.

Los parámetros de TOPMODEL guardan relación con las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos. Pueden ser definidos por métodos específicos de estimación experimental en campo y de laboratorio o pueden ser obtenidos por el método de calibración del modelo (Martínez, 2015).

- m: parámetro de la función exponencial de transmisibilidad o curva de recesión [unidades de profundidad, m].
- ln (Te): el logaritmo natural de la transmisibilidad efectiva de del suelo cuando se satura [unidades de ln (m²/h)]
- SRmax: el perfil de almacenamiento del suelo disponible para la transpiración, es decir, el déficit de almacenamiento máximo [unidades de profundidad, m].
- SR0: el déficit de almacenamiento inicial en la zona de la raíz [un archivo de inicialización de parámetros, unidades de profundidad, m].
- vr: velocidad efectiva del canal [m/ hora].

3.3.2.1 Índice topográfico

Los supuestos fundamentales que subyacen al índice topográfico de similitud hidrológica utilizado en TOPMODEL son:

- La dinámica de la capa freática se puede aproximar por una producción de escorrentía subsuperficial uniforme por unidad de área (o estados constantes sucesivos compatibles con tasas de recarga promedio) sobre el área, a, drenando a través de un punto.
- El gradiente hidráulico de la zona saturada se puede aproximar por la pendiente topográfica de la superficie local, tan β.

3.3.2.2 Función Acumulativa de Retraso

La función acumulativa de retraso de la cuenca (delay), representa el tiempo de residencia de la red de drenaje que tarda el flujo superficial y superficial generados en cada subcuenca para ser conducidos a la salida (TOPMODEL, 2011). La propagación del retraso se observa en el histograma tiempo/área, derivado de la función distancia/área, mediante la siguiente ecuación

$$t_j = \sum_{i=1}^N \frac{li}{Vr * \tan\beta i}$$



Donde t_i (h), es el tiempo de retraso para el punto j ; l_i [m], es la distancia del i -ésimo segmento de patrón de flujo con pendiente tan β_i , para los N segmentos comprendidos entre el punto j y la salida de la cuenca a una velocidad v_r [m h⁻¹] en el canal de cada subcuenca.

Esta ecuación enlaza el tiempo de contribución de cada área específica de la cuenca (segmento de la corriente principal) con la velocidad de flujo del canal y la pendiente en superficie (Beven, 1997). Este tipo de propagación es indicada para representar adecuadamente los flujos pico; lo que incide en los valores de eficiencia asociados al ajuste del modelo hidrológico (Da Silva and Kobiyama, 2007b).

3.3.3 Criterios de evaluación del desempeño del modelo hidrológico

En este estudio se considera al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y al índice de error Percent bias (PBIAS) para evaluar el desempeño del modelo. NSE determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos observados (L. F. Duque and Vázquez, 2015), indicando la bondad de ajuste de los datos simulados y observados en una línea 1:1 (Nash and Sutcliffe, 1970). Su cálculo se realiza mediante la Ecuación 9.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$$

Ecuación 9. NSE

Donde:

Y_i^{obs} representa al valor observado

Y_i^{sim} el simulado y

Y^{mean} la media de los valores observados

n el número total de observaciones.

NSE es muy comúnmente empleado. Su rango que puede variar desde $-\infty$ a 1, siendo considerado el rango entre 0 a 1. Mientras que valores inferiores a 0 indican que la media observada es mejor que el valor simulado, señalando que el modelo tiene un desempeño inaceptable (Moriasi et al., 2007). Ello significa que, si la cuenca tiene una varianza observada relativamente baja, el ajuste del modelo sería mucho mejor en términos absolutos que si la cuenca tiene alta varianza observada, para conseguir una eficiencia cercana a 1.

PBIAS mide la tendencia promedio de los datos simulados para ser mayores o menores que los observados. Un valor de 0 (óptimo) indica precisión del modelo, valores positivos implican subestimación; y negativos, sobreestimación (Moriasi et al., 2007). La Tabla 7 establece la clasificación del desempeño en función de los valores de NSE y PBIAS. El cálculo de PBIAS se realiza mediante:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

Ecuación 10. PBIAS



Otro coeficiente para medir la eficiencia del modelo es el de Discrepancia del Balance de Agua (WBD). WBD es calculado como la diferencia de porcentaje entre el flujo total modelado y el observado.

$$WBD = \left(\frac{M - O}{O} \right) \cdot 100$$

Ecuación 11. WBD

Tabla 7. Clasificación general del desempeño de NSE y PBIAS (Moriasi et al., 2007)

Desempeño	NSE	PBIAS
Muy bueno	$0.75 < \text{NSE} < 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bueno	$0.65 < \text{NSE} < 0.75$	$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfactorio	$0.50 < \text{NSE} < 0.65$	$\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfactorio	$\text{NSE} < 0.50$	$\text{PBIAS} > \pm 25$

3.4 COMPARACIÓN DE LAS CUENCAS PAREADAS A TRAVÉS LA SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS.

Una vez que se ha modelado las cuencas pareadas, se procede a simular los procesos hidrológicos provenientes de los resultados obtenidos de cada cuenca. Los datos que se consideran son 90 días para la época de lluvia y la época seca, según la Figura 11 y la Figura 12 se observa que las precipitaciones más fuertes se dan entre los meses de enero a mayo y las precipitaciones más bajas entre los meses de agosto a diciembre.

Para la época seca se considerarán los meses de agosto, septiembre y octubre. Las precipitaciones serán consideradas como 0 mm, en el caso extremo que no ha llovido, para poder comparar las cuencas; la Eto será la máxima producida en los 4 años para cada día de los resultados obtenidos de la simulación.

Con esta información se pretende simular nuevamente los procesos hidrológicos de las cuencas pareadas con el programa VHM y TOPMODEL. De esta manera comparar el comportamiento de las microcuencas a través de estas nuevas simulaciones hidrológicas.



CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo de estudio fue evaluar la regulación hídrica en cuencas de páramo que cuentan con reservorios naturales. El estudio fue llevado a cabo con el programa VHM y TOPMODEL para 2 cuencas pequeñas dentro de la cuenca del río Tomebamba ($55-237 \text{ km}^2$) en la zona Austral del Ecuador. Para evaluar una cuenca con el mayor número de lagunas, fue escogida de la hoya del río Tomebamba, desde la estación hidrológica Tomebamba DJ Mazán que tiene aproximadamente 61 lagunas monitoreadas dentro del Parque Nacional Cajas. Mientras que para analizar la cuenca con el menor número de lagunas fue escogida la hoya del río Culebrillas, desde la estación meteorológica Sayausi PTAP.

4.1 SEPARACIÓN DE LAS CUENCAS PAREADAS

Las cuencas de estudio definidas como pareadas para iniciar los análisis hidrológicos. Se dividen en la cuenca del culebrillas, por tener apenas 3 lagunas de tamaño menor a 1 km^2 . La cuenca del Tomebamba, por tener un aproximado de 61 lagunas, además de estar dentro del área protegida Parque Nacional Cajas.

4.2 CARACTERIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS

Para la modelación hidrológica (calibración y validación) de la cuenca, cuatro años de datos de precipitación diaria fueron utilizados (2014-2018). Los datos de precipitación son previamente calculados en base al aporte de las series de tiempo de las estaciones puntuales de Chirimachay, Labrados, Mamamag, y Mazán AJ Quinuas para la cuenca del Tomebamba; y, por otra parte, las estaciones de Culebrillas y Labrados para la cuenca del Culebrillas. Los datos de ETo, fue estimada mediante el Método de Penman-Monteith.

Cabe indicar que, la estación de Labrados se utiliza únicamente para el cálculo y ponderación de la precipitación y la ETo real de la cuenca del Culebrillas, debido a que, esta estación se encuentra fuera del área de estudio. Las series de temperaturas mensuales de la estación meteorológica labrados, ubicada a 10 km noreste en línea recta del PNC (Figura 10.), muestran la misma continuidad anual de este patrón regional desde el año 1982 hasta el año 2012 con el PNC (Mosquera, 2016).

Los datos de caudales y precipitación se ilustran en las Figura 11 y Figura 12, el tiempo se ilustra en días, sin embargo la serie de tiempo es considerada desde junio del 2014 a mayo de 2018. Se observa que existe una regulación del flujo en la época de verano tal como se observa los picos que resaltan los recuadros para los períodos secos, está relacionado directamente con la cobertura vegetal, además de que en ambas cuencas predomina el páramo.

Se denota además que, los picos de lluvia intensa coinciden con la serie de caudal para la cuenca del Tomebamba, esto indica claramente la relación directa que cuando llueve el caudal aumenta, Se puede observar que en época seca con precipitaciones casi nulas el caudal se mantiene casi constante, esto quiere decir que el suelo páramo regula influenciado por las lagunas.

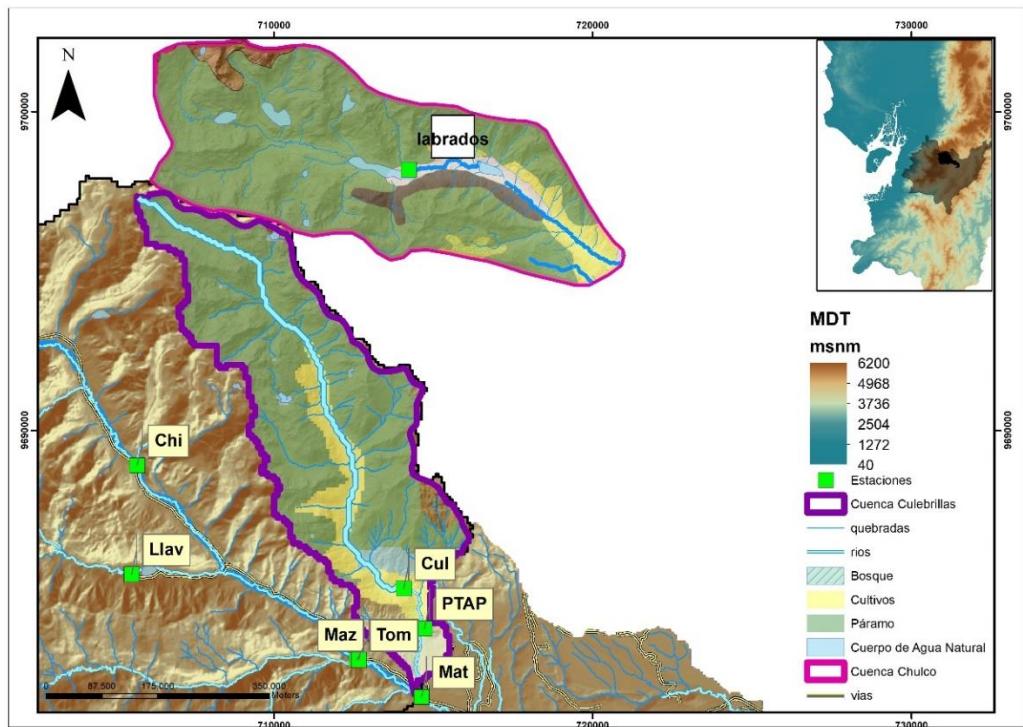


Figura 10. Mapa Geológico de la Cuenca del Culebrillas y Cuenca del río Chulco. Fuente: ETAPA EP

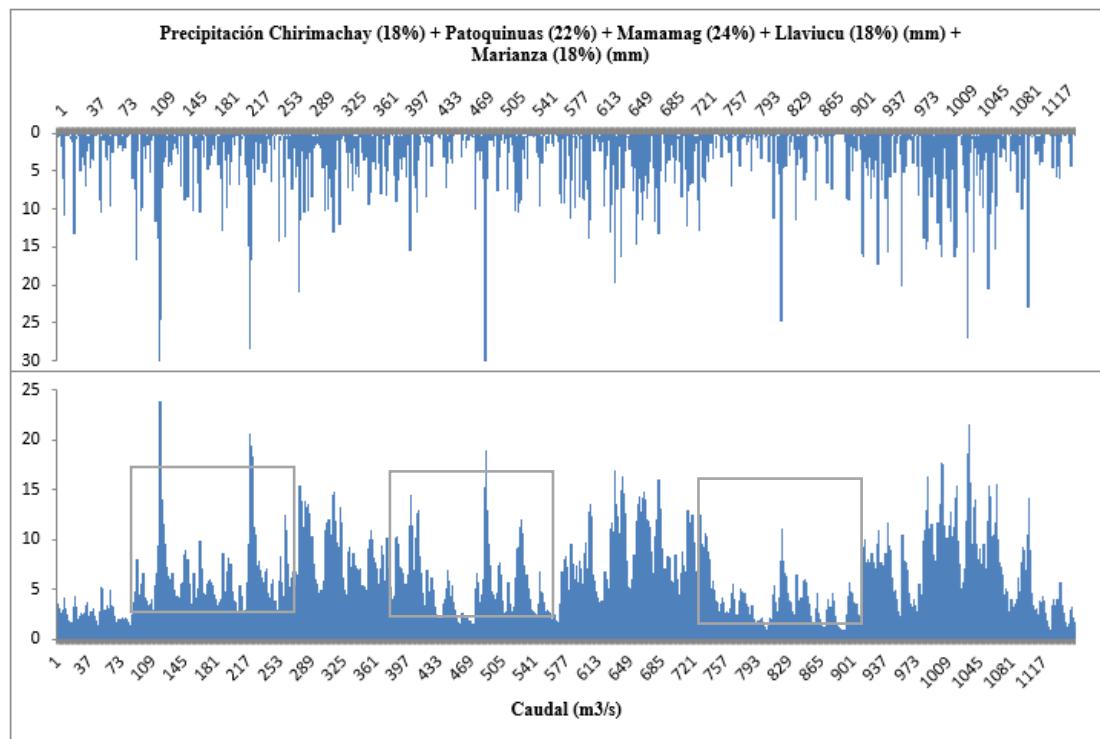


Figura 11. Precipitación y caudal de la cuenca del Tomebamba

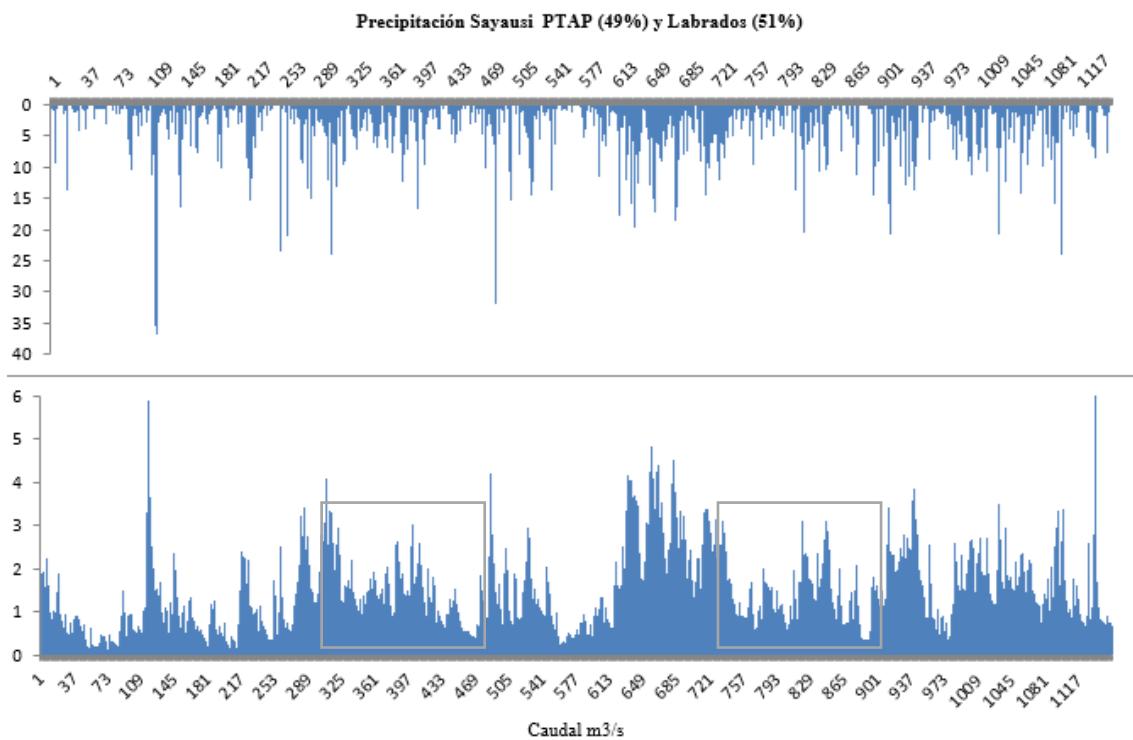


Figura 12. Precipitación y caudal de la cuenca del Culebrillas

Para la cuenca del Culebrillas, evidencian el hecho de que la respuesta de una alta precipitación es un alto caudal (recuadros), así mismo a bajas precipitaciones el caudal se mantiene constante, es decir que guarda procesos de páramos. La información de evapotranspiración real corresponde al mismo periodo (2014-2018), sin embargo, en las gráficas el tiempo está considerado en días y se muestra en los siguientes gráficos:

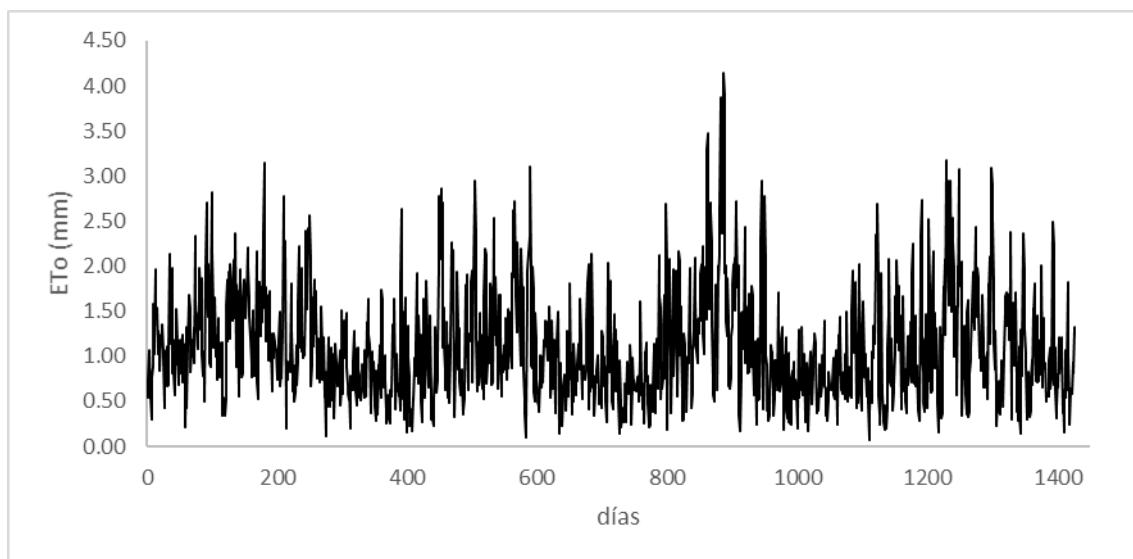


Figura 13. Evapotranspiración real de la cuenca en la estación Culebrillas

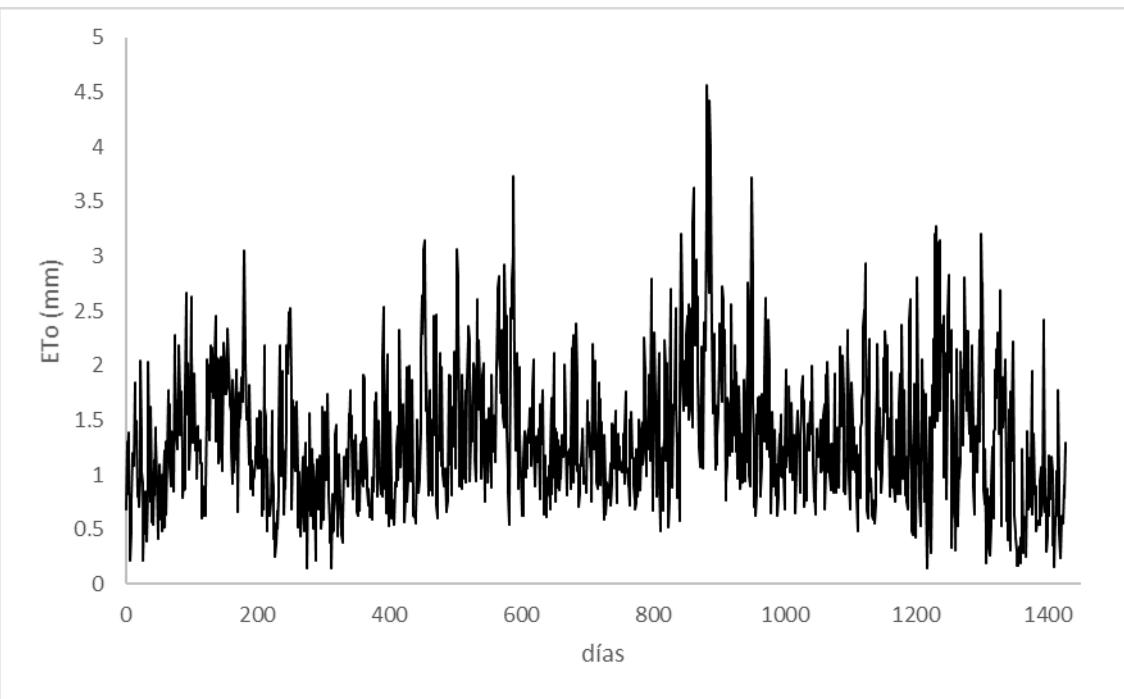


Figura 14. Evapotranspiración real de la cuenca del Tomebamba

Por tanto, la calibración se consideró desde 19 de junio del 2014 hasta 02 de agosto del 2016, donde inicia la época seca, y para la validación se consideró desde el 03 agosto del 2016 hasta el 15 mayo de 2018.

4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO VHM

4.3.1 Análisis para la separación de flujos

Con los datos de caudal se realizó la separación de flujos utilizando el programa WETSPRO. La información de caudal fue agregada para un intervalo de tiempo igual a 1 día (time step = 1 día).

En la Tabla 8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en lo que respecta a las constantes de recesión según el concepto de reservorio lineal para las 2 cuencas.

Tabla 8. Parámetros de entrada al programa WETSPRO para las 2 cuencas

Cuenca	Tomebamba	Culebrillas	Tomebamba	Culebrillas	Tomebamba	Culebrillas
Parámetros del filtro	FLUJO BASE		FLUJO SUBSUPERFICIAL		FLUJO SUPERFICIAL	
caudal inicial (m ³ /s)	3.7	2	1	0		
Número de pasos del filtro	1	1	1	1		
Constante de recesión (días)	16	22	6	1	1	1
w-parámetro del filtro [-]:	0.29	0.18	0.33	0.33		

Los valores que se disponen en la Tabla 8 son los resultados finales de ejecución del programa que dan los mejores resultados para la separación de flujos. Lo anterior se puede observar en los siguientes gráficos.

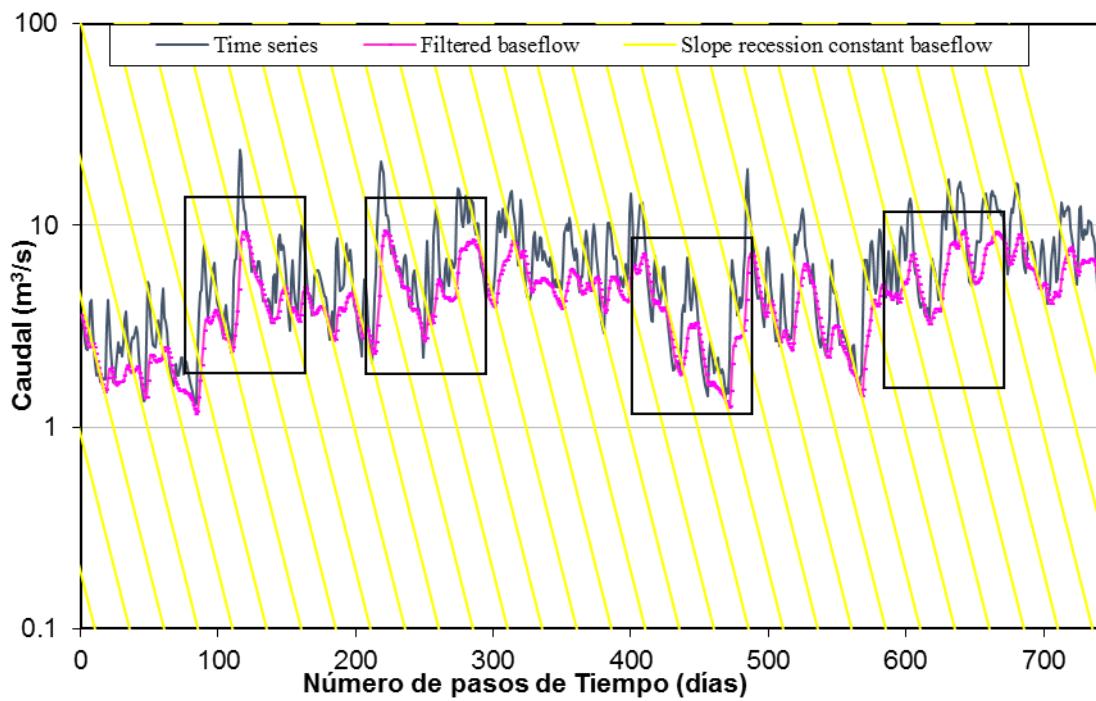


Figura 15. Flujo Base de la Cuenca Tomebamba Calibración

La constante de recesión en la cuenca del Tomebamba es de 16 días para el flujo base y de 22 días para la Cuenca del Culebrillas. Se puede considerar una recesión baja, la interpretación física que se da es que la respuesta hidrológica de la cuenca del Culebrillas es más lenta que la Cuenca del Tomebamba. Esta recepción baja para la cuenca en su totalidad es debido a su gran capacidad de retención de agua. Esto puede ser por el tipo de suelo, que en su mayoría es páramo.

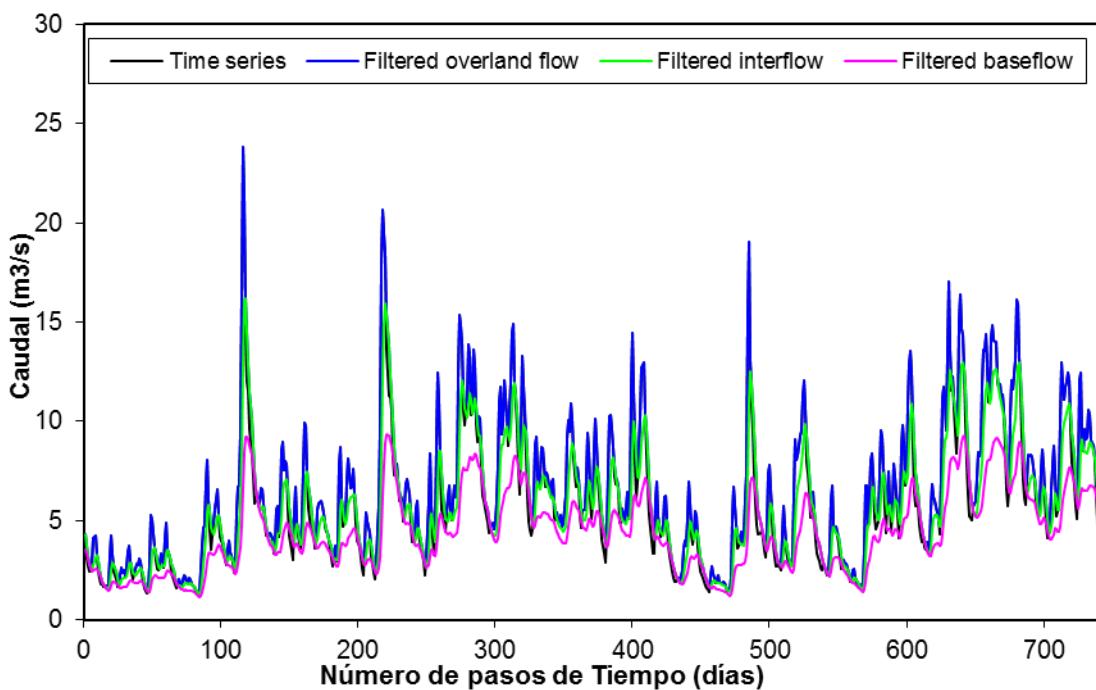


Figura 16. Flujo Total Cuenca Tomebamba Calibración

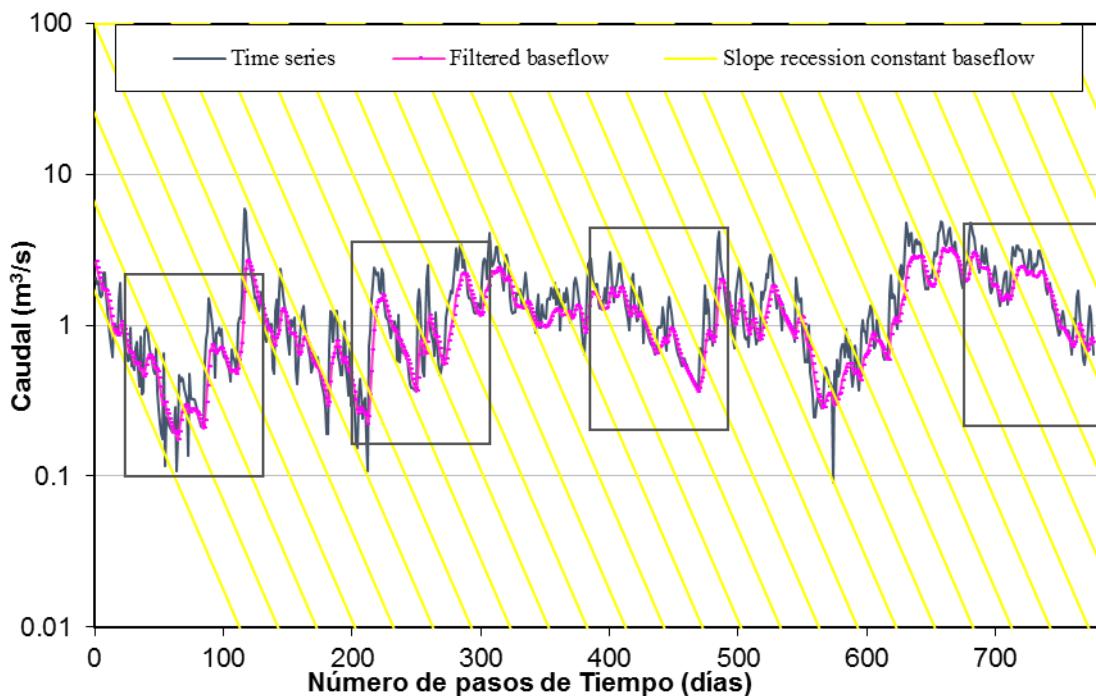


Figura 17. Calibración del Flujo Base de la Cuenca Culebrillas

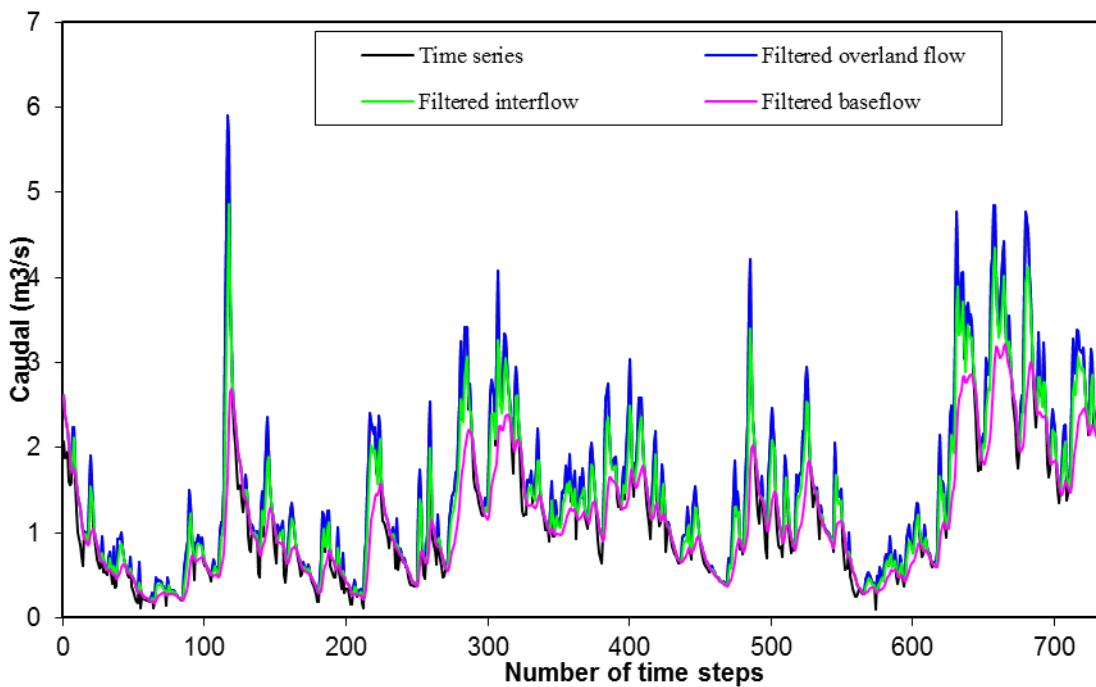


Figura 18. Calibración del Flujo Total Cuenca Culebrillas

En cada uno de los anteriores gráficos se presenta un recuadro en negro que enfatiza el buen desempeño del filtro. Lo que se compara es la pendiente de los diferentes flujos versus las líneas de color amarillo que son justamente los valores últimos de entrada obtenidos, es decir las constantes de recessión definitivas. En la Figura 16 y la Figura 18 se resumen el proceso de separación de flujos de cada una de las 2 cuencas.



Analizando los valores de las constantes de tiempo de la recesión (Tabla 8) podemos concluir que existe una marcada diferencia entre los tres flujos. El flujo base tiene una constante equivalente a 16 y 22 días para la cuenca del Tomebamba y Culebrillas, lo que no es extraño para los suelos del páramo. La respuesta hidrológica del flujo subsuperficial es mucho menor alrededor de 6 y 1 día respectivamente, indicando una respuesta hidrológica rápida; reteniendo el agua en su capa subsuperficial más días la cuenca del Tomebamba. En lo que corresponde al flujo superficial esta muestra que la respuesta es muy rápida, como se puede observar de los gráficos de lluvia-escorrentía.

Los resultados del caudal filtrado para algunos tiempos de paso sobreestiman o subestiman el caudal observado, como lo muestran los gráficos. La separación del flujo base, da los mejores resultados, debido a la aceptable estimación de su constante de recesión. Una aplicación que se podría dar a los resultados del filtro sería la estimación del caudal ecológico a partir del flujo base encontrado.

4.3.2 Eventos independientes de flujo rápido y lento (extracción de valores extremos)

Una vez filtrado los flujos, el método de independencia fue utilizado para la separación de los eventos independientes de la serie histórica y consecuentemente la extracción de valores extremos. A continuación, se presentan los valores utilizados para separar los períodos de flujo rápido y lento en el programa WETSPRO:

Tabla 9. Método y parámetros para la selección de eventos

Método:	Periodo flujo rápido		Periodo flujo lento	
	<i>Tom</i>	<i>Cul</i>	<i>Tom</i>	<i>Cul</i>
Dependiente en Flujo base (1) o flujo base + flujo subsuperficial (2), o independiente (0):	1	1	0	0
Parámetros:				
máxima relación de diferencia con subflujo [-]:	2	0.1	2	0.15
período de independencia [cantidad de pasos de tiempo]:	6	1	32	44
altura de pico mínima [unidad de serie]:	7	2	7	2

En total se determinaron 26 períodos de flujo rápido y 11 de flujo lento para la cuenca del Tomebamba y 12 períodos de flujo rápido y 5 de flujo lento para la cuenca del Culebrillas Figura 19y Figura 20.

Al separar los flujos de caudales observados, se puede indicar que, la cuenca del Tomebamba tiene un impacto significativo en la alteración del flujo base. El proceso con respecto al reservorio que tiene en contraparte el suelo del páramo no está tan detallado, por eso en una cuenca que tiene el proceso bien definido que son reservorios por laguna se obtiene una mejor eficiencia que en cambio en una cuenca donde el proceso únicamente depende del reservorio del páramo, el coeficiente de Nash como se observa en la Tabla 15, la cuenca del Tomebamba es de 0.91 para la calibración y 0.82 para la validación y para la cuenca del culebrillas es de 0.97 y 0.74 respectivamente, mostrando niveles adecuados para este tipo de simulaciones hidrológicas.

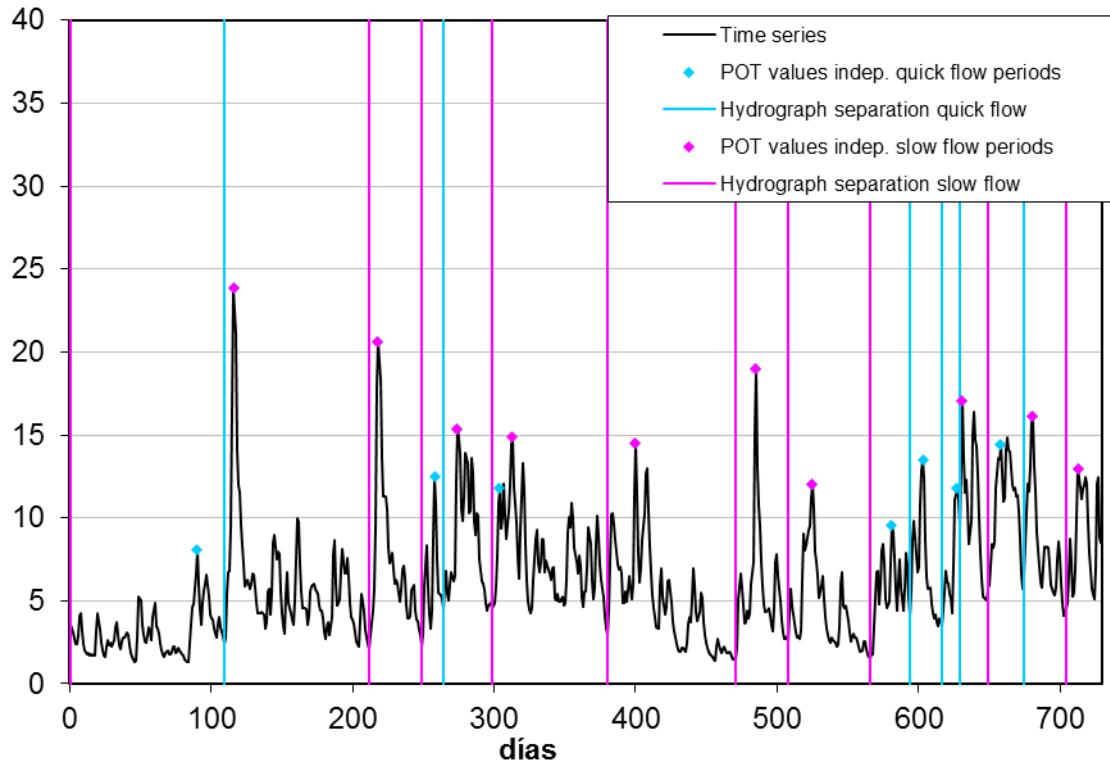


Figura 19. División de la serie de caudales de la cuenca del Tomebamba, eventos de flujos rápidos y flujos lentos independientes

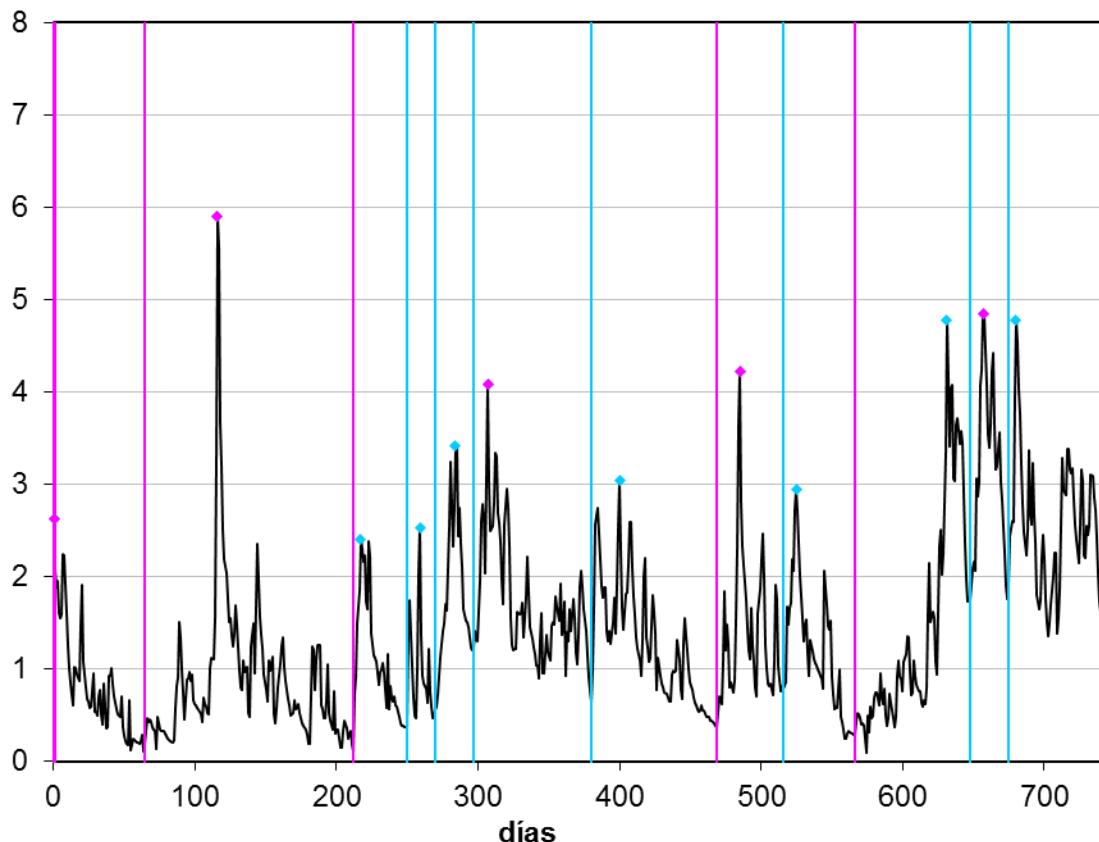


Figura 20. División de la serie de caudales de la cuenca del Culebrillas, eventos de flujos rápidos y flujos lentos independientes.



4.3.3 Análisis de valores extremos y periodo de retorno

Luego de un análisis de la cola de la distribución de los valores extremos para la cuenca de Tomebamba seleccionados en el paso anterior, la Distribución de Pareto fue identificada con la siguiente expresión matemática:

$$G(x) = 1 - \left(1 + \gamma \frac{x - x_t}{\beta}\right)^{-1/\gamma}$$

El análisis de la cola de la distribución de los valores extremos para la cuenca de Culebrillas seleccionados en el paso anterior, la Distribución Exponencial Acumulada fue identificada con la siguiente expresión matemática:

$$G(x) = 1 - e^{-\frac{x-x_t}{\beta}} \quad \gamma = 0$$

Los estadísticos de la distribución se muestran a continuación:

Tabla 10. Parámetros de la distribución de probabilidad

Parámetros Estadísticos	Valores Tomebamba	Valores Culebrillas
γ	0.2810	0
β	3.3679	0.9793
x_t	11.98	3.0697

El punto de menor MSE (error medio cuadrático), en el rango estable, se establece en el punto 9 para la cuenca del Tomebamba y en el punto 11 para la cuenca del Culebrillas, lo que permite encontrar los valores de la Tabla 10, y corroborado en la Figura 21 y la Figura 22.

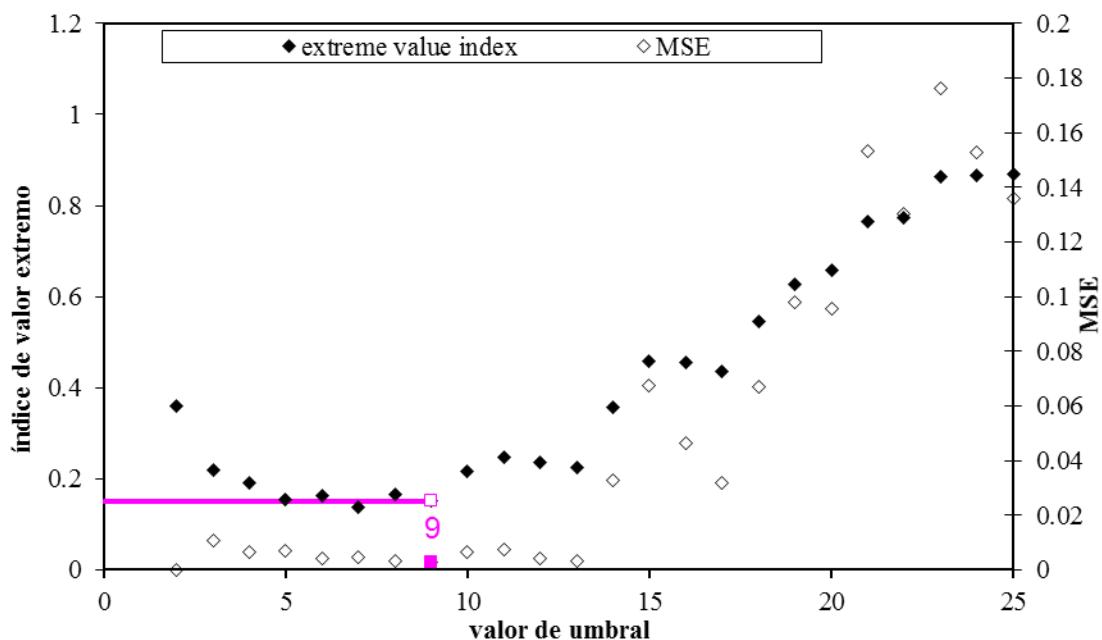




Figura 21. Pendiente de Pareto Q-Q (Cuenca del Tomebamba)

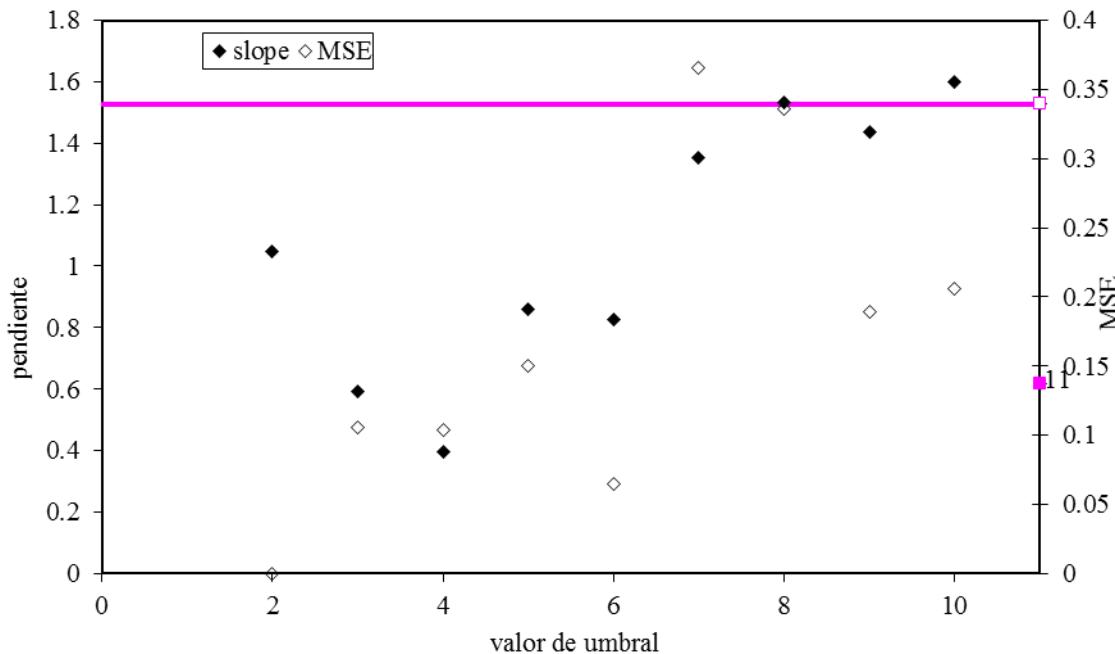


Figura 22. pendiente Exponencial Q-Q (Cuenca del Culebrillas)

En la Figura 23 presenta el ajuste de la Distribución de Pareto, y en la Figura 24 presenta un ajuste exponencial con el valor del umbral óptimo. Se observa que los datos se ajustan de mejor manera, especialmente en un sector de la distribución (recuadro).

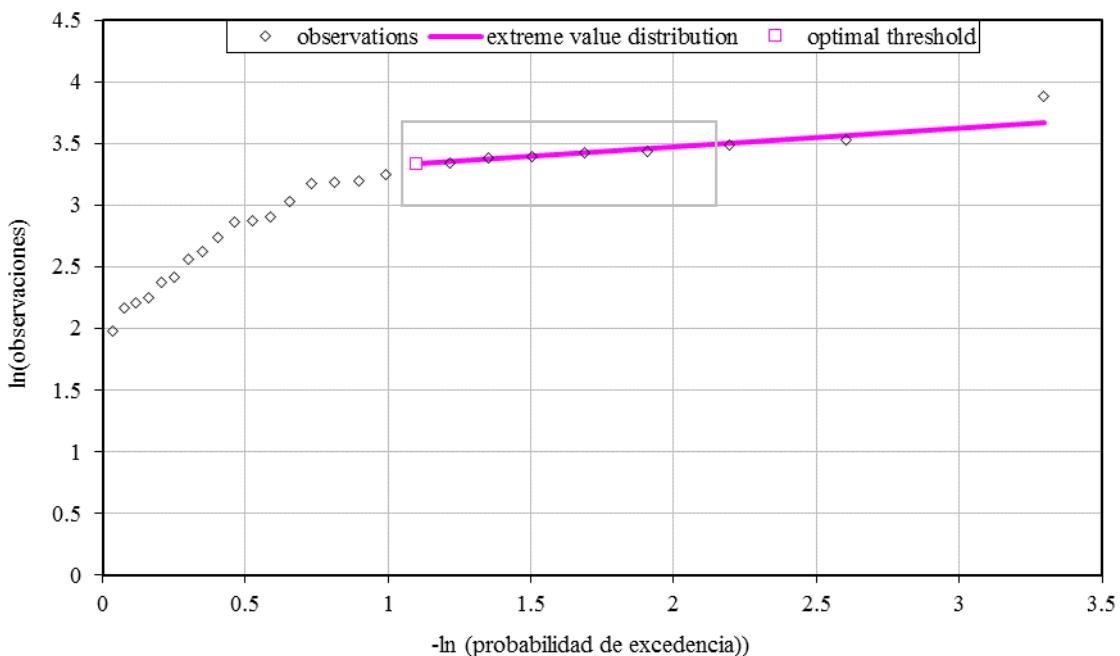


Figura 23. Diagrama de cuantiles Pareto, eventos de caudal diario (Cuenca del Tomebamba)

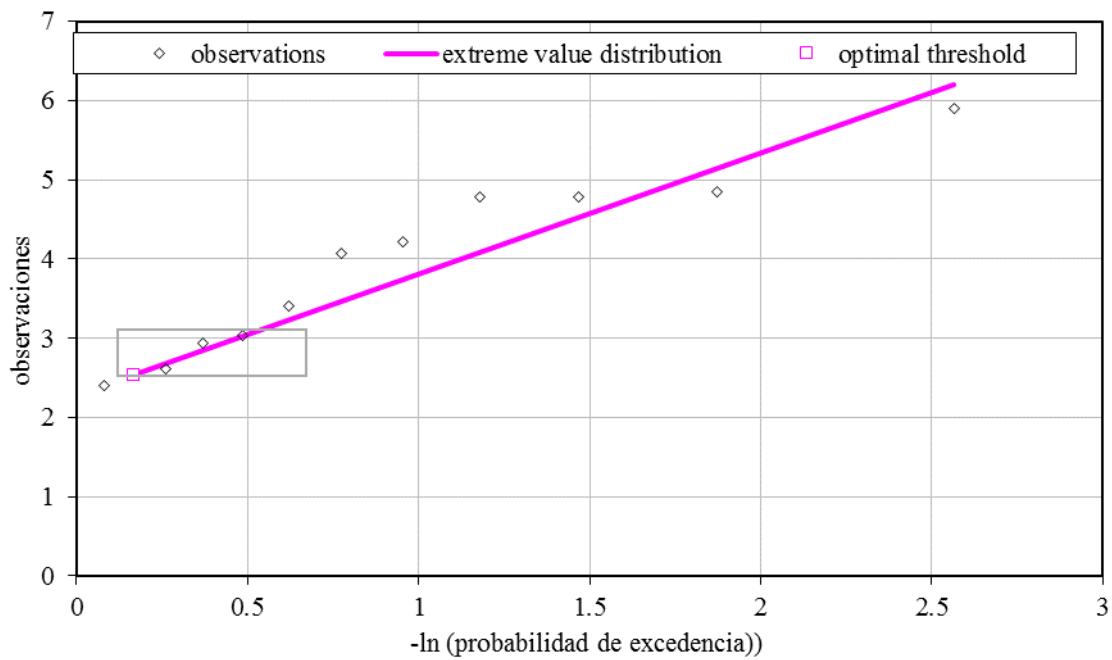


Figura 24. Diagrama de cuantiles Pareto, eventos de caudal diario (Cuenca del Culebrillas)

4.3.1 VHM

La información presentada en las Figura 11 y la Figura 12 (lluvia-escorrentía) es la base de datos utilizada para calibrar el modelo VHM del laboratorio de la Universidad de Leuven.

Paso 1. El time step utilizado en la modelización es igual a 1 día. El área de la cuenca es igual a 232 y 55 km² para la cuenca del Tomebamba y culebrillas respectivamente. Los primeros parámetros de entrada corresponden a las características del suelo. En la Tabla 11, se presenta los valores ingresados al modelo que dan los mejores resultados.

4.3.1.1 Calibración

Paso 2. *Modelo de almacenamiento*

Tabla 11. Parámetros de calibración para el modelo VHM para las cuencas pareadas

Modelo de almacenamiento	Parámetros	Tomebamba	Culebrillas
Modelo lineal (1) o exponencial (2):		1	1
contenido máximo de agua en el suelo:	u_{max} (mm)	350	205
contenido de agua en el suelo a máxima ET:	u_{evap} (mm)	330	205
contenido inicial de agua en el suelo:	u_{init} (mm)	210	180
coeficientes del modelo:	c_1	0.36	0.95
	c_2	0.65	0.95
	c_3		
Flujo Superficial	c_1	-3.5	-4
	c_2	1.8	1
	c_3	0	0
	c_4	0	0
Flujo Subsuperficial	c_1	-2.5	-2.8
	c_2	0.54	1.2
	c_3	0	0



c4 0 0

El modelo utilizado es el de tipo lineal. El valor del almacenamiento máximo ó U_{max} puede ser estimado a partir del punto de marchitez (curva de pF para los Andosoles) y la profundidad promedio del suelo. Para la microcuenca analizada se ha determinado que el contenido volumétrico de agua en el punto de marchitez para la cuenca del Tomebamba está alrededor de $0.17 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ y una profundidad promedio de 21 cm, lo que da un U_{max} igual a 350 mm y el punto de marchitez para la cuenca del Culebrillas esta alrededor de $0.11 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ y una profundidad promedio de 18 cm, lo que da un U_{max} igual a 18 cm. El efecto directo de los anteriores parámetros puede ser observado en las Figura 25 y Figura 26.

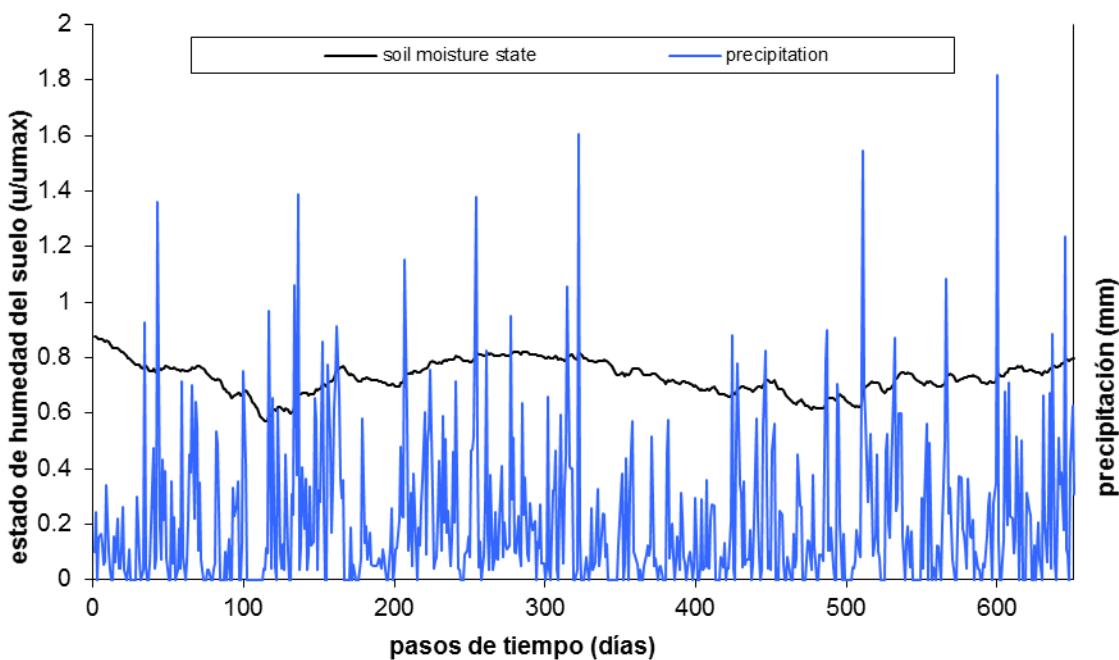
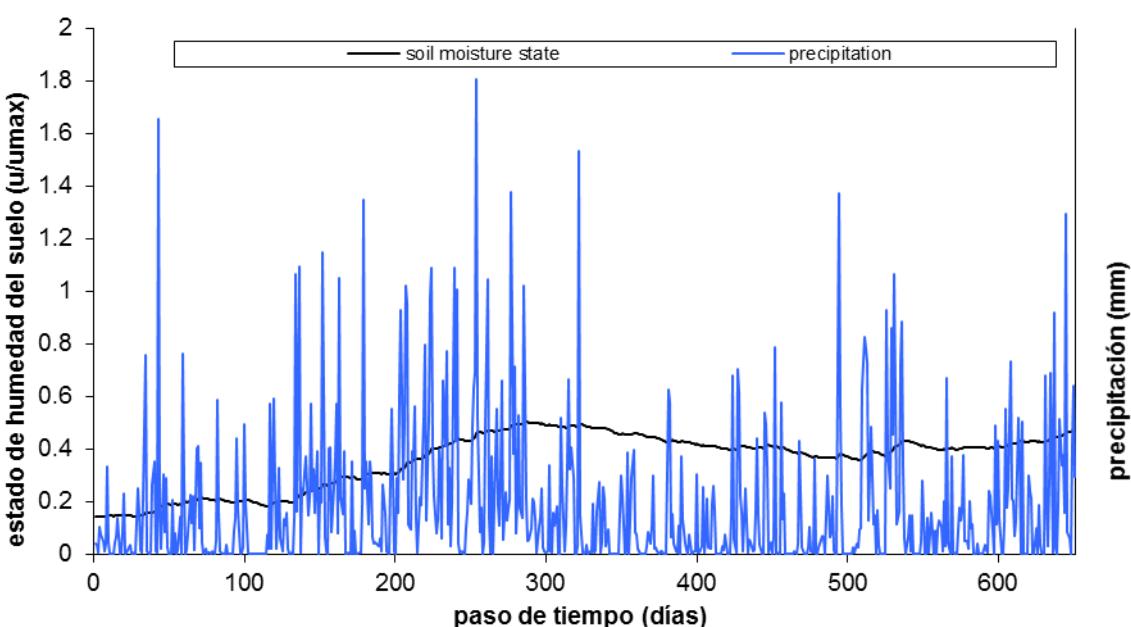


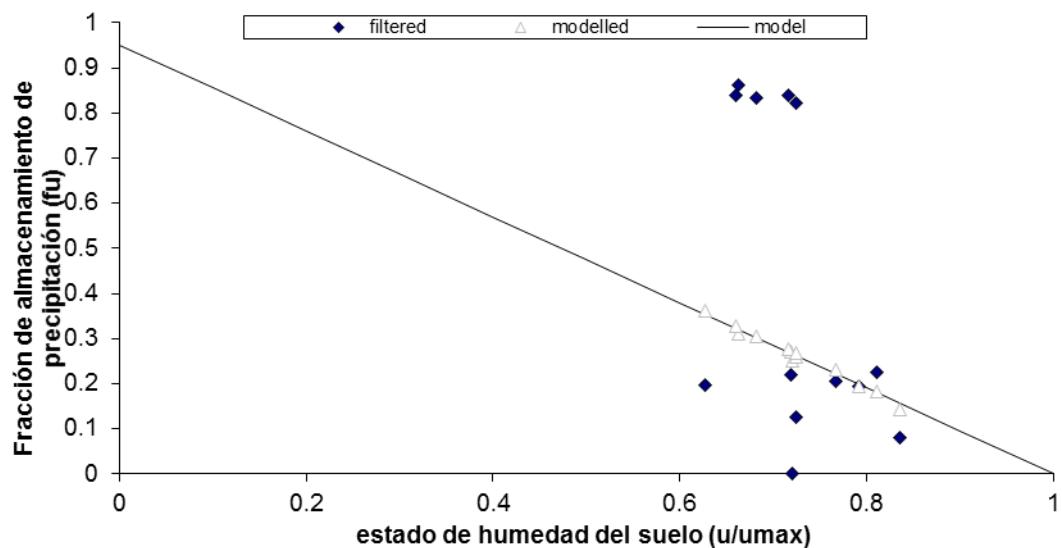
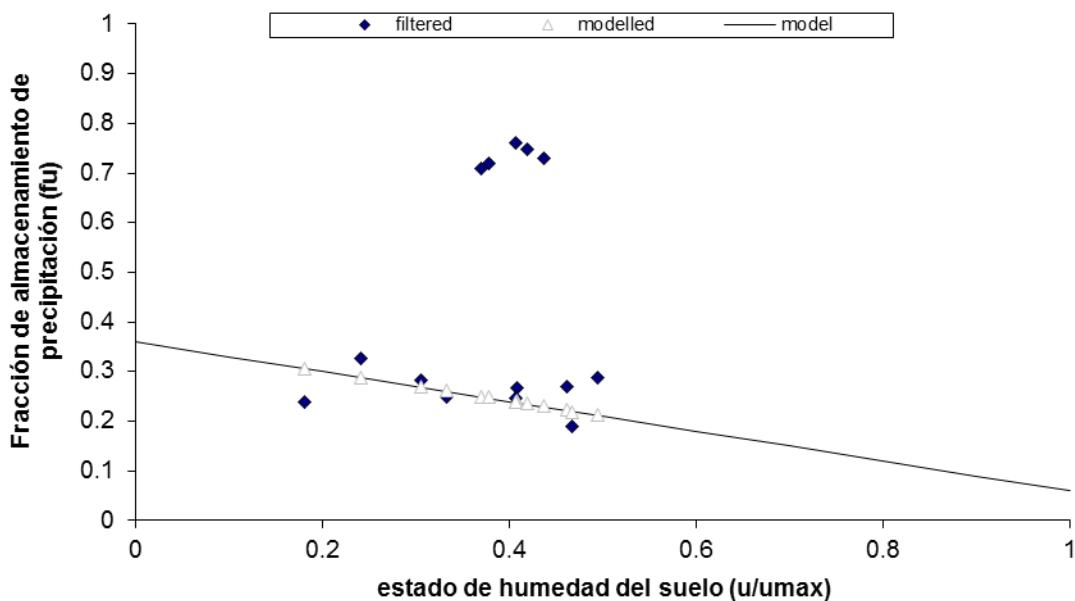
Figura 25. Variación de la humedad en el suelo y la precipitación en la cuenca del Culebrillas



*Figura 26. Variación de la humedad en el suelo y la precipitación en la cuenca del Tomebamba*

La Figura 25 de la cuenca del culebrillas muestra que el contenido de humedad en el suelo es casi constante durante todo el tiempo, incrementándose en periodos prolongados de lluvia y disminuyendo durante periodos sin o con pocas lluvias. En eventos extremos no existe un incremento considerable en el almacenamiento de agua en el suelo, la razón puede estar en que la intensidad de la lluvia es grande y puede fácilmente exceder la capacidad de infiltración del suelo en estas condiciones. Por lo tanto, gran parte de la lluvia se convierte en escorrentía superficial.

En la Figura 26 se observa la cuenca del Tomebamba, en los días 300 a 600 (abril/2015 a febrero/2016) hay menos recarga desde la lluvia, siendo la recarga proveniente desde las lagunas. En la cuenca del Culebrillas, no hay lagunas, por eso la humedad del suelo es más o menos estable.

*Figura 27. Modelo de almacenamiento de la cuenca del Culebrillas*

*Figura 28. Modelo de almacenamiento de la cuenca del Tomebamba*

De la Figura 27 y Figura 28, Se puede observar que la variabilidad de la fracción fu en la cuenca del Tomebamba es más alta al aumentar o disminuir la humedad relativa del suelo, mientras que en la otra cuenca se mantiene constante. Lo que quiere decir que, al parecer las propiedades del suelo en la cuenca del Culebrillas no han cambiado. Además, se puede notar que no es posible determinar una tendencia clara sobre el modelo de almacenamiento en el suelo. Existe mucha variabilidad. En todo caso, se asume una tendencia que es viable o lógica, como es la que a mayor relación U/U_{max} , la fracción del almacenamiento por parte de la lluvia tiene que ser menor.

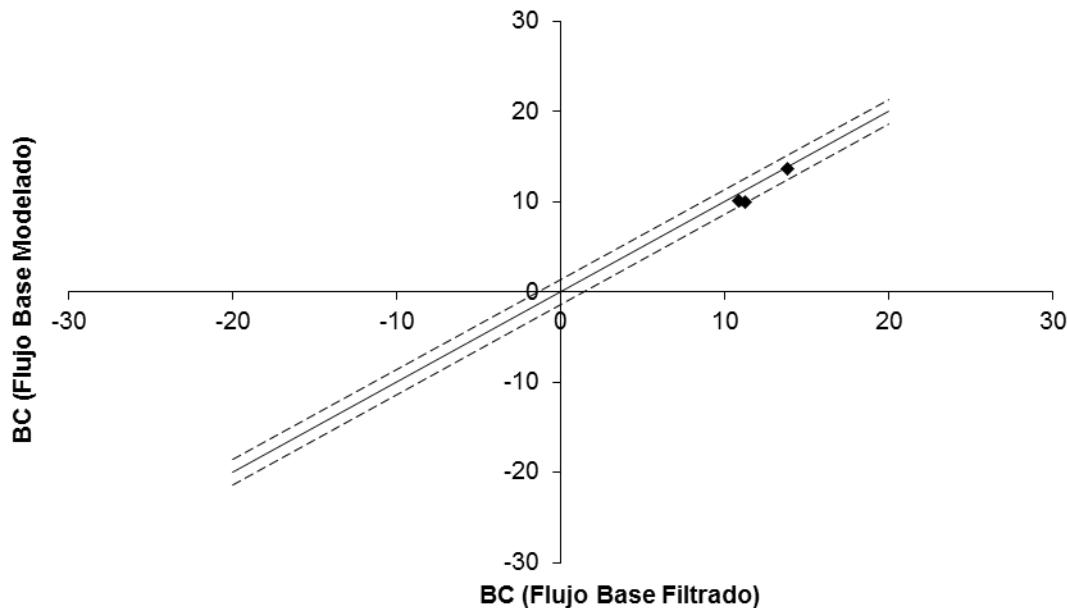
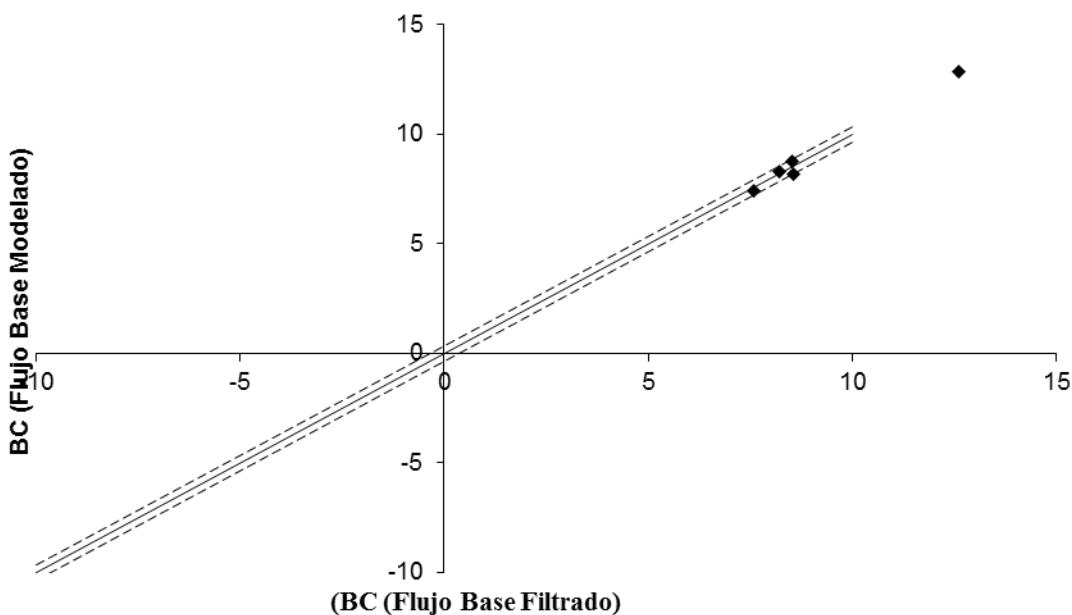
*Figura 29. Box-Cox flujo base ($\lambda=0.25$) cuenca del Culebrillas*

Figura 30. Box-Cox flujo base ($\lambda=0.25$) cuenca del Tomebamba**Paso 3.** Modelo de flujo superficial

En esta parte el programa modela el flujo superficial, en función del modelo de almacenamiento en el suelo o la relación U/U_{max} , ver resultados en Tabla 9. A diferencia del modelo de almacenamiento, este modelo y el modelo del flujo subsuperficial, muestra los resultados en escala logarítmica, para visualizar de mejor manera. En la Figura 31 y la Figura 32 indican la relación de la contribución de la precipitación con flujo superficial y con la humedad relativa del suelo (u/u_{max}), correspondiente al flujo superficial que se produce por exceso de saturación del suelo para la cuenca del Culebrillas y Tomebamba respectivamente.

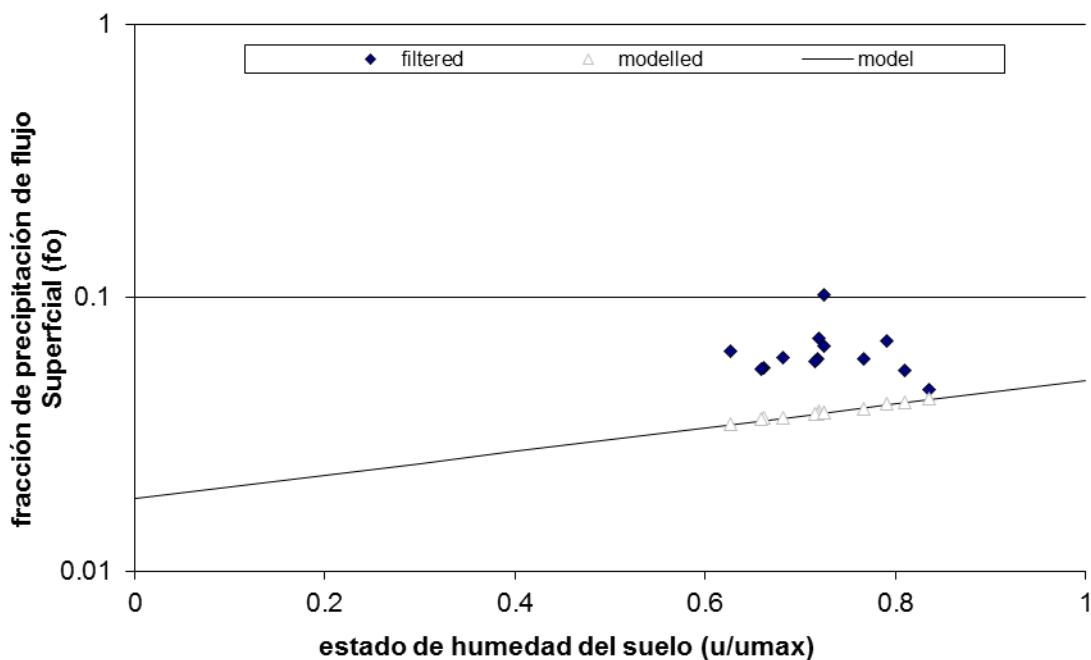


Figura 31. Almacenamiento de agua en el suelo versus fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial, cuenca del Culebrillas

La otra relación de la precipitación acumulada antecedente (dado un tiempo de acumulación de precipitación) con la fracción de precipitación del flujo superficial producido por exceso de la capacidad de infiltración del suelo.

Se puede observar que a pesar de que el aporte de precipitación es mínimo para las cuencas pareadas, la cuenca del Tomebamba presenta una pendiente mayor. En la Figura 33 de la cuenca del Culebrillas muestra la relación entre la lluvia antecedente y la fracción de agua adicional que se convertirá en flujo superficial. Existe un efecto muy pequeño de la lluvia antecedente sobre el flujo superficial, puesto que la línea de tendencia que se ajustaría mejor tendría una pendiente cercana a cero. Vale mencionar que la “línea de tendencia” que se dibuja en el gráfico no representa lo observado, los puntos blancos casi coinciden con los puntos o valores observados, que es justo lo que se espera.

Sin embargo, en la Figura 34 que es el efecto antecedente de lluvia sobre un factor residual para la cuenca del Tomebamba, se observa que los valores observados casi no coinciden, pero la pendiente es cercana a



cero ajustándose mejor, y, por tanto la cuenca aporta más al flujo superficial producido por exceso de saturación del suelo.

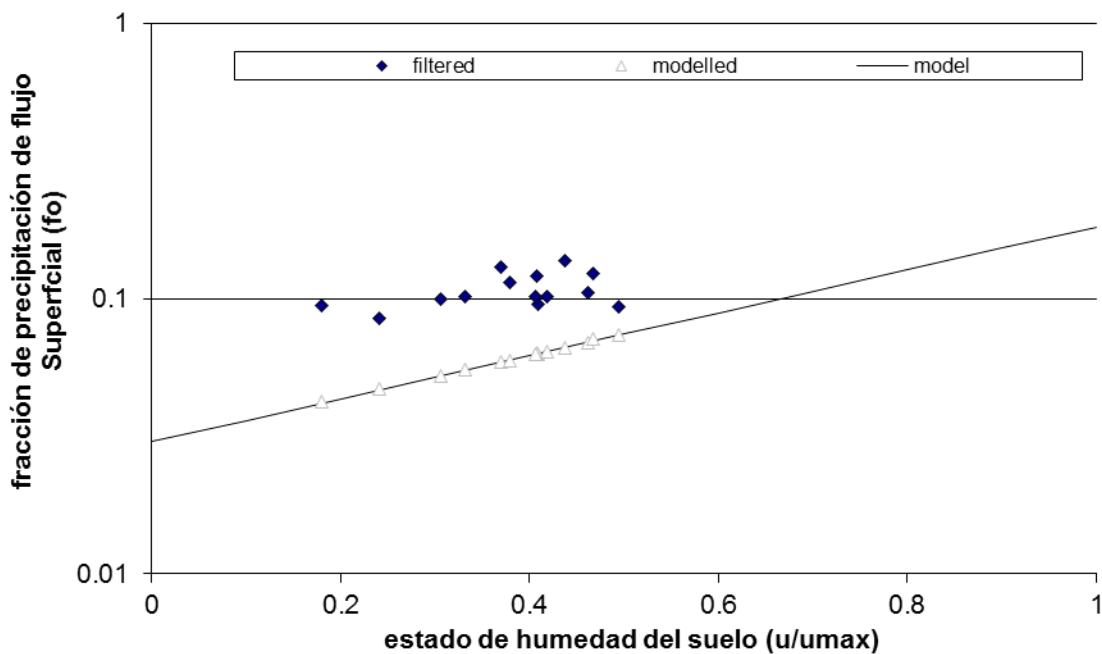


Figura 32. Almacenamiento de agua en el suelo versus fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial, cuenca del Tomebamba

Se intentó de establecer una tendencia, y de la Figura 31 y Figura 32 es posible mencionar que a mayor relación “U/U_{max}” (es decir cercano a 1 = saturación) la fracción de precipitación que se transformará en flujo superficial también será mayor en la cuenca del Culebrillas, por no tener lagunas retenedoras.

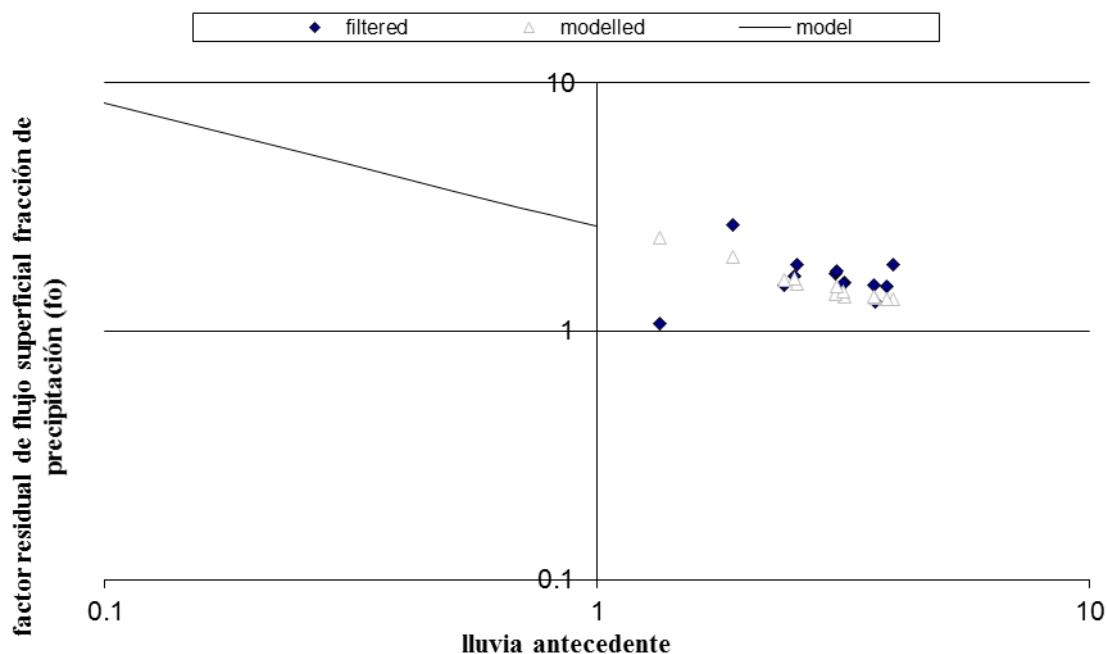




Figura 33. Efecto de los antecedentes de lluvia sobre un factor residual de la escorrentía superficial cuenca del Culebrillas

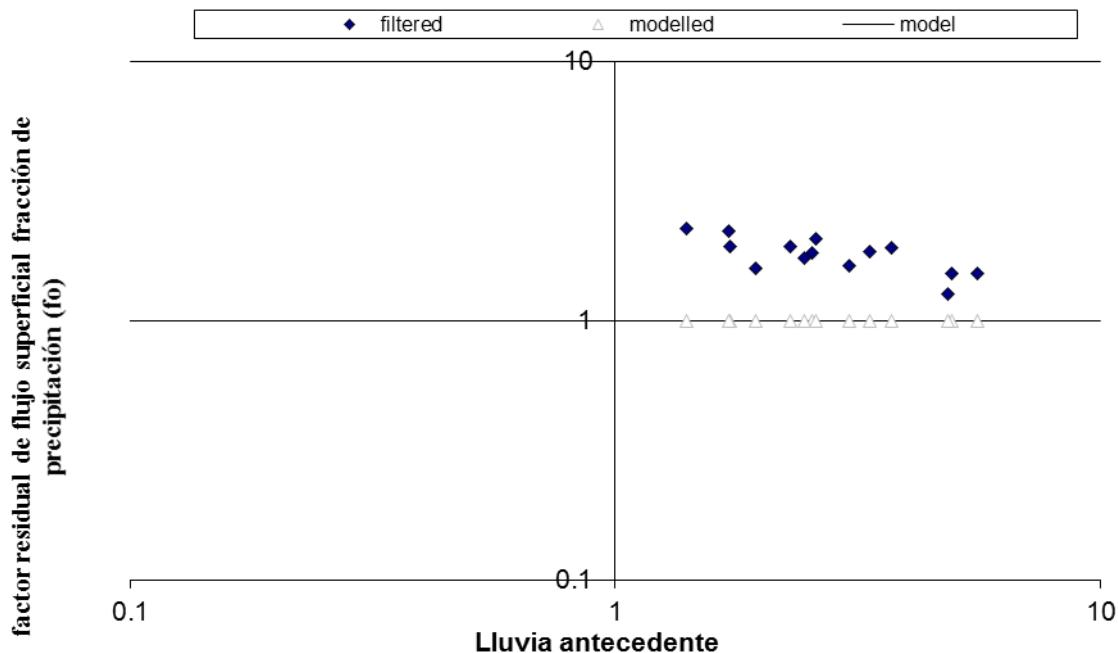


Figura 34. Efecto de los antecedentes de lluvia sobre un factor residual de la escorrentía superficial cuenca del Tomebamba

Paso 4. Modelo de flujo subsuperficial

En la Figura 35 y Figura 36 se observa la subestimación del almacenamiento en el flujo subsuperficial en comparación de los valores observados para la cuenca del Culebrillas y Tomebamba respectivamente. En este caso del flujo subsuperficial, se basa en la condición de humedad del suelo; ver Tabla 11. Para determinar el periodo que más contribuye al interflujo correspondiente al exceso de saturación del suelo, evaluamos los coeficientes c_1 de las cuencas. Se observa que el valor de c_1 es similar, sin embargo, la cuenca del Culebrillas presenta la mayor pendiente, por lo que se concluye que, es el periodo que mayor contribución hace al interflujo perteneciente al exceso de saturación del suelo.

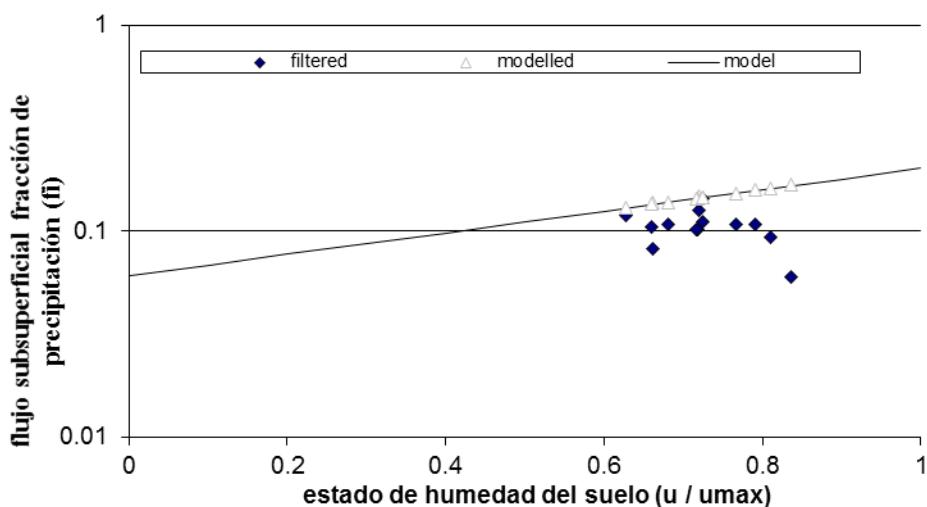




Figura 35. Parte de almacenamiento, modelo de flujo subsuperficial de la cuenca del Culebrillas

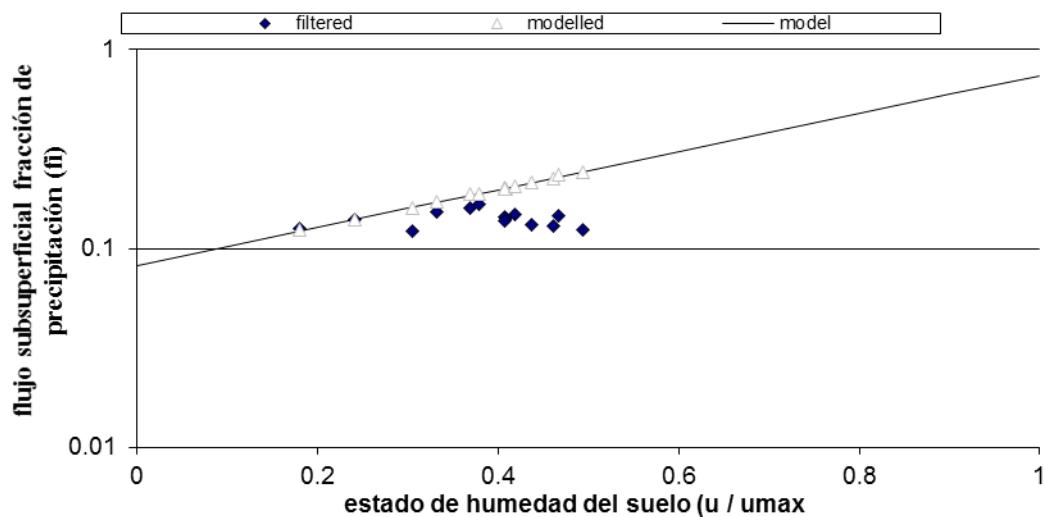


Figura 36. Parte de almacenamiento, modelo de flujo subsuperficial de la cuenca del Tomebamba

VALIDACIÓN (Incluye caudales de paso)

Con los resultados de esta etapa del programa es posible realizar una validación, puesto que el modelo VHM proporciona los caudales de paso, es decir: los hidrogramas de flujo base, flujo superficial y subsuperficial.

Paso 5. Caudales de paso

Tabla 12. Parámetros validados para los caudales de paso en ambas cuencas

		Culebrillas	Tomebamba	Unidades
Contante de recesión	K _b	8	16	d
Caudal inicial:	q _{b,init}	1.78	5.2	m ³ /s
Contribución inicial a la precipitación:	c _{b,init}	0	0.5	mm
<hr/>				
Flujo Subsuperficial:				
Contante de recesión	K _i	1	6	d
Caudal inicial:	q _{i,init}	0.11	0.1	m ³ /s
Contribución inicial a la precipitación:	c _{i,init}	0	0.05	mm
<hr/>				
Flujo Superficial:				
Contante de recesión	K _o	1	1	d
Caudal inicial:	q _{o,init}	0.14	0.13	m ³ /s
Contribución inicial a la precipitación:	c _{o,init}	0	0	mm
Número de reservorios		3	61	

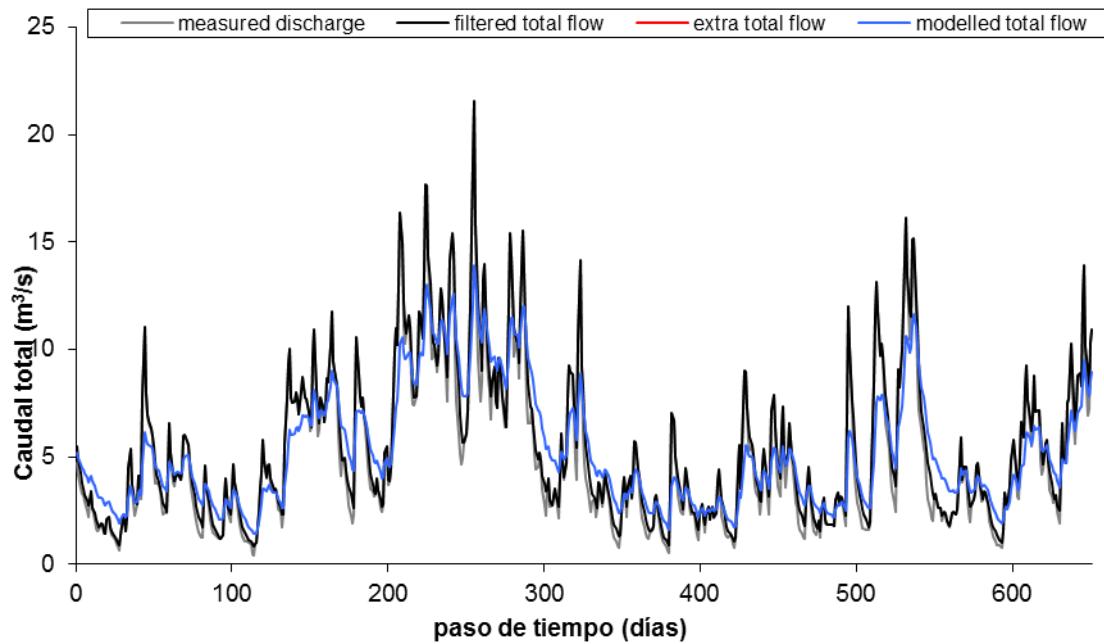


Figura 37. Flujo Total de la cuenca del Tomebamba

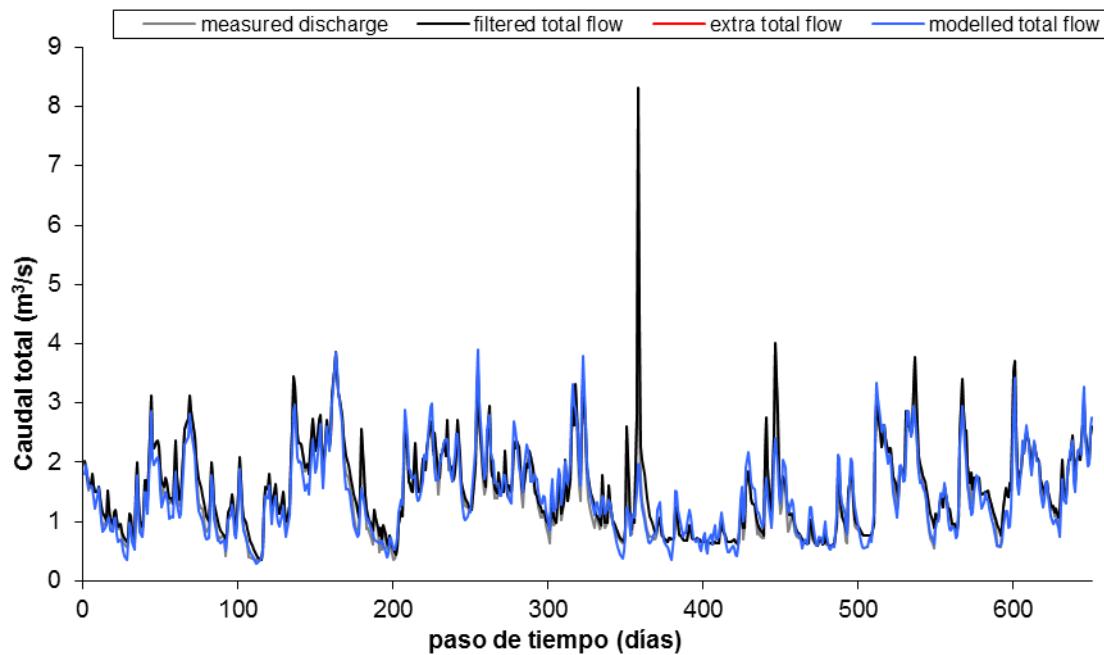


Figura 38. Flujo Total de la cuenca del Culebrillas

Si se analiza la Figura 37 y Figura 38 se observa que hay sobreestimaciones y subestimaciones del caudal modelado. Ello es una consecuencia de la complejidad en la estimación de los parámetros necesarios para la calibración óptima del modelo de almacenamiento de agua en el suelo, así como al momento de separar los sub-flujos de la serie histórica de caudales. La validación obtenida para los períodos de sequía es más satisfactoria comparado con los períodos de invierno, sin embargo, el resultado total de la validación es aceptable.



El pico generado en el día 360 (14/06/2015) es un evento extremo donde el invierno en esta fecha puede deberse a patrones climáticos regionales influenciados por los descensos marcados de la temperatura del aire y los aumentos de las velocidades del viento en los meses de junio, julio y agosto que es el período del invierno austral en el hemisferio sur (Mosquera, 2016).

Paso 6. Caudales máximos y mínimos

Los resultados permiten comparar los valores modelados contra los observados mediante la transformación Box-Cox. La transformación Box-Cox (BC) a los flujos de caudal observados y simulados, sirve para evaluar el desarrollo del modelo (Willems et al., 2014). De tal manera que, el error medio cuadrático de los residuos del modelo se vuelva aproximadamente constante o independiente en el valor de escorrentía. Esta transformación puede, en función de su valor de parámetro λ , cubrir una amplia gama de transformaciones de débiles a fuertes.

El parámetro λ necesita ser calibrado para alcanzar homogeneidad en los residuos del modelo. Para el caso de los caudales picos, el grafico muestra que en mayor número los resultados son subestimados y con un intervalo de confianza más grande que para los caudales mínimos. Lo anterior indica que los caudales bajos son mejor modelados por el programa. Para los dos casos, mayor número de datos se encuentran entre los límites de confianza y alrededor de la media.

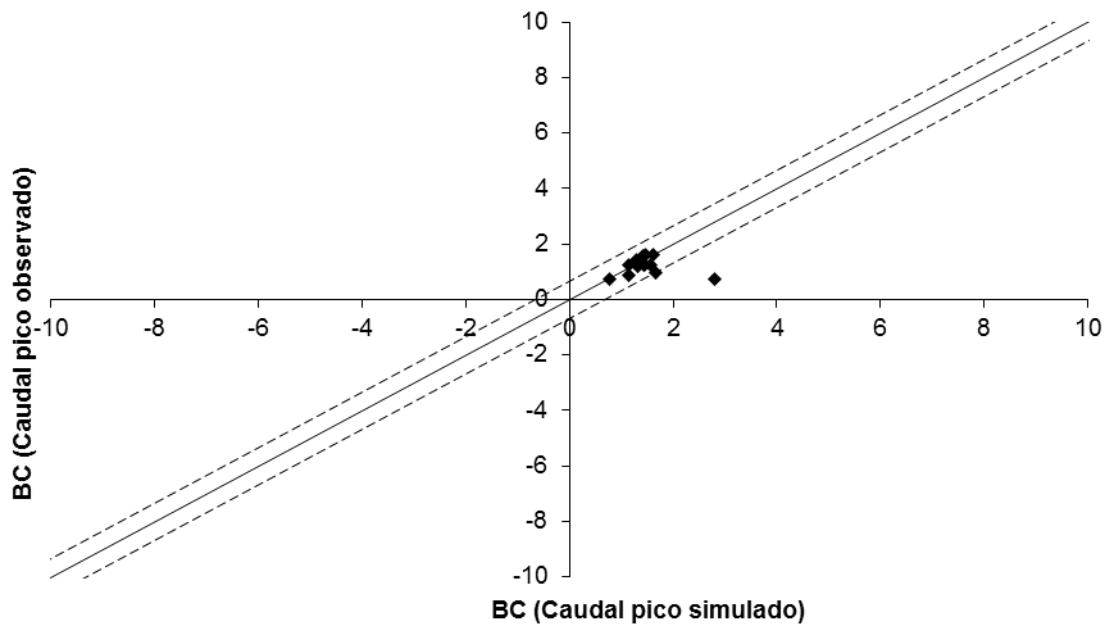


Figura 39. Validación de los eventos simulados y observados para eventos de caudal máximo ($\lambda = 0.25$) de la cuenca del Culebrillas

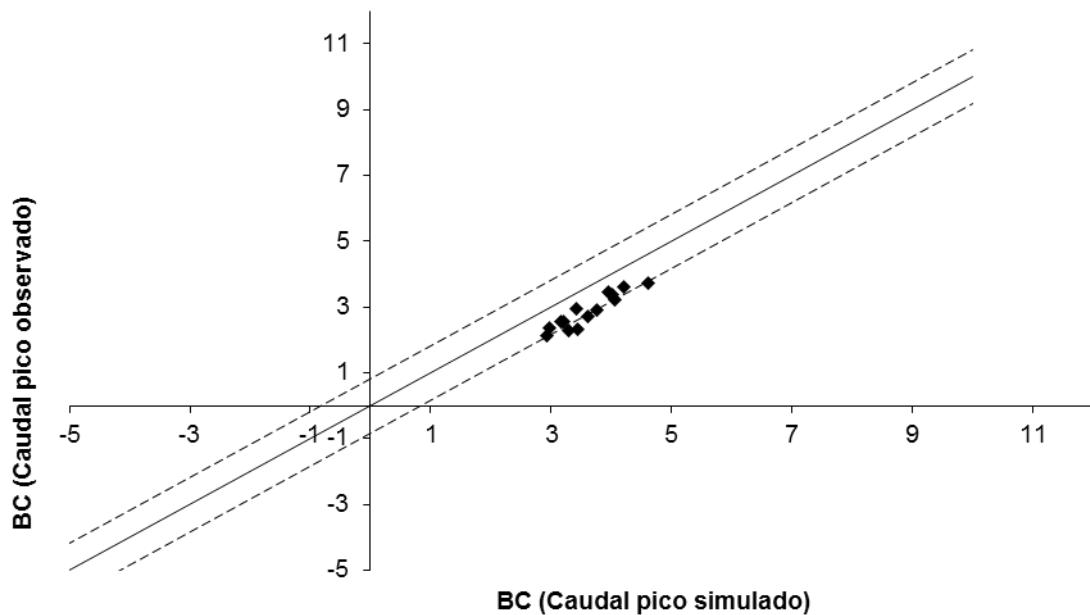


Figura 40. Validación de los eventos simulados y observados para eventos de caudal máximo ($\lambda = 0.25$) de la cuenca del Tomebamba

Paso 7. Valores Acumulados

Los dos gráficos a continuación presentados, compara los valores observados, los sub-flujos filtrados y los resultados modelados por el VHM en valores acumulados. se observa tramos de sobreestimación y subestimación del flujo modelado (línea azul), esto provoca una compensación entre los caudales, lo que explica un buen balance a la hora de evaluar el desempeño del modelo VHM.

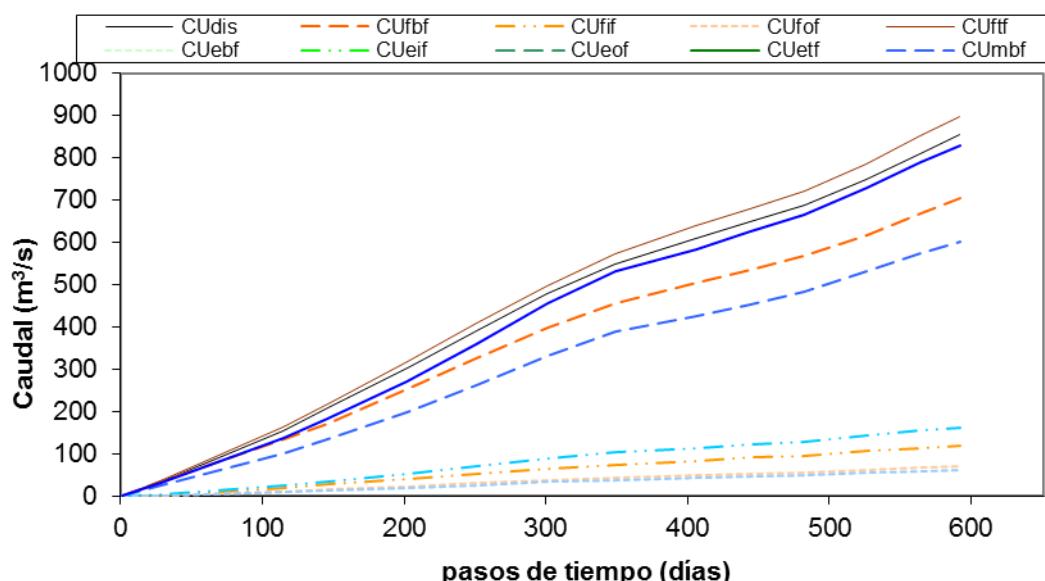


Figura 41 Caudales acumulados de la cuenca del Culebrillas

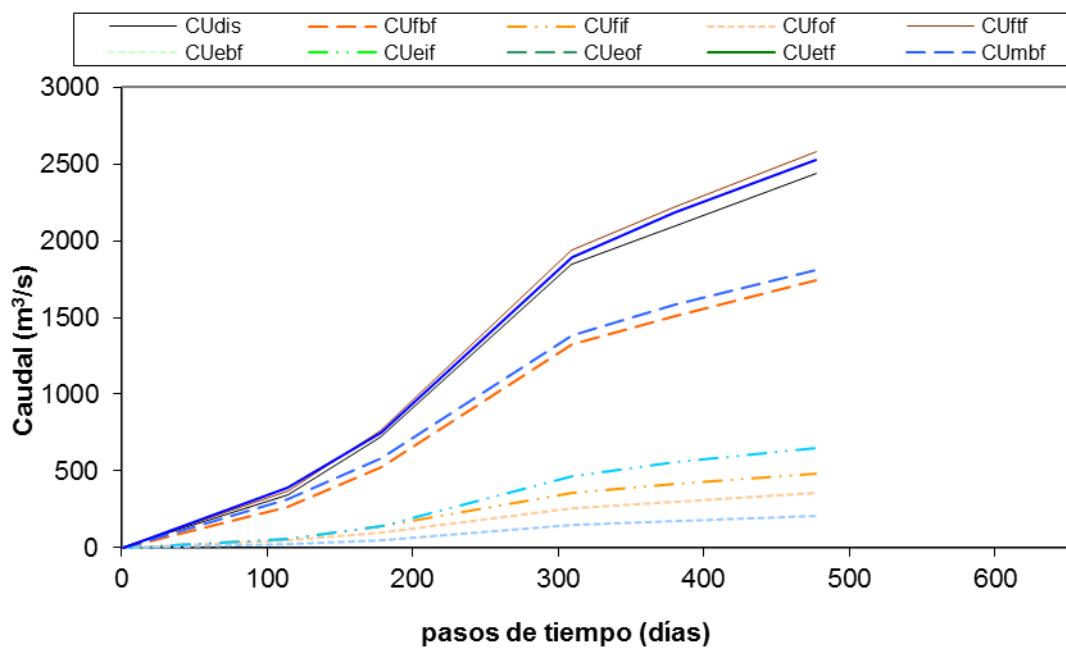


Figura 42. Caudales acumulados de la cuenca del Tomebamba

Según Buytaert et al. (2008) la hidrología de ecosistema páramo es bien conocida por su alto flujo base y la producción de agua de excelente calidad. Debido a las dificultades relacionadas con la extracción de agua subterránea, la escorrentía del páramo es el mayor suministro de agua para la mayoría de las tierras altas andinas. Son considerados además reguladores naturales de agua. Por tanto, existe un alto grado de incertidumbre en el páramo de la subcuenca del estudio ya que, el suelo de este ecosistema posee una elevada capacidad de retención de agua que supera el 90%; por lo que, llega a tener diferentes comportamientos (Mora et al., 2014), es decir que no es una relación única, como ocurren en otros suelos.

4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TOPMODEL

4.4.1 Función acumulativa de retraso de la cuenca en TOPMODEL

La función acumulativa de retraso de la cuenca (lag-time), representa el tiempo de residencia (o de concentración) de la red de drenaje que tarda el flujo superficial y superficial generados en cada subcuenca para ser conducidos a la salida (TOPMODEL, 2011). La propagación del se observa en el histograma tiempo/área, derivado de la función distancia/área (Tabla 13 y Tabla 14).

Tabla 13. Función acumulativa de retraso para la cuenca del Culebrillas

Área (km^2)	Área Acumulada (km^2)	% Área Acumulada	Distancia del cauce para cada polígono (m)	Distancia acumulada a la salida (m)
		0%		0
13.06	13.06	24%	6003	6003
11.45	24.51	45%	3563	9565
17.71	42.22	77%	4297	13862
12.69	54.91	100%	5387	19249

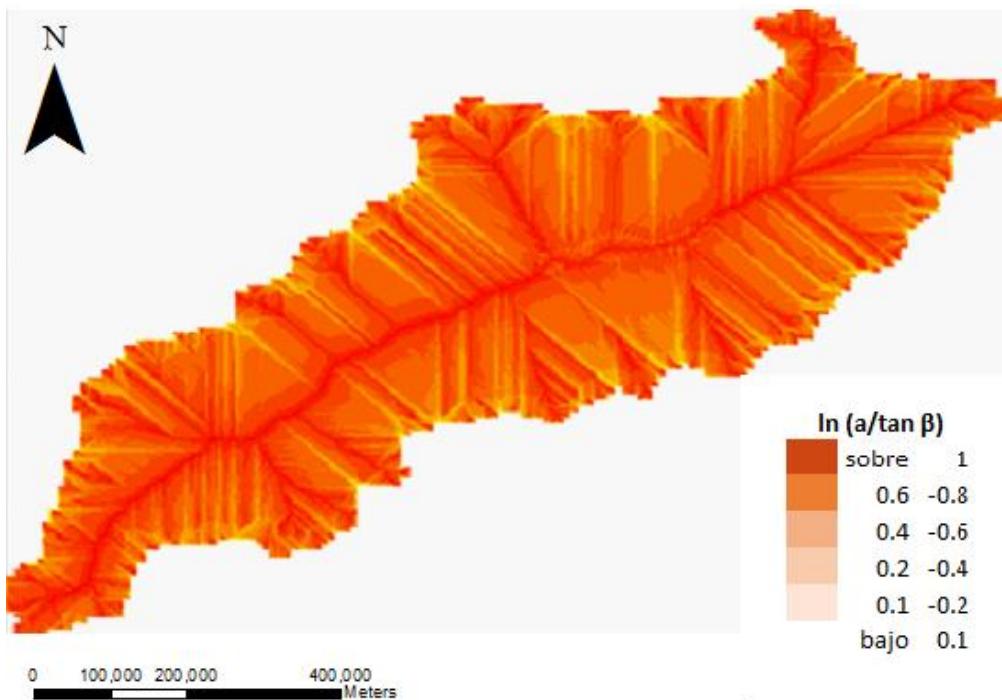


Figura 43. Mapa de índice topográfico $\ln(a/\tan\beta)$ de la cuenca del Culebrillas, basado en una grilla raster de 3m., del modelo digital de elevaciones

Para el cálculo de la función acumulativa de las cuencas obtenemos los mapas de índices topográfico (Figura 43 Figura 44), se observa en las figuras una correspondencia entre los valores más altos del índice topográfico con la red de drenaje. Sin embargo, se presentan zonas en la quebrada con valores más altos, esto puede ser por la resolución espacial del DEM (Pan et al., 2004). Esto influye en la determinación espacial de las áreas de saturación, pero no incide directamente en la predicción de los caudales, aunque en algunas ocasiones podría sobreestimarlos (Gil, 2012).

Tabla 14. Función acumulativa de retraso para la cuenca del Tomebamba

Área (km ²)	Área Acumulada (km ²)	% Área Acumulada	Distancia del cauce para cada polígono (m)	Distancia acumulada a la salida (m)
0	0	0%	0	0
77.61	77.61	33%	611.67	611.67
65.09	142.70	61%	5428.43	6040.1
89.44	232.14	100%	19058.3	25098.4

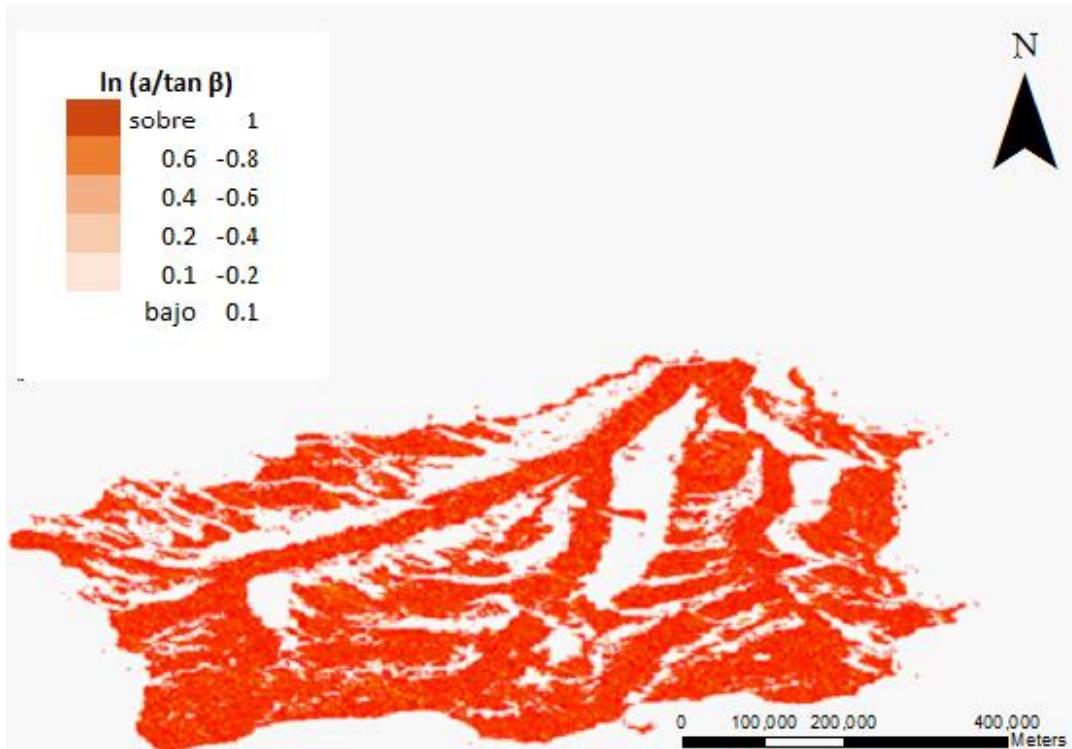


Figura 44. Mapa de índice topográfico $\ln(a/\tan\beta)$ de la cuenca del Tomebamba, basado en una grilla raster de 3m., del modelo digital de elevaciones.

4.4.2 TOPMODEL

En la Tabla 15 se observa la simulación hidrológica, así como la optimización Monte Carlo y las sensibilidad de parámetros. En la Figura 45 y Figura 46 se observa el comportamiento de cada parámetro para la cuenca del Culebrillas y la del Tomebamba respectivamente, luego de 20000 iteraciones y de acuerdo al valor más alto del coeficiente de Nash y Sutcliffe (Buytaert et al., 2010). De esta información se indica que, los parámetros “m”, “lnTe”, y “vr” son los que presentan mayor sensibilidad de la eficiencia con respecto a los diferentes valores asignados dentro del rango de cada uno, se puede observar claramente dónde se producen los valores óptimos para cada parámetro.

Para el caso de Sr_0 y SR_{max} , la eficiencia no presenta ninguna tendencia con respecto a los valores de este parámetro; es decir, la eficiencia del modelo es independiente del valor que se le asigne a este parámetro dentro del rango establecido para el mismo, ya que estos parámetros tienen baja sensibilidad.

El parámetro más sensible, m, representa la influencia de la conductividad del suelo al contenido de agua (Buytaert et al., 2010). Para la cuenca del Tomebamba este valor es del orden de 0.02 siendo el doble para la cuenca del Culebrillas (0.04); siendo estos valores relativamente pequeños indicando que la conductividad cae muy rápidamente cuando el contenido de humedad del suelo deja el punto de saturación, estudios previos por parte de Buytaert et al., (2005) indican valores alrededor de 0.02 y 0.05 que se encuentran cerca del valor encontrado.

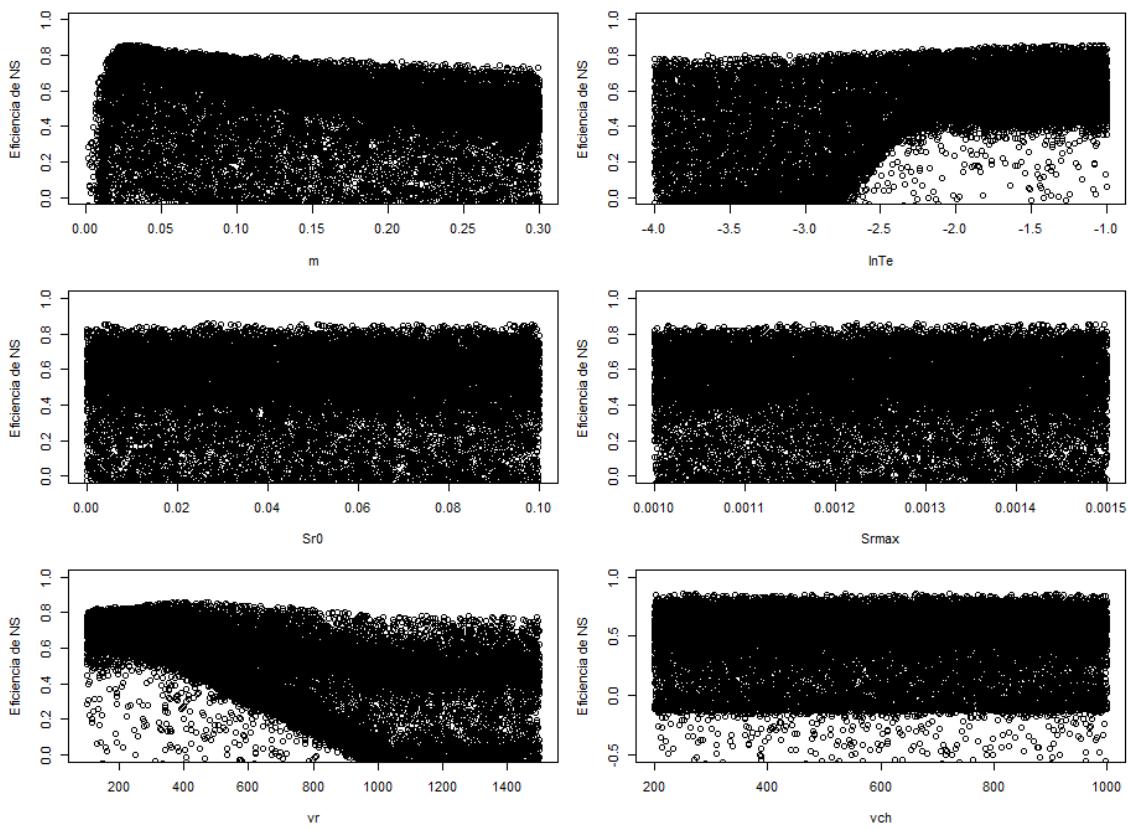


Figura 45. Valores optimizados de Monte Carlo para cada parámetro de TOPMODEL implementado en la microcuenca del Tomebamba

Según estudios de campo indican que la conductividad saturada del suelo va entre 5 y 35 mm/h y el promedio es de 14.5 mm/h (Buytaert et al., 2010). En este análisis la conductividad saturada es de 8.6 mm/h para la cuenca del Tomebamba y 9.5 mm/h para la cuenca del Culebrillas, como se observa en las siguientes ecuaciones.

$$\ln(Te) = \ln(ks * d)$$

$$\ln(ks) = \ln\left(\frac{Te}{d}\right)$$

$$ks (\text{Tomebamba}) = e^{Te/d} = e^{-2.549/24} = 0.86 \text{ cm/h}$$

$$ks (\text{culebrillas}) = e^{Te/d} = e^{-2.602/24} = 0.95 \text{ cm/h}$$

Por tanto, estos valores se encuentran dentro de los valores de las mediciones de campo tomadas por experimentos por varios métodos como el de pozo invertido, tensiómetro-infiltrómetro y de campo, por lo que no subestiman la conductividad hidráulica del suelo. La velocidad del agua (Vr) es de 0.035 m/s para la subcuenca del Tomebamba y de 0.09 m/s para la subcuenca del Culebrillas. Esto quiere decir que la velocidad de la cuenca del culebrillas es mucho más rápida con respecto a la otra cuenca, esto indica que existe un tipo de reservorio más conservado que en este caso es el páramo, donde el agua es almacenada y que no se encuentra ni en la matriz del suelo ni en la red de drenaje, además que es fuertemente relacionado con las grietas y microporos (Buytaert et al., 2005).



Dentro de las consideraciones de la influencia sobre los parámetros menos sensibles por Buytaert et al., (2010) indica que al ser TOPMODEL un modelo hidrológico semi-distribuido dependen de la variabilidad espacial de las clases del índice topográfico. Recomienda que, para mejorar el algoritmo de tránsito de caudales, la topografía de la cuenca debería ser dividida en diferentes partes cada uno con su propia distancia de viaje hacia el punto de corte de la cuenca. De esta manera se realizó la división del cauce para que el sistema de tránsito de la cuenca sea más realista. Finalmente, la velocidad de agua en los cauces en el estudio de Buytaert es de 0.2 m/s mientras que la de esta investigación es mucho menor.

El coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe máximo encontrado para el periodo de calibración y validación para la cuenca del Tomebamba es de 0.86 y 0.85 respectivamente, mientras que para la cuenca del culebrillas es de 0.97 y 0.73 mismo que representa una simulación satisfactoria, el set de parámetros correspondiente a esta eficiencia se presenta en la Tabla 15.

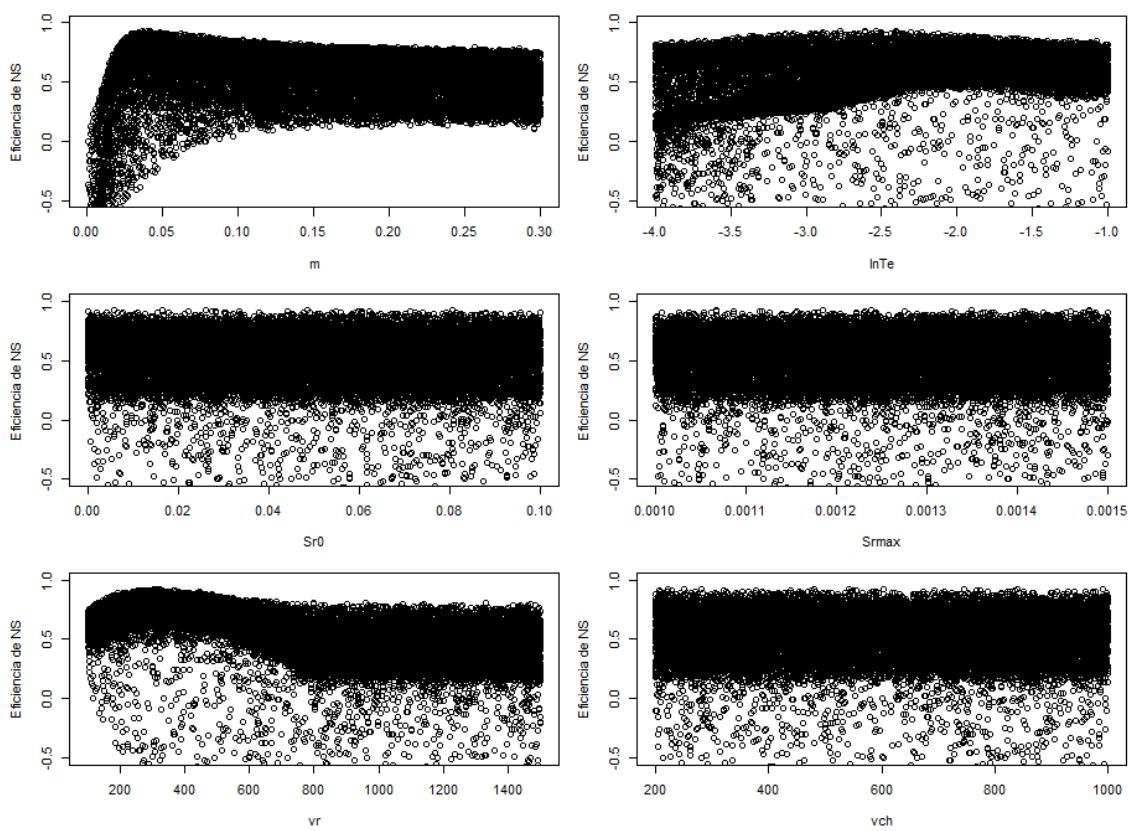


Figura 46. Valores optimizados de Monte Carlo para cada parámetro de TOPMODEL implementado en la cuenca de Culebrillas

Tabla 15. Parámetros óptimos de TOPMODEL para la cuenca del Tomebamba y Culebrillas

Cuenca	Tomebamba	Culebrillas	Unidades
m	0.0199	0.0388	m
lnTe	-2.549	-2.602	m^2/h
Sr0	0.092	0.050	m
Srmax	0.001	0.001	m
vr	124.978	323.416	m/h



En la Figura 48 se observan los resultados finales que da el programa TOPMODEL, en donde se puede observar con claridad que la cuenca del Tomebamba es la que almacena mayor cantidad de agua y esto se debe claramente al efecto de las lagunas que existe en esa cuenca, incluso se observa que en época de verano el almacenamiento es menor pero que reserva entre 30 a 100 mm y en la subcuenca del Culebrillas almacena entre 0 a 90 mm.

Se presentan, además los resultados obtenidos con el modelo que comprenden las partes más importantes del balance hídrico de las microcuencas. En las figuras 48 (a) se puede observar que los caudales altos (mayores a $28 \text{ m}^3/\text{s}$ o aproximadamente 10 mm expresados en lámina de agua para la cuenca del Tomebamba y mayores a $3 \text{ m}^3/\text{s}$ o aproximadamente 5 mm para la cuenca del Culebrillas) se producen cuando las precipitaciones a más de ser alta intensidad son de larga duración. Es fácil observar como algunos eventos puntuales de precipitación únicamente de alta intensidad no se ven reflejados en el caudal, demostrando así, la gran capacidad de absorción de los suelos; al comparar las figuras 48 (a) y (b) de las cuencas se hace más evidente este hecho, ya que la escorrentía superficial se produce de manera significativa únicamente en los eventos de caudal alto. Por tanto, se observa que el programa TOPMODEL es bastante adecuado para interpretar cuencas con suelo de páramo.

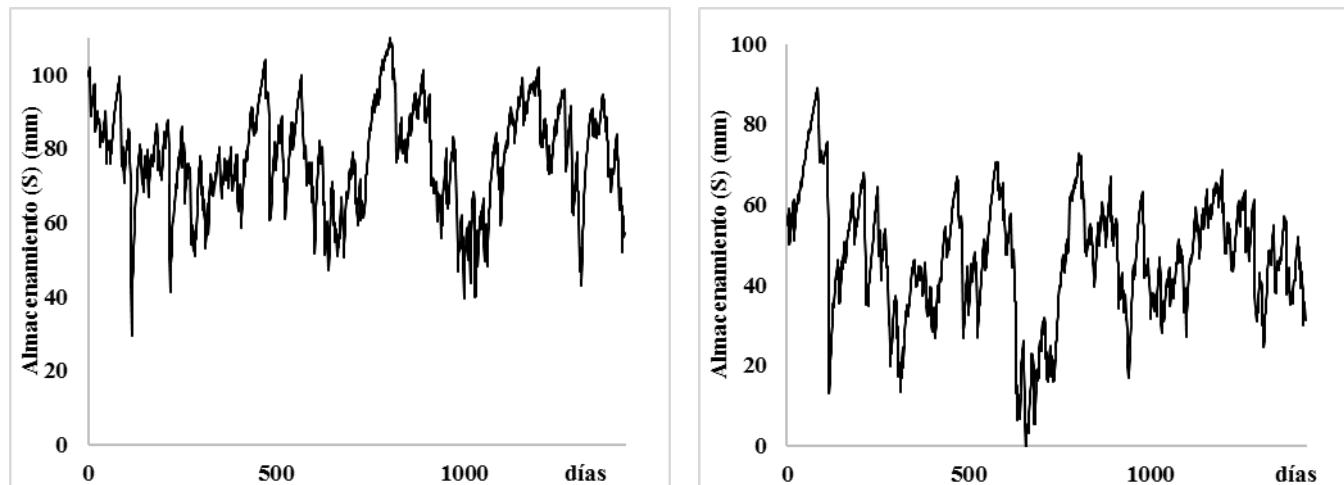
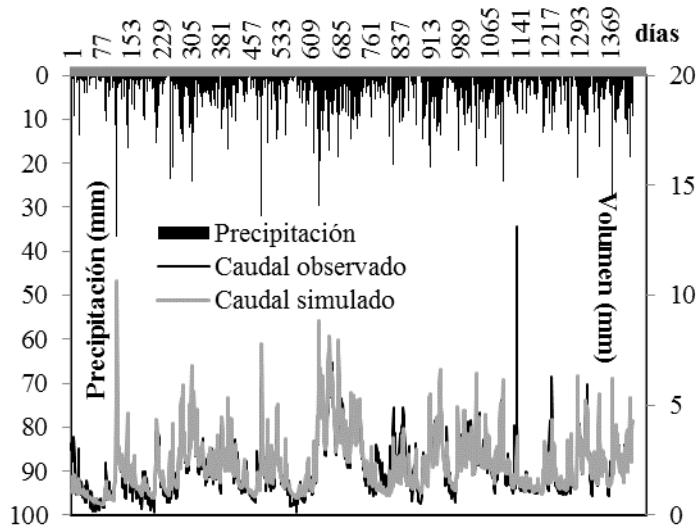
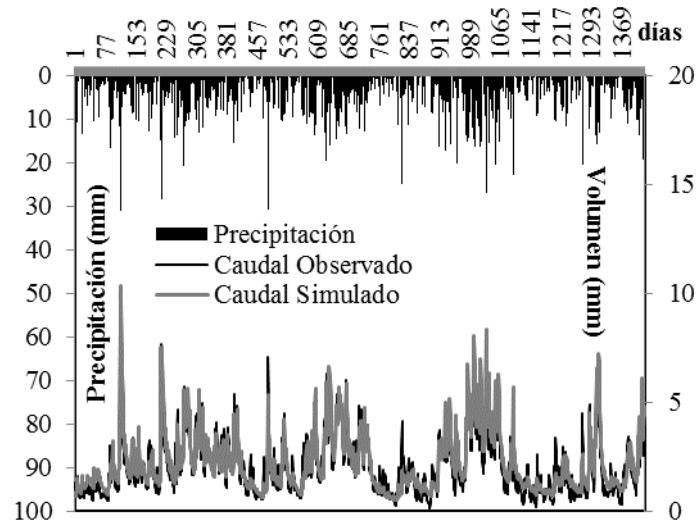


Figura 47. Almacenamiento de la cuenca del Culebrillas (izq.) del Tomebamba (der).

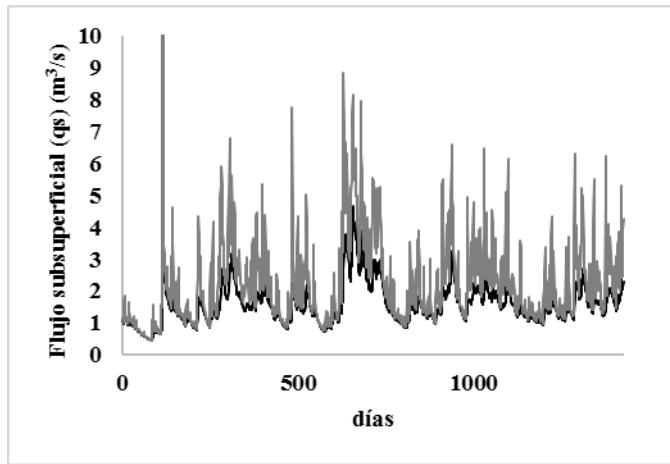
Se puede observar claramente en la última Figura 47, los picos más marcados en la cuenca del Tomebamba ratifican la respuesta de páramos, caracterizados por alta saturación y alta conductividad hidráulica (Guzmán et al., 2015).



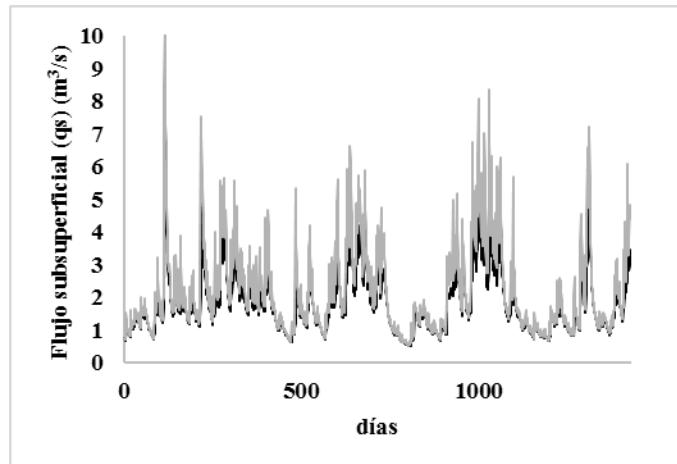
a)



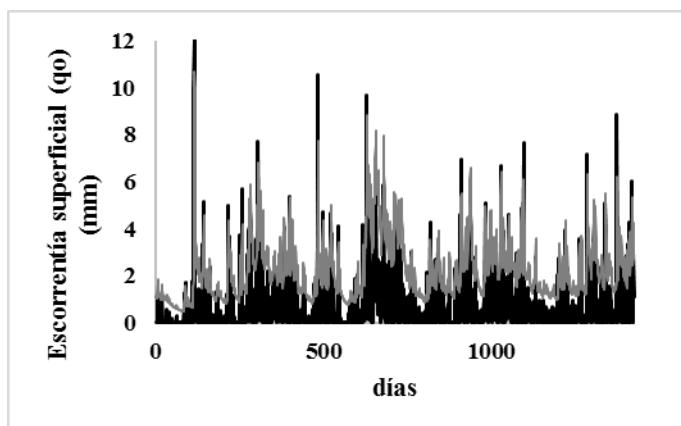
a)



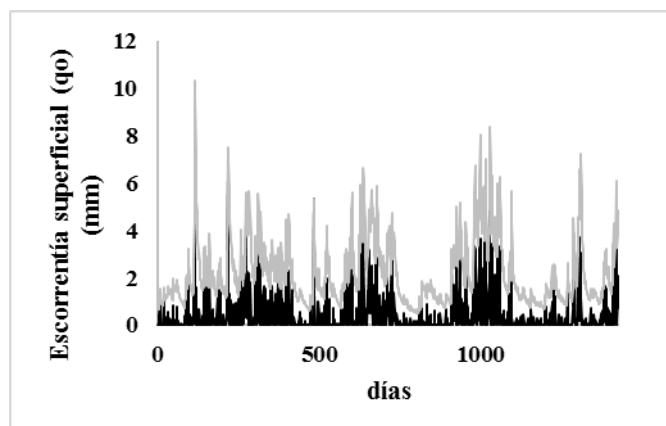
b)



b)



c)



c)

Figura 48. Resultados obtenidos con los modelos para las microcuencas Culebrillas (izq.) Tomebamba (der.)



Después de haber analizado los datos y simulado con cada programa, se puede observar que tanto para la calibración como para la validación los caudales simulados de las subcuenca del Tomebamba y Culebrillas por lo general subestiman los caudales observados Tabla 16. Sin embargo, en el proceso de calibración los resultados son mejores en comparación a los obtenidos en el proceso de validación; en especial en la predicción de los picos que se presentan en los períodos analizados. En este contexto, es importante indicar que, en el proceso de calibración la dinámica y magnitud de lo simulado es muy similar a lo observado, razón por la cual se determina que el rendimiento del modelo TOPMODEL es muy bueno.

Tabla 16. Eficiencia de los modelos hidrológicos VHM y TOPMODEL

Cuenca	Coeficiente	VHM		TOPMODEL	
		Calibración	Validación	Calibración	Validación
Tomebamba	NSE	0.91	0.82	0.86	0.85
	WBD	-5.54%	2.02%	2.22%	6.18%
Culebrillas	NSE	0.97	0.74	0.97	0.73
	WBD	-1.36%	-3.43%	3.65%	-2.70%

Con esto se puede indicar que, la cuenca del Tomebamba tiene un área de páramo que está más deteriorada con respecto a la otra y a pesar de que es más grande tiene mayor influencia de otros factores externos, por tanto, presenta una eficiencia de simulación mucho mayor, que aquella de la subcuenca Culebrillas, la cual se supone debió ser más simple.

La estructura y en el periodo de calibración con el programa TOPMODEL en la cuenca del Tomebamba dio como resultados una eficiencia NS máxima de 0.86 (2014-2016) y para el período de validación un NS de 0.85 (2016-2018). Para la cuenca de Culebrillas dio como resultados una eficiencia NS máxima de 0.97 (2014-2016) y para el período de validación un NS de 0.73 (2016-2018). Considerando una excelente simulación. Este análisis únicamente se había realizado para cuencas pequeñas sin embargo en cuencas de mayor tamaño se demuestra que simula bastante bien. En las zonas montañosas irregulares, los errores de entrada resultantes pueden ser grandes y diferentes en los períodos de calibración y evaluación.

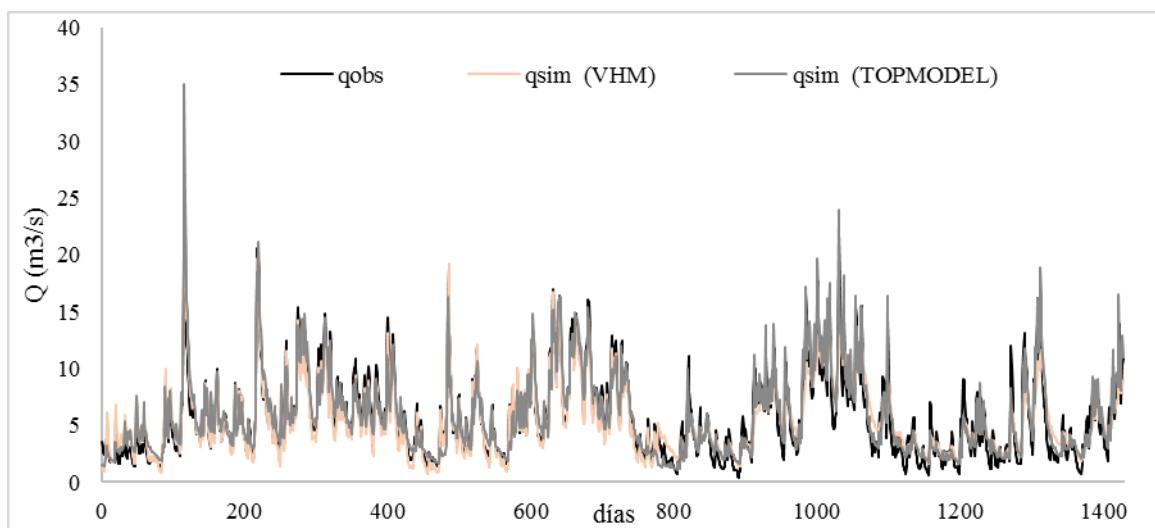


Figura 49. Caudales observados y simulados de los modelos hidrológicos TOPMODEL y VHM para la cuenca del Tomebamba.



La estructura y en el periodo de calibración con el programa VHM en la cuenca del Tomebamba dio como resultados una eficiencia NS máxima de 0.91 (2014-2016) y para el período de validación un NS de 0.82 (2016-2018). Para la cuenca de Culebrillas dio como resultados una eficiencia NS máxima de 0.97 (2014-2016) y para el período de validación un NS de 0.74 (2016-2018). Considerando una excelente simulación.

El programa VHM al poder interactuar mejor con varios conjuntos de parámetros, muestra mejores eficiencias que el TOPMODEL. Este último se restringe sólo a ciertos parámetros cuando unos son más sensibles que otros.

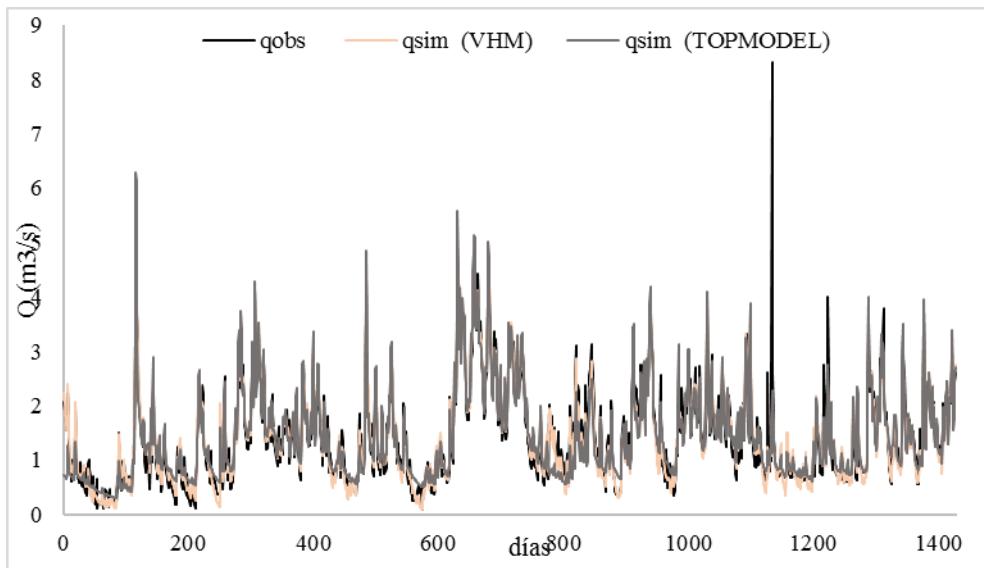


Figura 50. Caudales observados y simulados de los modelos hidrológicos TOPMODEL y VHM para la cuenca del Culebrillas.

4.5 SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS DE LAS CUENCAS PAREADAS MEDIANTE LOS MODELOS VHM Y TOPMODEL

Los modelos hidrológicos se abordan de manera reflexiva. Por un lado, TOPMODEL tiene dos ventajas principales: la simplicidad y la posibilidad de visualizar las predicciones del modelo en un contexto espacial (Beven, 1997). Mientras que el VHM se basa en un procedimiento de identificación de estructura de modelo paso a paso, los enfoques tradicionales para el modelado de precipitación-escorrentía conceptual utilizan un modelo con estructura de modelo prefijada (Willems et al., 2014).

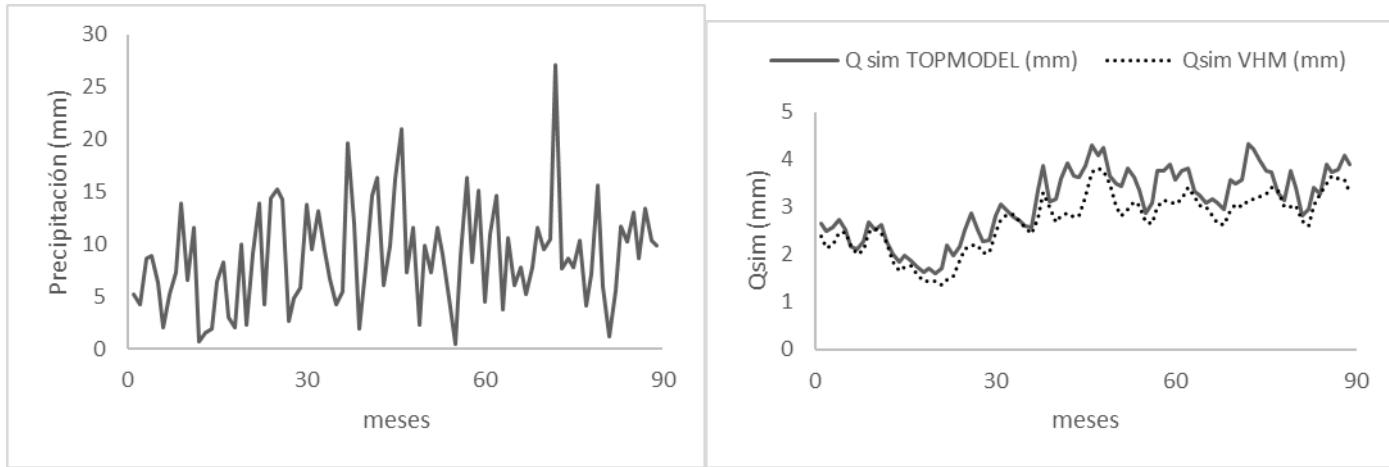
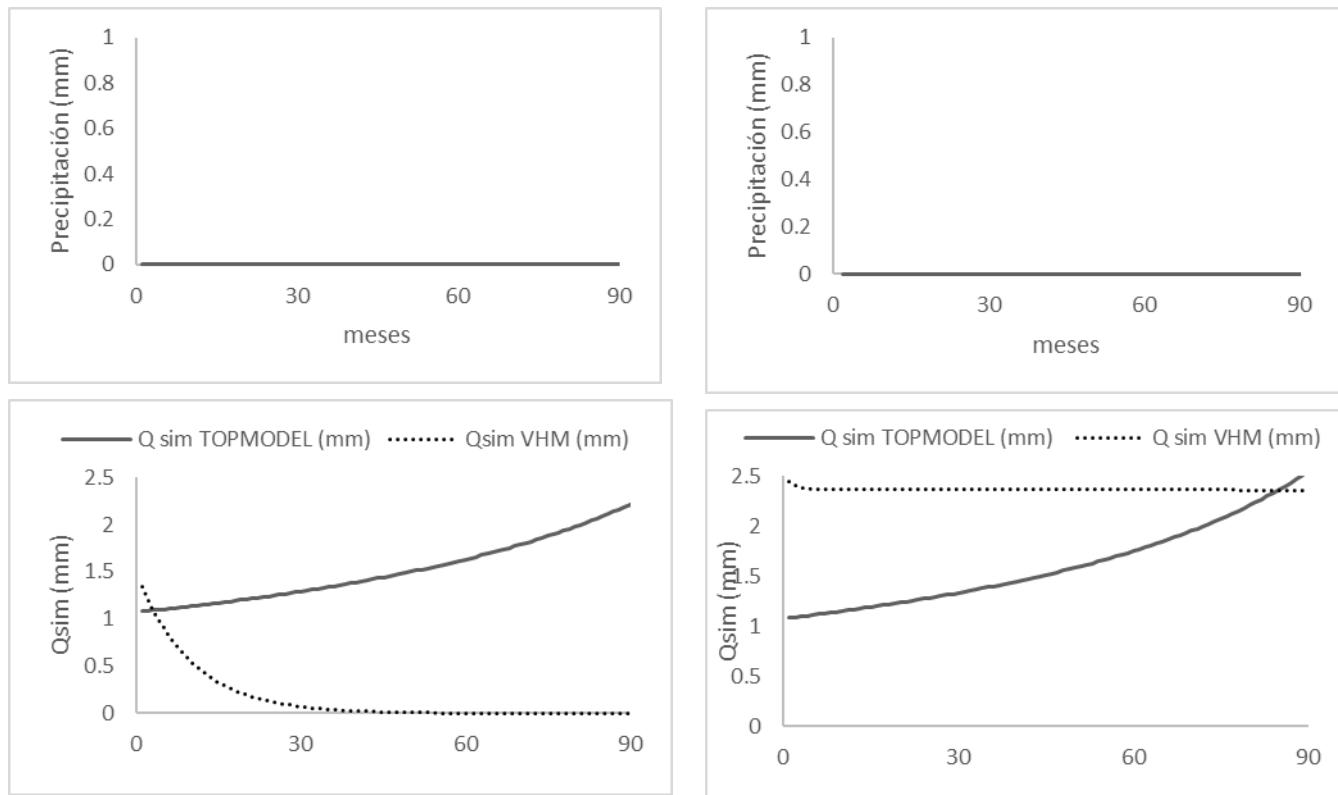


Figura 51. Datos de simulación de los procesos hidrológicos que han producido en época de lluvia para las cuencas del Tomebamba (izq) y Culebrillas (der)

En la Figura 51 y Figura 52, se presentan la información de los datos de entrada que se analizaron para la modelación de la época seca y la época de lluvia para cada modelo hidrológico implementado.

Una vez ingresado los datos, se procedió a realizar la modelación con el programa VHM y TOPMODEL, considerando los parámetros modelados en el apartado anterior de la Tabla 8. Parámetros de entrada al programa WETSPRO para las 2 cuencas Tabla 8 para el WETSPRO y de la Tabla 11 para el VHM. Por otra parte, los valores modelados obtenidos del programa TOPMODEL se muestran en la Tabla 17. Con las mismas consideraciones anteriores se concluye lo siguiente el parámetro más sensible, m , en la época de lluvia esta alrededor de 0.7; siendo estos valores muy altos indicando el contenido de humedad del suelo se ha saturado.



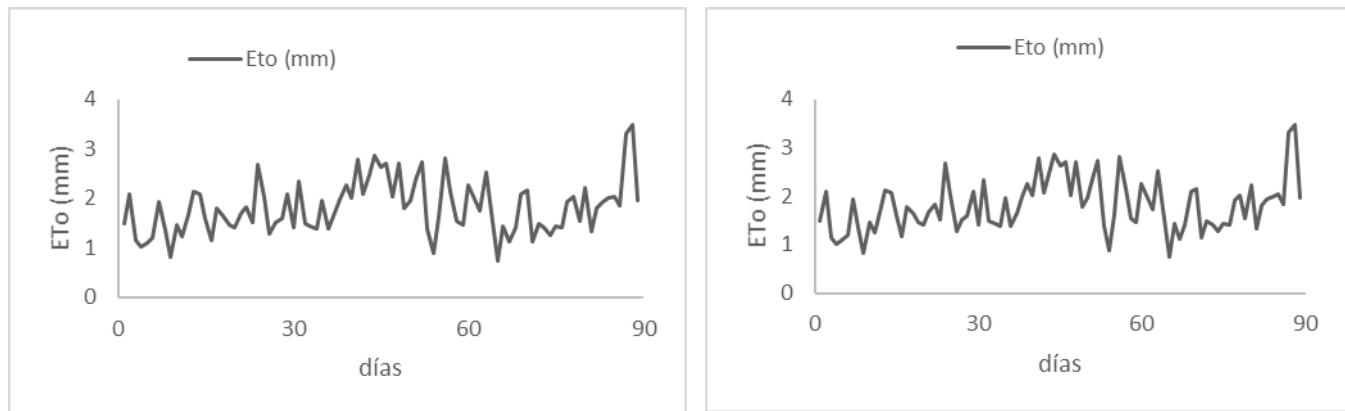


Figura 52. Datos de simulación de los procesos hidrológicos que han producido en época seca para las cuencas del Tomebamba (izq) y Culebrillas (der)

Por otro lado, la conductividad saturada del suelo en la época de lluvia es alrededor de 9.4 mm/h, similar a la Ks de la simulación general (ver Tabla 15), y de 8.8mm/h para la época seca. La velocidad del agua indica que en época de lluvia la velocidad es mucho más rápida con respecto a la otra época. En la época de sequía se puede observar que la cuenca del Tomebamba tiene una velocidad mucho más lenta, esto quiere decir que el agua es almacenada y que se encuentra en la matriz del suelo y en la red de drenaje.

Tabla 17. Parámetros óptimos de TOPMODEL para la cuenca del Tomebamba y Culebrillas considerando la época seca y lluviosa

Cuenca	Tomebamba		Culebrillas		Unidades
	Época	Lluvia	Sequía	Lluvia	Sequía
m	0.79	-0.14	0.60	-0.17	-
lnTe	-1.41	-2.98	-1.85	-2.85	m^2/h
Sr0	0.0022	0.80	0.00007	0.57	m
Srmax	0.001	0.76	0.001	0.59	m
vr	101.82	5378	249.2	409.8	m/h

Tabla 18. Eficiencia de los procesos hidrológicos VHM y TOPMODEL en un período de 90 días

Cuenca	Coeficiente	VHM		TOPMODEL	
		Lluvia	Sequía	Lluvia	Sequía
Tomebamba	NSE	0.61	0.20	0.64	0.39
	WBD	1.54%	2.17%	86.87%	-1.08%
Culebrillas	NSE	0.55	0.23	0.81	0.55
	WBD	12.97%	-3.43%	2.60%	0.71%



En la Tabla 18 se puede observar que las mejores eficiencias son las del programa TOPMODEL, sin embargo se puede notar que el modelo en época seca es el que las eficiencias no son del todo aceptables, es por esto que, el almacenamiento que representa cada cuenca se presentan en las Figura 53 y Figura 55 para la época seca y de lluvia respectivamente. Se nota claramente que en época de invierno la cuenca del Tomebamba almacena más agua que la cuenca del Culebrillas, en donde se puede concluir que la influencia de las lagunas es imprescindible.

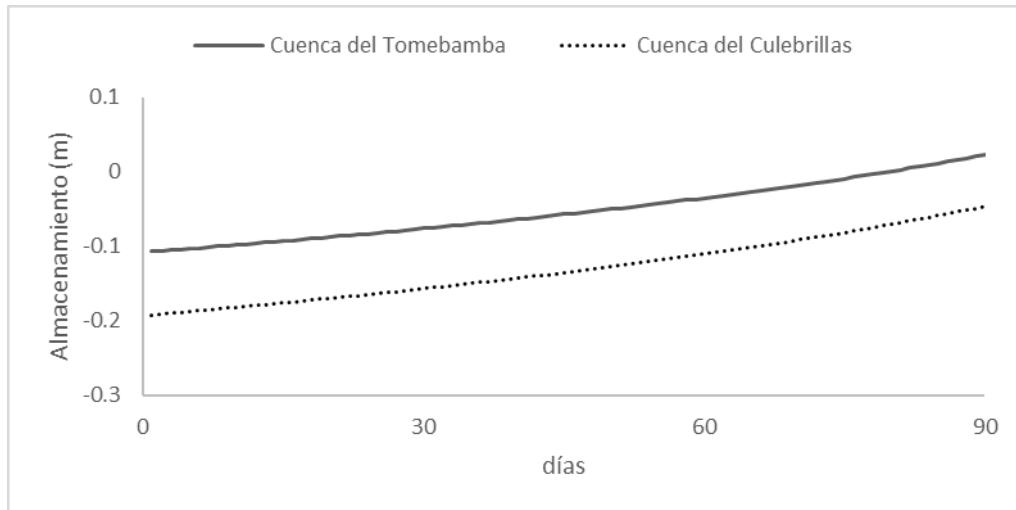


Figura 53. Escenario de almacenamiento del programa TOPMODEL de las cuencas pareadas en época seca

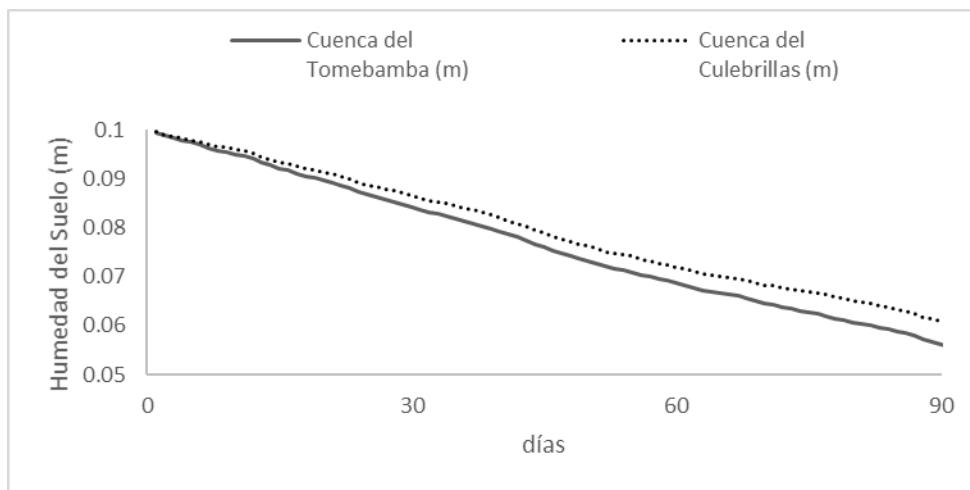


Figura 54. Escenario de humedad del suelo del programa VHM de las cuencas pareadas en época seca

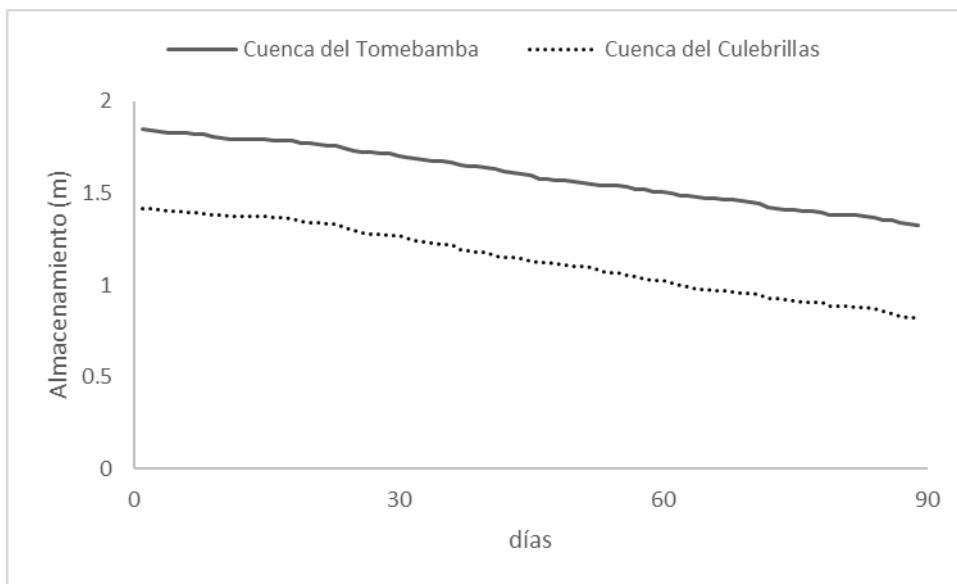


Figura 55. Escenario de almacenamiento del programa TOPMODEL de las cuencas pareadas en época de lluvia

En la época de una sequía extrema, es decir, con 3 meses sin lluvia, se puede observar que el almacenamiento de la cuenca del Tomebamba empezaría a ocurrir a partir de los meses de octubre, debido a que antes de esa época la cuenca no almacena nada de agua. Para la cuenca del Culebrillas en época de sequía la cuenca no retiene agua debido a los valores negativos que presenta la gráfica. Finalmente, se podría concluir que, las lagunas son reguladoras de caudal y que además influyen significativamente en estos casos de sequía..



CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de la presente investigación, tiene como objetivo cuantificar la regulación hídrica de lagunas en cuencas pareadas en la zona alta de páramo del Austro Ecuatoriano. El estudio realizó la comparación el comportamiento de dos modelos hidrológicos VHM y TOPMODEL en las cuencas Tomebamba y Culebrillas, con la finalidad de asegurar que efectivamente el suelo del páramo tiene una alta capacidad de retención hídrica. Hofstede et al., (2002) indica que, el suelo del páramo al ser una limitada extensión alrededor del mundo (35.000 Km²) son reconocidos por los servicios ambientales que proporcionan; entre estos servicios se encuentra la conservación de la biodiversidad, el almacenamiento de carbono en el suelo, la hidroenergía y principalmente, el abastecimiento de agua potable para las grandes ciudades, como es el caso de la ciudad de Cuenca que depende casi en un 90% del agua proveniente de los páramos (Iñiguez et al., 2016) localizados en el Parque Nacional El Cajas.

5.1 MODELO VHM

Sobre la separación de flujos:

De los resultados obtenidos es claro ver una diferencia muy marcada en las constantes de flujo. En la cuenca del Tomebamba y Culebrillas, donde el flujo base la constante de recessión está alrededor de 16 y 22 días respectivamente, mientras que la respuesta hidrológica a eventos de lluvia extremos es muy rápida, con resolución de 1 hora. Lo que corrobora investigaciones anteriores realizadas por el (PROMAS, 2011) sobre el comportamiento de microcuenca de páramo.

Es posible concluir que la herramienta computacional para separación de flujo tiene un buen desempeño en microcuenca de páramo, y su fácil y rápido acceso son aspectos importantes que resaltan la utilidad del programa.

Sobre el modelo VHM:

La calidad de la información de precipitación es de crucial importancia. A partir de la validación realizada, es claro ver que la eficiencia es la más baja, y esto puede ocurrir debido a la incertidumbre de los datos de la microcuenca. Puesto que la cuenca alta del Culebrillas se simula con una serie de datos de una cuenca vecina. La relevancia de los datos de precipitación es crucial, o lo que es lo mismo, sobre la validez de un modelo agregado como VHM en cuencas de montaña, donde la variabilidad de la lluvia es muy grande.

5.2 MODELO TOPMODEL

Los resultados obtenidos por el modelo TOPMODEL revelan que, cuando el régimen de caudales es menor a 28 m³/s, el flujo o escorrentía subsuperficial, representa el 100% del caudal, lo que revela la alta capacidad de regulación a la cuenca del Tomebamba aún en los meses más secos (Barrera and Torres, 2010). Es decir, siempre existirá un caudal alimentado por el agua retenida en las microcuenca en forma de escorrentía subsuperficial, por lo que de esta manera se constituye en la principal fuente de generación de escorrentía en las microcuenca de páramo. Además, que, la escorrentía superficial debido a la alta capacidad de retención de agua que tienen los suelos y las lagunas se puede concluir que la escorrentía



superficial se produce únicamente cuando los suelos han alcanzado el punto de saturación. Adicional de la escorrentía subsuperficial, siempre presente, se produce escorrentía superficial por exceso de saturación.

El primer estudio que TOPMODEL había sido aplicado por Buytaert et al., (2010), en una microcuenca (Huagrahuma) de páramo al sur del Ecuador, con un área 2.65 km^2 aproximadamente. Con series de tiempo de 15 meses, obteniendo un NS de 0.77, es decir una buena modelación indicando que el modelo es capaz de simular relativamente bien la hidrología de la cuenca y que sus parámetros representan bastante bien la capacidad de amortiguamiento del suelo. Comparando con la zona de estudio se puede indicar que, la modelación hidrológica fue satisfactoria con un coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe alcanzado, de 0.73 y 0.85 para la cuenca del Culebrillas y Tomebamba respectivamente durante el periodo de validación, periodo en el cual se observó que la precipitación media refleja lo que ocurre con los caudales observados, y es justamente esta característica la principal condición que se debe cumplir para lograr una adecuada modelización.

Los parámetros obtenidos en la calibración del modelo tienen un sólido significado físico. El parámetro “m” representa la sensibilidad de la conductividad hidráulica del suelo al contenido de agua, los valores pequeños encontrados, alrededor de 0.05 para las microcuenca, indican que la conductividad cae muy rápidamente cuando el contenido de humedad del suelo deja el punto de saturación. La conductividad hidráulica saturada K_s calculada por el modelo es de 0.86 cm/h para Culebrillas y 0.89 cm/h para Tomebamba, comparando estos resultados con los resultados de las mediciones de campo, se puede ver que para todos los casos el modelo se encuentra cerca del valor promedio de la conductividad con respecto al método del pozo invertido cuyo valor promedio es de 0.97 cm/h; y, por otro lado, subestima la conductividad propuesto por el método del infiltrómetro de tensión de 5.52 cm/h. Por lo que la simulación, al igual que el método del pozo invertido, es sensible en cierta manera, a los caminos preferenciales de flujo en la estructura del suelo.

El parámetro “vr” representa la velocidad del agua en los cauces. En la calibración del modelo se determinó que es el parámetro más sensible con valores óptimos alrededor de los 0.03 m/s y 0.09 m/s para la cuenca del Culebrillas y Tomebamba respectivamente. Comparado con las velocidades medias obtenidas en los aforos líquidos que están alrededor de los 0.342 m/s resulta una velocidad muy lenta, por lo que indica la existencia de un reservorio donde el agua no se encuentra ni en la matriz del suelo ni en la red de drenaje, sino probablemente tenga que ver con los macroporos y grietas.

5.3 COMPARACIÓN DE MODELOS

La importancia del ecosistema de páramo para mantener el flujo base es una contribución significativa y una razón para conservarlos (Guzmán et al., 2015), es por eso la relevancia de analizar estos modelos. De acuerdo con los coeficientes NSE y WBD, la capacidad de reproducción de series históricas por el modelo VHM y TOPMODEL ha sido satisfactoria para la cuenca del río Tomebamba. Sin embargo, su comportamiento fuera aún mejor si estuviera acompañado de campañas de calibración en otros períodos para ver los desempeños del modelo.



Ambos modelos son importantes. Por un lado, TOPMODEL y su simplicidad del código permite que la estructura del modelo se modifique para que refleje las percepciones del modelador de la respuesta hidrológica de un sistema en particular. Mientras que la importancia del programa VHM es la posibilidad que el modelador tiene para controlar los diferentes componentes del modelo. Se indica también que la experiencia y buen criterio del modelador entra en juego a la hora de calibrar el modelo VHM, así como también una mejor resolución temporal de la serie histórica y buen análisis de control de calidad previo a la calibración.

La visualización rápida de las predicciones espaciales en el programa TOPMODEL también es importante, ya que las evidentes deficiencias del modelo pueden hacerse evidentes, incluso si las descargas pueden simularse a un nivel aceptable de precisión. Por otra parte, VHM ha demostrado que la identificación de la estructura del modelo no conduce a una mayor precisión que el enfoque tradicional cuando se utilizan criterios estadísticos comunes como el NS. Estos criterios evalúan el rendimiento general de la escorrentía, pero se muestra que no necesariamente reflejan el rendimiento del modelo para extremos de caudal alto, bajo y subflujos. (Willems et al., 2014).

Al simular los procesos hidrológicos de las cuencas pareadas para una época de fuertes precipitaciones en los meses de febrero, marzo y abril; y, para una época de sequía extrema, en los meses de agosto, septiembre y octubre, suponiendo que no ha llovido en 3 meses. Las eficiencias NS han sido aceptable cuando el modelo se realizó en los meses de invierno para el programa TOPMODEL 0.64 para la cuenca del Tomebamba y 0.81 para la cuenca del Culebrillas, y para el programa VHM de 0.61 y 0.55 respectivamente (ver Tabla 18). La eficiencia de la época de sequía es muy baja por lo que no es aceptable para comparar el comportamiento de cada cuenca en estas fechas. Una de las razones que se observa que estos programas no modelan fácilmente precipitaciones extremadamente bajas y al momento de modelar se vuelve tedioso y dificultoso encontrar parámetros que ajusten una buena eficiencia.

Se puede concluir que programa TOPMODEL es el modelo matemático más recomendable por su sencillez y porque da mejores eficiencias en este tipo de suelos páramos. Sin embargo, el modelo falla cuando existe alta variabilidad como ocurre en el suelo páramo, ya que, en época seca es el que las eficiencias no son del todo aceptables.

Finalmente, se concluye que el comportamiento del páramo mediante la modelación hidrológica y asumiendo el reservorio natural o lagunas asegura tener una alta capacidad de retención hídrica, y esto se puede observar en la Figura 53 para un caso de sequía extrema, la cuenca que tiene el aporte de las lagunas, almacena agua, lo cual no ocurre en una cuenca que no existe aporte de las lagunas.

Recomendaciones

En la presente investigación se determinó la capacidad de regulación de la cuenca del Tomebamba con 61 lagunas y por otro lado la cuenca del Culebrillas con 3 lagunas. Debido a la falta de información en la cuenca alta del culebrillas, la eficiencia dio como resultado un NS del 0.73 en el período de validación con los 2 programas modelados. Lo que conlleva a una incertidumbre en cuanto a la regulación hídrica de esa cuenca, ya que, al ser una cuenca con poca intervención humana supondría que la modelación sería más sencilla. Sin embargo, no ha sido así, debido a la falta de información de la zona alta de la cuenca del



Culebrillas. Por tanto, se sugiere realizar un estudio más a profundidad cuando se tenga más años de datos y más información en la cuenca alta del culebrillas.

Este trabajo ha tomado en cuenta exclusivamente la cobertura vegetal, tipo de precipitación y características morfométricas de las microcuencas de estudio. Sin duda se observa que, hay una influencia importante del estado actual del uso de suelos. Tanto como los cultivos, la ganadería extensiva y otras actividades antrópicas son factores adicionales que deberían ser tomados en cuenta para futuras investigaciones, ya que podrían estar alterando también la hidrología de las microcuencas de estudio. Es importante seguir monitoreando estas microcuencas directamente en la parte alta de la cuenca del río Culebrillas; ya que, actualmente ETAPA EP cuenta con una estación hidrológica y meteorológica en la zona baja, con la finalidad de tener series históricas de larga duración, y así poder comprobar los resultados de los estudios anteriores, además de conocer la tendencia del comportamiento de los caudales a futuro.



REFERENCIAS

- Amay, E., López, E., 2015. Estimación del Impacto del cambio Climático en la calidad del agua para la Cuenca del Rio Tomebamba en Monay. Universidad de Cuenca.
- Andrade, L., Ríos, C., 2014. Variabilidad climática y caudales mínimos en los Andes Ecuatorianos. Rev. Politécnica 33, 9.
- Barrera, P.D., Torres, C.O., 2010. Estudio sobre la generación de escorrentía en microcuencas de páramo con énfasis en la hidrofísica de suelos.
- Beven, K., 1997. TOPMODEL : A CRITIQUE. Hydrol. Process. 11, 1069–1085.
- Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., 1995. TOPMODEL, in: Computer Models of Watershed Hydrology. pp. 627–668.
- Buytaert, E., Dewaele, M., Agostinis, P., 2007. Molecular effectors of multiple cell death pathways initiated by photodynamic therapy. Biochim. Biophys. Acta 1776, 86–107. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2007.07.001>
- Buytaert, W., 2004. The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (unpublished).
- Buytaert, W., Beven, K., 2011. Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. Hydrol. Process. 25, 1784–1799. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Beven, K., 2011. Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. Hydrol. Process. 25, 1784–1799. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Beven, K., 2010. Models as multiple working hypotheses : hydrological simulation of tropical alpine wetlands. Hydrol. Process. 48. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Céller, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth-Science Rev. 79, 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Céller, R., De Bièvre, B., Deckers, J., Wyseure, G., 2010. Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramos en el sur del Ecuador con TOP MODEL.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Celleri, R., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, S., 2008. Comment on “Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes.” Geomorphology 96, 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.003>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes Use of linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. Hydrol. Earth Syst. Sci. 8, 108–114. <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>



- Buytaert, W., Iñiguez, V., De Biévre, B., 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *For. Ecol. Manage.* 251, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Buytaert, W., Wyseure, G., Bi, B. De, Deckers, J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrol. Process.* 3997, 3985–3997. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Céller, R., 2007. Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute river basin – Southern Ecuadorian Andes., in: PhD Dissertation. Leuve, Belgium.
- Chapman, T., 1991. Comment on “Evaluation of Automated Techniques for Base Flow popularity and Recession Analyses” by R.J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resour. Res.* 27, 1783–1784.
- Crespo, P., Celleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., De Biévre, B., 2010. Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *Red Books IAHS* 336, 71–76.
- De Biévre, B., Iñiguez, V., Buytaert, W., 2008. Hidrología del páramo. *Investig. biofísicas en el páramo* 1–15.
- Dercon, G., Bossuyt, B., De Bièvre, B., Cisneros, F., Deckers, J., 1998. Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano. Univ. Cuenca 148.
- Duque, F., Vázquez, R., 2015. Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo.
- Duque, L.F., Vázquez, R.F., 2015. Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo 7, 63–76.
- El-Nasr, A.J., Arnold, G., Feyen, J., Berlamont, J., 2005. Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Process.* 19, 573–587.
- ETAPA EP., 2017. Empresa pública municipal de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- FAO, 2001. Soil carbon sequestration for improved land management, World Soil Resources Reports.
- Fenia, F., McDonnell, J.J., Savenije, H.H.G., 2008. Learning from model improvement: On the contribution of complementary data to process understanding 44, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007WR006386>
- Gil, E., 2012. Modelación Hidrológica de los Páramos Andinos con TOPMODEL : páramo de Chingaza , Colombia.
- Guenni, L., Degryze, E., Alvarado, K., 2008. Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitaciónn mensual en Venezuela. *Rev. Colomb. Estad.* 31, 41–65.
- Guzmán, P., Batelaan, O., Huysmans, M., Wyseure, G., 2015. Comparative analysis of baseflow characteristics of two Andean catchments , Ecuador 3064, 3051–3064.



<https://doi.org/10.1002/hyp.10422>

- Hofstede, R., 2001. El Impacto de las actividades humanas sobre el páramo.
- Hofstede, R., Chilito, P., SAndoval, S., 1995. Vegetative structure, microclimate, and leaf growth of a paramo tussock grass species, in undisturbed, burned and grazed conditions. *Vegetatio* 119, 53–65.
- Hofstede, R., Groenendijk, J., Coppus, R., Fehse, J., Sevink, J., 2002. Impact of pine plantations on Soils and vegetation in the Ecuadorian High Andes. *Mt. Res. Dev.* 22, 159–167.
- Ibáñez-Asensio, S., Gisbert-Blanquer, J.M., Moreno-Ramón, H., 2011. Inceptisoles. Editor. Univ. Politec. Val. 8.
- Instituto Geográfico Militar [WWW Document], 2013. URL <http://www.igm.gob.ec/index.php/en/servicios/productos-cartograficos-on-line>
- Iñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., Wyseure, G., 2016. Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2421-2016>
- Kirkby, M.J., 1975. Hydrograph Modelling Strategies, in: Heinemann. (Ed.), *Process in Physical and Human Geography*. pp. 69–90.
- Legesse, D., Vallet-Coulob, C., Gasse, F., 2003. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropicalAfrica: case study south central Ethiopia. *J. Hydrol.* 275, 67–85.
- Lutteyn, J.L., 1999. Páramos: A Checklist of Plant Diversity, Geographical Distribution, and Botanical Literature. New York Bot. Gard. Press.
- Martínez, E., 2015. Análisis hidrológico y respuesta lluvia - escorrentía de cuatro microcuencas de alta montaña del Sur del Ecuador. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Martínez, E., Coello, C., Feyen, J., 2017. Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal. *Mask* 8, 129–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12.129>
- Mora, D., 2013. Impacts of climate change on catchment runoff for the Paute river basin in the Southern Ecuadorian Andes. Ku Leuven.
- Mora, D., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., Willems, P., 2014. Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin , Ecuadorean Andes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 631–648. <https://doi.org/10.5194/hess-18-631-2014>
- Mora, D., Wyseure, G., Willems, P., 2014. Gap filling based on a quantile perturbation factor technique, in: 11TH International Conference on Hydroinformatics. p. 10.
- Morales, A., Sánchez, J., 2015. Evaluación temporal y espacial de un modelo parsimonial-conceptual de precipitación - escorrentía en la cuenca del río Tomebamba en Monay. Universidad de Cuenca.



- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900.
- Mosquera, P., 2016. Morfometría y Régimen de estratificación térmica de lagos de alta Montaña en los Andes tropicales (Parque Nacional Cajas). Universidad de Barcelona.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ochoa, A., Rodas, V., 2009. Variabilidad espacio temporal de la calidad de agua a escala de microcuenca en zonas de páramo. Tesis. Universidad de Cuenca.
- ODEPLAN, 1998. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo [WWW Document]. URL <http://www.planificacion.gob.ec/resena-historica/>
- PROMAS, 2011. Modelización hidrológica distribuída como herramienta de soporte de decisiones para restauración hidrológica forestal en cuencas hidrográficas andinas.
- Taye, M.T., Ntegeka, V., Ogiramo, N.P., Willems, P., 2011. Assessment of climate change impact on hydrological extremes in two source regions of the Nile River Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 209–222. <https://doi.org/10.5194/hess-15-209-2011>
- UAZUAY, 2008. Universidad del Azuay [WWW Document]. URL http://www.uazuay.edu.ec/geomatica/source/web_site_geo/geomatica.htm
- Vásquez, A., Buitrago, A., 2011. El gran libro de los páramos. Bogotá.
- Vuille, M., 2013. El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Keiming, F., 2000. Interannual Climate variable in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 105, 12447–1240.
- Willems, P., 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environ. Model. Softw.* 24, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- Willems, P., 2008. Environmental Modelling & Software A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environ. Model. Softw.* 24, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.09.005>
- Willems, P., 2004a. WETSPRO : Water Engineering Time Series PROcessing tool, in: KU Leuven Hydraulics Laboratory Manual available at <http://www.kuleuven.be/hydr/pw/WETSPRO%20manual.pdf>, Leuven Belgium, p. 22.
- Willems, P., 2004b. WETSPRO: Water Engineering Time Series PROcessing tool, Methodology and User's Manual. Hydraulics Laboratory. Leuven, Belgium.



- Willems, P., Mora, D., Vansteenkiste, T., Teferi, M., Van Steenbergen, N., 2014. Parsimonious rainfall-runoff model construction supported by time series processing and validation of hydrological extremes – Part 2 : Intercomparison of models and calibration approaches q. J. Hydrol. 510, 591–609.