



Pontificia Universidad  
Católica del Ecuador

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**SEDE MANABÍ**

**CARRERA DE HIDRÁULICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN:**

**“SIMULACIÓN HIDROLÓGICA BASADA EN LA TOPOGRAFÍA DE  
LA MICROCUENCA LA MINA, PARROQUIA MEMBRILLO,  
MANABÍ-ECUADOR”**

**PREVIO AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO HIDRÁULICO**

**AUTOR:**

**VELIZ SALDARRIAGA LIMBERT FABRICIO**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN:**

**ING. ANDY MIGUEL GILER ORMAZA, M.Sc.**

**JUNIO 2020**

**CHONE – MANABÍ – ECUADOR**

### **Certificación del tutor de trabajo de integración curricular**

“En mi calidad de tutor del trabajo de integración curricular, certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí, cumpliendo la Normativa del Trabajo de Integración Curricular; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación”.

---

**Ing. Andy Miguel Giler Ormaza, M.Sc.**

## **Acta de aprobación del tribunal**

“El jurado examinador aprueba el presente trabajo de integración curricular en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí”.

---

**Ing. Andy Miguel Giler Ormaza, M.Sc.**

---

**Ing. John Enrique Félix Mera, Mtr.**

---

**Ing. José Ramón Alarcón Loor, Mtr.**

### **Declaración de originalidad**

“Este manuscrito no contiene ningún tipo de material que ha sido aceptado para la obtención de un título universitario en otra institución, excepto en forma de información de soporte que ha sido debidamente citada en mi trabajo. Este trabajo es de total responsabilidad del autor, quien declara bajo juramento que ninguna sección de este trabajo de integración curricular infringe los derechos de autor de nadie”.



---

**Limbert Fabricio Veliz Saldarriaga**

## **Declaración de derechos de autor**

“Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a distribuir este manuscrito de investigación en medios físicos y electrónicos con el fin de promover la divulgación de mis resultados a la comunidad científica y a la sociedad en general. Adicionalmente autorizo el uso de los contenidos de esta investigación como bibliografía para fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, citando como fuente de información al autor de este trabajo”.



---

**Limbert Fabricio Veliz Saldarriaga**

## **Agradecimientos**

Extiendo un gran agradecimiento a los creadores del modelo hidrológico TOPMODEL, maestros Mike Kirkby y Keith Beven por permitir que el modelo sea de libre acceso para uso académico e investigativo. A mi familia, por haber sido mi total sustento no sólo financiero, sino emocional y de fortaleza para mantener siempre la frente en alto en tan arduo proceso educativo. De manera muy atenta y especial al tutor de mi proyecto de tesis, Ing. Andy Miguel Giler Ormaza, M.Sc. por dedicar tanto tiempo a impartir su conocimiento de manera descomunal y su interés en que éste proceso se cumpliera impecablemente. A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por haberme dado un sinnúmero de oportunidades para crecer como persona y como profesional. Y así sin más dilación agradezco por cada uno de los grandes y pequeños, así como también los buenos y malos acontecimientos de la vida que construyeron el camino que recorrí para llegar hasta acá.

## Resumen

El presente estudio de tipo mixto simuló el comportamiento hidrológico de la microcuenca hidrográfica La Mina, parroquia Membrillo, provincia de Manabí, Ecuador, mediante el proceso llamado precipitación-escorrentía. La importancia de este tema radica en su eficacia para reducir la incertidumbre en los impactos hidrológicos causados por las cuencas hidrográficas. Por tanto, el desarrollo de esta investigación tuvo lugar entre noviembre de 2019 y febrero de 2020; la metodología empleó un modelo hidrológico semi-distribuido basado en la topografía, conocido como *TOPMODEL* por su abreviatura en inglés. El estudio inició a partir de la obtención de datos e información base para implementar el modelo. Además, se ejecutó el modelo hidrológico para diferentes combinaciones de parámetros y se evaluó el ajuste de caudal observado vs. caudal simulado. El proceso investigativo arroja los siguientes resultados y valores: un índice topográfico de 5 m de cota en un área  $0.4 \text{ m}^2$ ; una función acumulativa de retraso de 5000 minutos; un máximo de  $0.000038 \text{ m}^3/15\text{ minutos}$  de caudal simulado; y  $-5.82$  como coeficiente de ajuste *Nash Sutcliffe*. Igualmente, los resultados revelan que el modelo ejecuta simulaciones para varias combinaciones de parámetros. Se concluye entonces, que el modelo es muy sensible a las variaciones de parámetros tales como la disminución de la transmisividad con la profundidad y la forma de la recesión del hidrograma ( $m$ ); el logaritmo natural de la transmisividad efectiva del suelo ( $LnTe$ ) y el déficit máximo de humedad en la zona de la raíz ( $Srmax$ ).

*Palabras clave:* modelo, simulación, parámetros, caudal, escorrentía

## Abstract

This mixed research study simulated the hydrological behavior for the La Mina microbasin, Membrillo Parish, Province of Manabí, Ecuador, by using the rainfall-runoff modeling. The prominence of this theme lies in its effectiveness in reducing uncertainties in hydrological impacts caused by hydrographic basins. Therefore, this research was carried out from November 2019 through February 2020; the methodology used in this study corresponded to the semi-distributed hydrologic modeling approach based on topography called TOPMODEL for its abbreviation. This research started from collecting data and base information in order to implement the above mentioned model. Besides, the topographic hydrologic model was executed on different parameter combinations; the adjustment between the observed and simulated flows was also evaluated. This research study shows the following results and values: a topographic index of 5 m elevation for an average area of  $0.4 \text{ m}^2$ ; a cumulative delay function in 5000 minutes; a maximum of  $0.000038 \text{ m}^3 / 15$  minutes of simulated flow; and a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of -5.82. Likewise, the findings reveal that the model runs simulations for many combinations of parameters. It is concluded then that this model is very sensitive to variations in parameters such as reduced transmissivity on both the depth and shape of hydrograph recession or shape of the transmissivity curve ( $m$ ); natural log of effective transmissivity of the soil ( $LnTe$ ); and maximum root zone storage deficit ( $Srmax$ ).

*Keywords:* model, simulation, parameters, flow, runoff

## **Tabla de contenidos**

Introducción.....	1
Materiales y Métodos .....	2
Área de estudio .....	2
Modelo Hidrológico.....	2
Entrada de Datos para el Modelo.....	7
Parámetros del TOPMODEL.....	8
Script para ejecutar el modelo.....	9
Resultados.....	13
Discusión .....	19
Conclusiones.....	21
Referencias Bibliográficas.....	22
Anexos .....	25

## **Índice de Tablas**

Tabla 1 Variables Hidrológicas (Caudal Observado, Lluvia, Evapotranspiración) .....	14
Tabla 2 Ajuste de sensibilidad de parámetros pertenecientes al modelo .....	15
Tabla 3 Mejores combinaciones de parámetros para el caudal simulado.....	16
Tabla 4 Peores combinaciones de parámetros para el caudal simulado .....	17

## Índice de Figuras

Figura 1 Área de estudio tomado de (Giler, Alarcón, Félix, & Caicedo, 2018).....	2
Figura 2 Definición del área de drenaje y la pendiente topográfica TOPMODEL (Jorquera, Weber & Reyna, 2012).....	4
Figura 3 Función acumulativa de retraso .....	13
Figura 4 Valores de la función acumulativa de retraso .....	13
Figura 5 Ajuste Nash-Sutcliffe Caudal Observado versus Caudal Simulado .....	18

## **Introducción**

El proceso llamado simulación de precipitación-escorrentía modela el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica, Dicha metodología parte de la necesidad de reducir la incertidumbre en los impactos hidrológicos causados por las cuencas hidrográficas, tales fuentes de incertidumbre de la hidrología de la cuenca son atribuidas mayormente a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, a la dificultad de estimar la evapotranspiración y al desconocimiento de la contribución del rocío hacia la precipitación total (W. Buytaert, Céleri, De Bièvre, Deckers, & Wyseure, 2011). La modelación de los sucesos hidrológicos arraigados a los ecosistemas de microcuencas, representa una herramienta de gran innovación para el manejo vía software de las mismas, lo que afortunadamente ha sido el impulso para llevar a cabo investigaciones orientadas a la dinámica hídrica de dichos ambientes hidrológicos (Eydith Girleza Gil Morales, 2012).

La metodología planta su base en un modelo hidrológico semi-distribuido el cual a su vez parte de la topografía, es el motivo por el cual su abreviación está definida TOPMODEL. Este modelo ofrece la posibilidad de proyectar un escenario de predicción que permita efectuar de manera preliminar procesos hipotéticos en contraste con el cambio climático. Habiendo aclarado su definición, se realizará un análisis de la predicción de flujos de agua del software TOPMODEL, al visualizar si lo que plantea el modelo, se ajusta a las condiciones del área de estudio, a través del ajuste y validación de los datos procedentes de la cuenca La Mina, parroquia Membrillo para los meses de noviembre y diciembre del año 2018 y el estudio del resto de parámetros de los que también depende el modelo. A su vez se evaluará la influencia que ejerce la topografía y algunos elementos propios del suelo en la respuesta hídrica que arroje el modelo (Eydith Girleza Gil Morales, 2012).

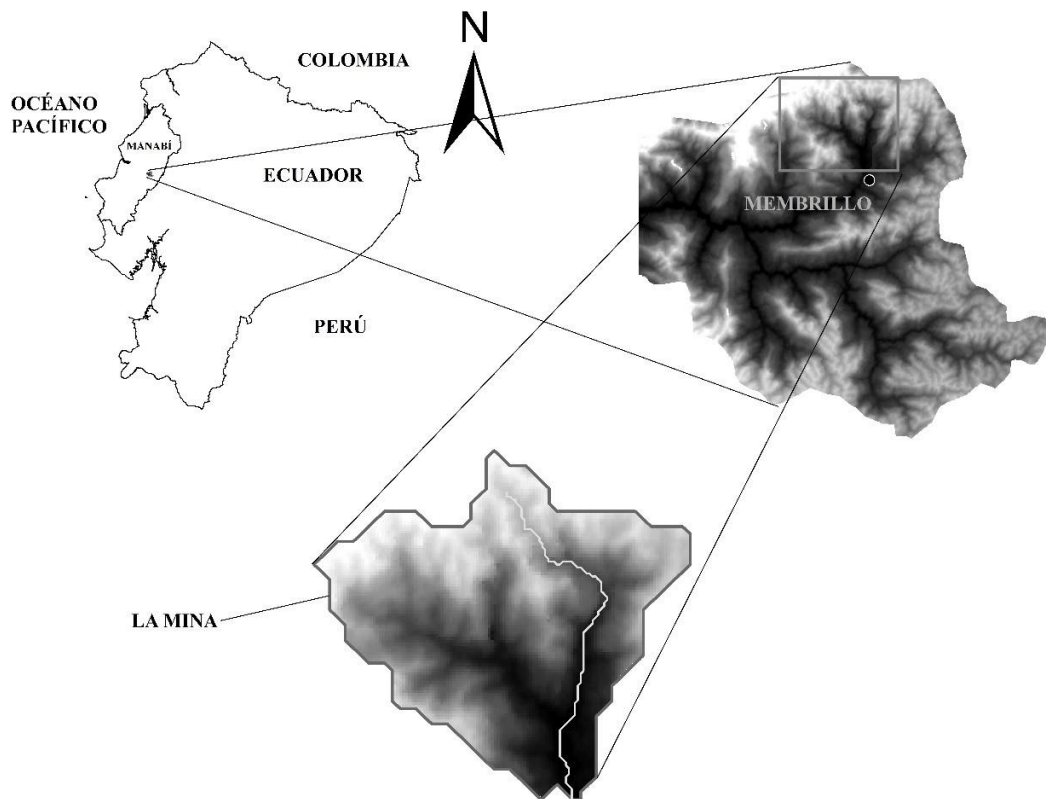
A grandes rasgos, el objetivo de esta investigación es realizar una simulación hidrológica basada en la topografía de la microcuenca La Mina, Parroquia Membrillo, Manabí-Ecuador. Dicho objetivo deriva tareas específicas como obtener información base para implementar el modelo de precipitación-escorrentía basado en la topografía para la zona de estudio seleccionada. Así también ejecutar el modelo hidrológico para diferentes combinaciones de parámetros y evaluar el ajuste de caudal observado vs caudal simulado.

Cabe recalcar que el método a aplicar en esta investigación no es común en nuestro entorno a nivel provincial, así que se posiciona como un potencial método para su desarrollo e implementación a nivel local.

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

El área de estudio es la microcuenca La Mina perteneciente a la Parroquia Membrillo ubicada a 47 kilómetros del cantón Calceta del cual también forma parte. La Mina comprende un área de 7.98 km<sup>2</sup>. Su información climática refleja que de octubre a junio se manifiesta la estación lluviosa alcanzando precipitaciones de hasta 13 milímetros. De julio a octubre se extiende la estación seca con apenas 4 milímetros de precipitación como promedio total acumulado (Spark, 2000).



*Figura 1 Área de estudio tomado de (Giler, Alarcón, Félix, & Caicedo, 2018).*

## INICIAR EL MODELO

- Instalar paquetes de comandos.
- Importar el DEM.

## GENERAR PROCESOS DE LA CUENCA

- Generar el índice topográfico (topindex).
- Ejecutar la función acumulativa de retraso (delay).

## CARGAR DATOS HIDROLÓGICOS DE CAMPO

- Importar datos de caudales.
- Importar datos de lluvia.
- Importar datos de evapotranspiración.

## RESULTADO FINAL

- Importar parámetros hidrológicos complementarios del modelo.
- Ejecutar el caudal simulado.
- Validar el resultado con el coeficiente Nash-Sutcliffe

## Modelo Hidrológico

TOPMODEL se basa en dos fundamentos: el desenvolvimiento de la zona saturada puede ser aproximadamente un ciclo de fases fijas dentro de una superficie de drenaje a un lugar específico en la pendiente, y la estimación del potencial del agua en una determinada distancia procedente de la pendiente del terreno, expresada como  $tg(\beta)$  (Figura 1) (K. J. Beven & Kirkby, 1979). Los demás parámetros indispensables para el modelo poseen un origen físico y se intenta conservar una mínima cantidad de los mismos para dar garantía de que los valores obtenidos en el ajuste resulten más sencillamente reconocibles (Jorquera, Weber, & Reyna, 2012).

Se presenta una igualdad espacial dentro de un lapso de tiempo en el factor de reabastecimiento para una superficie saturada. Lo que realiza el modelo TOPMODEL es relacionar el déficit de almacenamiento y la transmisividad del suelo, partiendo de aquello se establece el índice de humedad topográfica (T.W.I.). Dicho conjunto deriva que los puntos con igual T.W.I. tendrán la misma respuesta. La función de este índice es mostrar la disposición de un determinado lugar en la microcuenca a presentar escenarios saturados. Se calcula sabiendo el grado de la pendiente, la superficie de drenaje y la transmisividad del suelo. Todo parte de un modelo digital de elevación a excepción de la transmisividad que se interpreta de manera homogénea, por lo tanto, el T.W.I. es expresado como (Jorquera et al., 2012):

$$\text{Ln}\left(\frac{a}{\text{Tan}\beta}\right) \text{ (K. J. Beven \& Kirkby, 1979)}$$

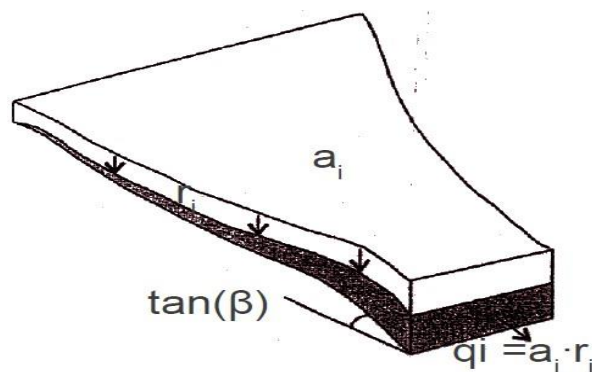


Figura 2 Definición del área de drenaje y la pendiente topográfica TOPMODEL (Jorquera, Weber & Reyna, 2012)

Para establecer el cálculo de la superficie cubierta de flujo, el T.W.I. es planteado como una función de distribución de probabilidad, lo que tiene por meta conseguir una ventaja de cómputo. Debido a que cada punto con similar valor de T.W.I. tiene un comportamiento hidrológico homogéneo, es necesario realizar el cálculo de un único valor por cada índice para establecer el esquema de la distribución espacial del nivel freático. En consecuencia, la herramienta es capaz de calcular la precipitación para cada lapso temporal y culmina con la proyección de la zona no saturada y la escorrentía principal. El establecimiento de los parámetros depende de la proyección antes mencionada, por el motivo de no considerar específicamente los efectos de la disparidad del terreno o la existencia de macroporos (Jorquera et al., 2012).

Los paquetes de comandos del software R brindan un sistema flexible y sólido a la vez para la entrega e instalación de código de terceros. Los paquetes son supervisados por CRAN y son sometidos a un riguroso control de calidad, mayormente automatizado, antes de ser aprobados, sin embargo, dicho proceso está limitado a la instalación y la corrección de la sintaxis mas no de lógica algorítmica. Sin embargo, resulta de gran ayuda para los usuarios científicos el poder confiar la implementación de código externo en su flujo de trabajo. Por otra parte, ligado a los términos de la política de presentación de CRAN, toda documentación como ejemplos de código de trabajo y código fuente deben ser de libre acceso. Esto les da apertura a los usuarios para poder validar la funcionalidad y los algoritmos base de módulos de terceros y para entender su uso y fundamentos de los códigos (Metcalf, Metcalf, Beven, & Freer, 2015).

La herramienta R es gratuita, de código abierto y levantado por varias plataformas, otorga un entorno de desarrollo de programas útil para el investigador hidrológico. Se proyecta que otros investigadores estén en capacidad de poder mejorar, modificar e integrar este modelo con el suyo, por lo tanto, el código se ha desarrollado con una comprensión lectora originaria de una estricta eficiencia. Como lenguaje interpretado R puede tener algunos inconvenientes en la velocidad del tiempo de ejecución, una prueba de aquello es que muchos casos requieren incluso de ejecuciones del modelo Monte Carlo, pero el entorno también puede llamar a versiones ejecutables de programas principales, como el actual caso de la implementación del TOPMODEL original en R (Metcalf et al., 2015).

Una de las ventajas de TOPMODEL es que precisa valores de relativamente pocas variables y parámetros, algunos de ellos se obtienen en base a mediciones de campo, otros hay que calibrarlos en el campo, suprimiendo las limitaciones arraigadas a la obtención de datos. En los últimos años, TOPMODEL se ha empleado para estudiar cuencas y así mismo para evaluar diferentes escenarios de cambio climático, incluidos los cambios en los usos del suelo. La estructura del modelo es simple, a diferencia de otros modelos con una estructura más rígida y con mayores complejidades para su programación (Gil & Conrado, 2016).

## **Entrada de Datos para el Modelo**

**El modelo digital de elevación (DEM)** se derivó de los datos de SRTM del sitio United States Geological Survey ((USGS), 1958), los respectivos rasters de resolución 10x10m por cada pixel, y se proyectó en un sistema de coordenadas local Ecuador-Quito-Zone. El contorno de la cuenca se delineó utilizando el programa Quantum Gis (QGis) versión 2.18.18 (QGis, 2002). Para la generación del mapa de índice de humedad topográfica, el DEM fue exportado a TOPMODEL por las bibliotecas *topmodel* y *Hmisc* de R como una matriz de datos de tipo ASCII, con información de altitud y utilizando un algoritmo de dirección de flujo, que permite generar archivos raster de dirección y acumulación de flujo (Gil & Conrado, 2016).

**Los datos hidrometeorológicos** se recopilaron mediante el monitoreo de campo de las variables climáticas e hidrológicas, distribuidas a lo largo del rango de altitud de la cuenca La Mina, entre noviembre y diciembre del año 2018, dirigido por investigadores de la PUCEM. Los instrumentos instalados fueron un transductor de presión (HOBO Water Level Data Logger Starter Kit, modelo KIT-S-U20-01), y dos pluviómetros en una cobertura de vegetación y flujos de agua a la vez de un gradiente de altitud de 135 m a 376 m, para considerar la variabilidad espacial y temporal de las variables monitoreadas (Gil & Conrado, 2016).

**La precipitación** se midió con dos pluviómetros (RainWise, modelo RainLog 2.0), ubicados en dos de los extremos de la cuenca. Las variables climáticas, como la temperatura, la humedad del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la dirección del viento, se midieron con una estación meteorológica convencional (Gil & Conrado, 2016).

**La evapotranspiración** se calculó a partir de variables climáticas exportadas a través del software CLIMWAT 2.0 (FAO, CLIMWAT, 1999), por el método de Penman-Monteith (1965), mismo que puede ser procesado a través del software Cropwat versión 8.0 (FAO, Cropwat, 1999).

## Parámetros del TOPMODEL

La cantidad de parámetros necesarios para ejecutar TOPMODEL depende de la versión del modelo que se esté utilizando. Todas las versiones de TOPMODEL usan al menos cinco parámetros. Sin embargo, algunas versiones tienen hasta doce parámetros. Los siguientes son los parámetros que generalmente se usan en TOPMODEL y también los que se usan en la implementación de R (Beneche, 2013):

- **m:** También llamado parámetro de escala, controla la disminución de la transmisividad con la profundidad y la forma de la recesión del hidrograma. Kinner y Stallard (1999) observaron que el 63% de la transmisividad está dentro de 1 m y el 86% está dentro de 2 m. Tiene una unidad de longitud [L].
- **SrMax:** Es el déficit de humedad máximo en la zona de la raíz. Ocurre físicamente cuando el dosel está seco y el suelo es el punto de marchitez. Tiene una unidad de longitud [L].
- **td:** Retraso de tiempo de la zona no saturada por unidad de déficit de almacenamiento. Cuando se agrega agua a la zona de la raíz, el déficit disminuye hasta cero, y luego se agrega agua a la zona no saturada convirtiéndose en almacenamiento de la zona no saturada. Tiene una unidad de longitud [T / L].
- **Sr0:** Déficit inicial de la zona radicular. Cuando es nulo, la evapotranspiración ocurre a tasas potenciales. Tiene una unidad de longitud [L].
- **LnTe:** Es el logaritmo natural de la transmisividad efectiva del suelo. Su unidad es [L<sup>2</sup> / T].
- **vch:** Flujo del canal fuera de la cuenca [m / h].
- **ks:** Conductividad hidráulica de superficie [m / h].
- **La conductividad hidráulica de superficie (K0)** [L] Es un parámetro importante de TOPMODEL. Describe la velocidad a la que el agua puede moverse a través de un medio poroso bajo un gradiente hidráulico. Es una función tanto del medio como de las propiedades del fluido. Alcanza su máximo cuando el suelo está saturado y disminuye al disminuir el contenido de agua o cuando aumenta la tensión del agua.
- **CD:** Impulsión capilar, ver Morel-Seytoux y Khanji (1974) [m].
- **vr:** Flujo del canal dentro de la cuenca [m / h].

- **dt:** El paso de tiempo [horas].
- **qs0:** Es el flujo subsuperficial inicial.

Algunos parámetros de TOPMODEL como  $\ln(\alpha / \tan\beta)$  pueden derivarse del DEM de la cuenca. Sin embargo, para la mayoría de los parámetros, siempre es difícil determinar con precisión su valor. Las técnicas de calibración son necesarias para cuantificar adecuadamente los parámetros. (K. Beven, 1997) ha presentado una revisión de los valores que se usaron en la simulación TOPMODEL y en resumen, los parámetros  $m$ ,  $\ln T_e$ ,  $t_d$ ,  $S_rMAX$  y  $S_r0$ ,  $v_r$  son los que generalmente se han encontrado sensibles en la simulación de cuencas hidrográficas donde se ha utilizado TOPMODEL.

A continuación, se presenta el desglose del panel completo de instrucciones necesarias para llevar a cabo el modelo TOPMODEL en el software R, aclarando que previo a realizarlo se deben instalar las herramientas y bibliotecas de comandos pertinentes (CRAN, 2019).

### **Script para ejecutar el modelo**

```
install.packages("topmodel")
```

```
install.packages("Hmisc")
```

```
library(topmodel)
```

```
library(Hmisc)
```

Topmodel requiere tipos de información topográfica: la distribución del índice topográfico y una función de retardo de flujo del canal. Como topmodel es un modelo semidistribuido, no utiliza los mapas directamente, sino que usa histogramas. Muchos paquetes SIG incluyen rutinas para calcular estos mapas, pero también puede hacerlo directamente en R, a partir de un modelo de elevación digital (DEM).

El DEM debe importarse como una matriz, que luego puede ser procesada por topindex. Para este caso el DEM, guardado en un archivo llamado "DEM.txt". Los valores fuera de la cuenca reciben el valor -9999 (este puede ser cualquier otro valor que, obviamente, no ocurre en los valores de DEM):

```
DEM <- read.table(file.choose())
```

```
DEM
```

```
DEM <- as.matrix(DEM)
```

```
DEM
```

Eliminar los valores fuera de la cuenca.

```
DEM[DEM==-9999] <- NA
```

Es posible que desee trazar el DEM para ver si todo se ve bien:

```
image(DEM)
```

Luego calcule el índice topográfico, la resolución debe estar en [m].

```
DEM <- sinkfill(DEM, res=10, degree=0.1)
```

```
topindex <- topidx(DEM, res=10)
```

```
topindex
```

```
str(topindex)
```

```
image(topindex$area)
```

```
image(topindex$atb)
```

```
topindex$atb
```

```
topindex$area
```

Los valores deben dividirse en un conjunto de clases, ya que topmodel () es un modelo semidistribuido que agrupa áreas hidrológicamente similares en las mismas unidades de respuesta hidrológica.

```
topindex <- make.classes(topindex$atb,16)
```

```
flowlength <- flowlength(DEM, c(8,1)) * 10
```

```
delay <- flowlength(DEM)*10
```

```
delay <- make.classes(delay, 5)
```

```
delay <- delay[5:1,]
```

```
delay[,2] <- c(0, cumsum(delay[1:(5-1),2]))
```

```
delay
```

Cargue el conjunto de datos y adjúntelo a la ruta de búsqueda.

```
QobsLM<-read.csv(file.choose())
QobsLM
QobsLMmat<- as.matrix(QobsLM)
plot(QobsLMmat,type="l", col="red")
rainLM<-read.csv(file.choose())
rainLM
plot(rainLM)
rainLMmat<- as.matrix(rainLM)
rainLMmat
plot(rainLMmat,type="l", col="red")
plot(rainLMmat)
write.csv(rainLMmat,file="~/rainLMmat.csv",row.names = TRUE)
write.csv(rainLM,file="~/rainLM.csv",row.names = TRUE)
ETpLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
ETpLM
summary(ETpLM)
ETpLMmat<- as.matrix(ETpLM)
ETpLMmat
plot(ETpLMmat,type="h", col="red")
topidxLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
topidxLM
summary(topidxLM)
plot(topidxLM,type="h", col="red",xlim=c(0,5000),ylim=c(0,0.00005))
topidxLMmat<- as.matrix(topidxLM)
topidxLMmat
plot(topidxLMmat,type="h", col="red")
write.csv(topidxLM,file="~/topidxLM.csv",row.names = TRUE)
write.csv(topidxLMmat,file="~/topidxLMmat.csv",row.names = TRUE)
```

```

delayLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
delayLM
summary(delayLM)
plot(delayLM)
write.csv(delay,file="~/delayHuagrahuma.csv",row.names = TRUE)
write.csv(delayLM,file="~/delayLM.csv",row.names = TRUE)
parametersLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
parametersLM
summary(parametersLM)
str(parametersLM)
parametersLMmat<- as.matrix(parametersLM)
parametersLMmat
summary(parametersLMmat)
str(parametersLMmat)

```

Ejecuta el modelo y visualiza el resultado:

```

QsimLM <- topmodel(parametersLMmat, topidxLMmat, delayLM, rainLMmat, ETpLMmat)
QsimLM
plot(QsimLM[,57])
points(QobsLMmat, type="h", col="red")
NSEff(QobsLMmat, QsimLM[,57])

```

## Resultados

### 1. Delay

Está expresado tal cual, en su traducción al inglés, pero no es más que la función acumulativa de retraso, y se entiende como el tiempo que toma drenar el flujo superficial hasta la salida de la microcuenca.

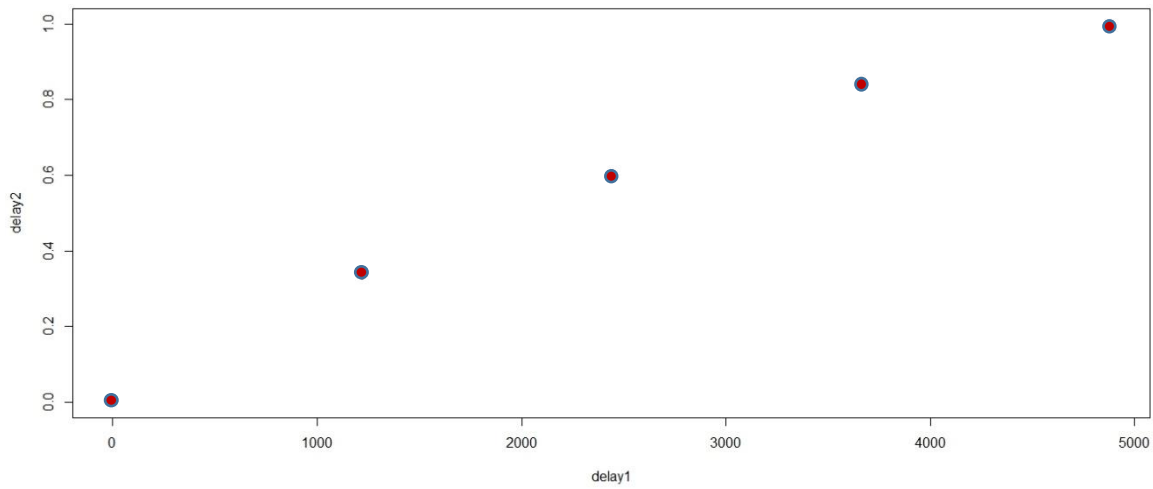


Figura 3 Función acumulativa de retraso

```
> delay
      breaks
[1,]  0.000 0.0000000
[2,] 1220.079 0.3321648
[3,] 2440.158 0.6072999
[4,] 3660.236 0.8457511
[5,] 4880.315 1.0000000
> |
```

Figura 4 Valores de la función acumulativa de retraso

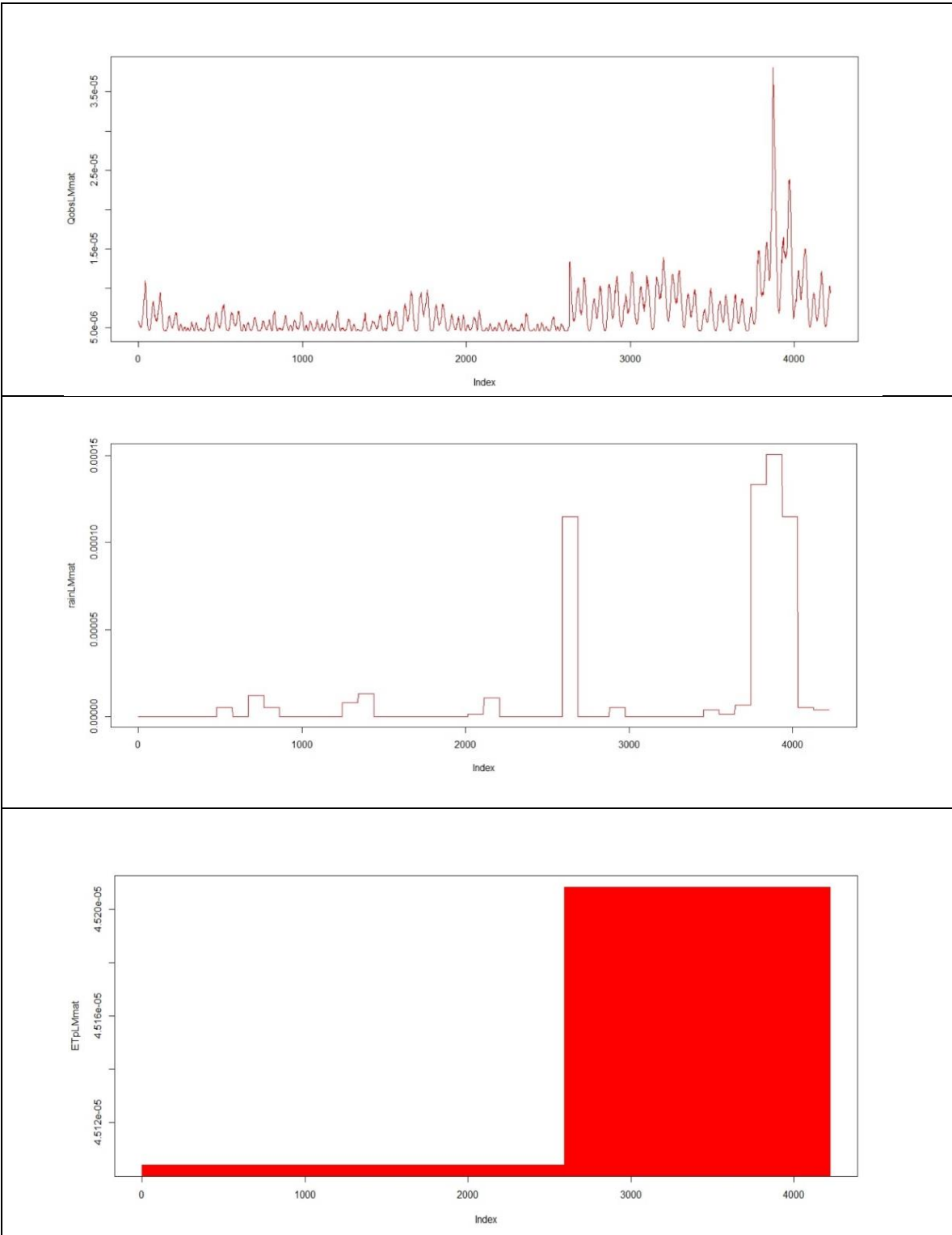


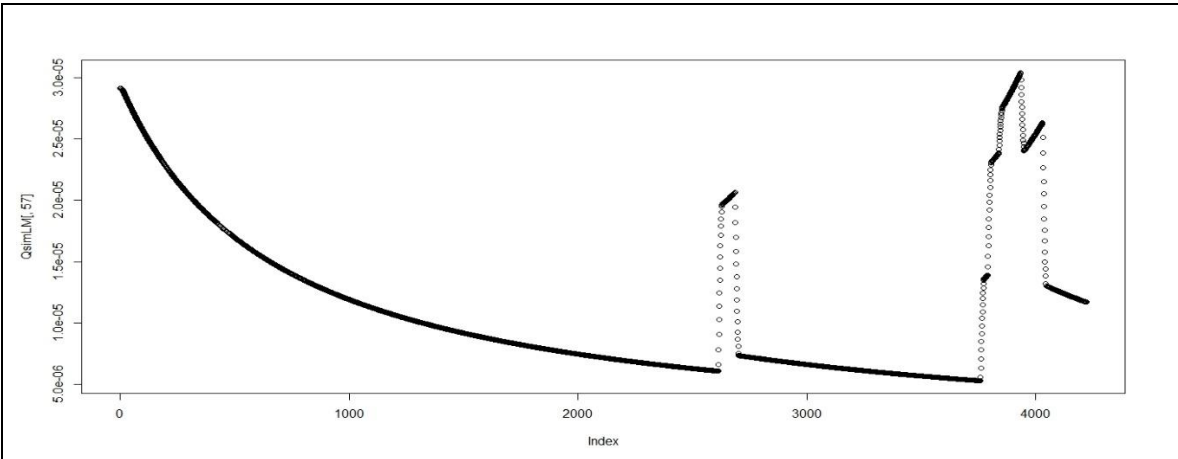
Tabla 1 Variables Hidrológicas (Caudal Observado, Lluvia, Evapotranspiración)

## 2. Ajuste de sensibilidad

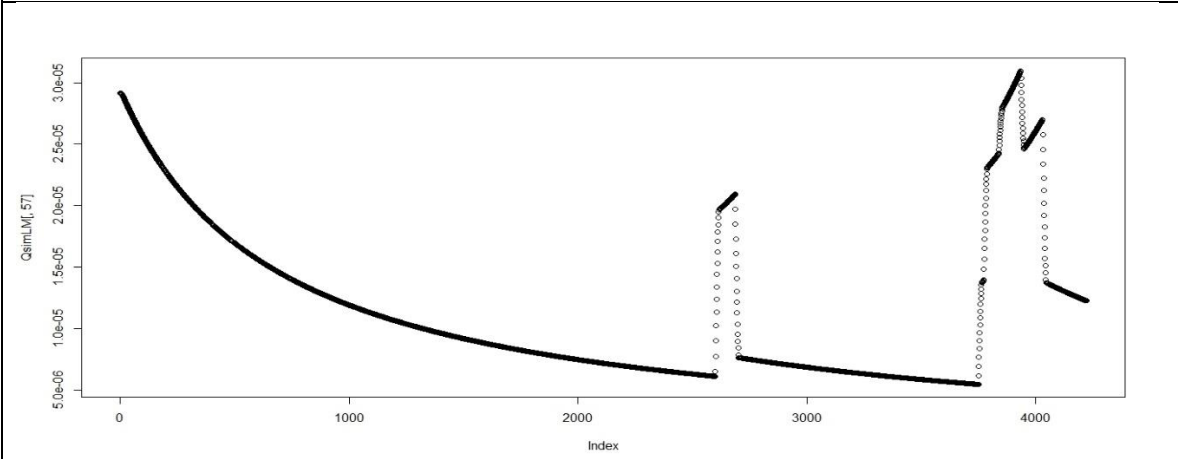
	Inte	Sro	Srmax	td	vch	Vr	CD
	valores de origen						
	-1,708685	0,01077466	0,002069535	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
1	llevando <b>Inte</b> a su límite mas bajo se obtiene una buena simulación con picos pronunciados						
	-1,9999	0,01077466	0,002069535	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
2	llevando <b>Sro</b> a su límite más alto no influye en la simulación						
	-1,9999	0,1999999	0,002069535	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
3	llevando <b>Sro</b> a su límite más bajo tampoco influye en la simulación						
	-1,9999	0,0000001	0,002069535	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
4	llevando <b>Srmax</b> a su límite más alto la simulación no levanta la gráfica						
	-1,9999	0,01077466	0,099999999	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
5	llevando <b>Srmax</b> a su límite más bajo la simulación no levanta la gráfica						
	-1,9999	0,01077466	0,000000001	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
6	llevando <b>td</b> a su límite más alto no influye en la simulación						
	-1,9999	0,01077466	0,002069535	2,999999	1843,436	1362,387	2,935099
7	llevando <b>td</b> a su límite más bajo tampoco influye en la simulación						
	-1,9999	0,01077466	0,002069535	0,000001	1843,436	1362,387	2,935099
8	llevando <b>CD</b> a su límite más alto no influye en la simulación						
	-1,9999	0,01077466	0,002069535	2,146924	1843,436	1362,387	4,999999
9	llevando <b>CD</b> a su límite más bajo tampoco influye en la simulación						
	-1,9999	0,01077466	0,002069535	2,146924	1843,436	1362,387	0,000001
10	subiendo un poco el valor de <b>Srmax</b> redujo un poco la gráfica						
	-1,9999	0,01077466	0,010000000	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
11	bajando un poco el valor de <b>Srmax</b> mejoró ligeramente la gráfica						
	-1,9999	0,01077466	0,000900000	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
12	bajando un poco más el valor de <b>Srmax</b> mejoró aún más la gráfica						
	-1,9999	0,01077466	0,000090000	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099
13	bajando aún más el valor de <b>Srmax</b> la simulación no levanta la gráfica						
	-1,9999	0,01077466	0,000009000	2,146924	1843,436	1362,387	2,935099

Tabla 2 Ajuste de sensibilidad de parámetros pertenecientes al modelo

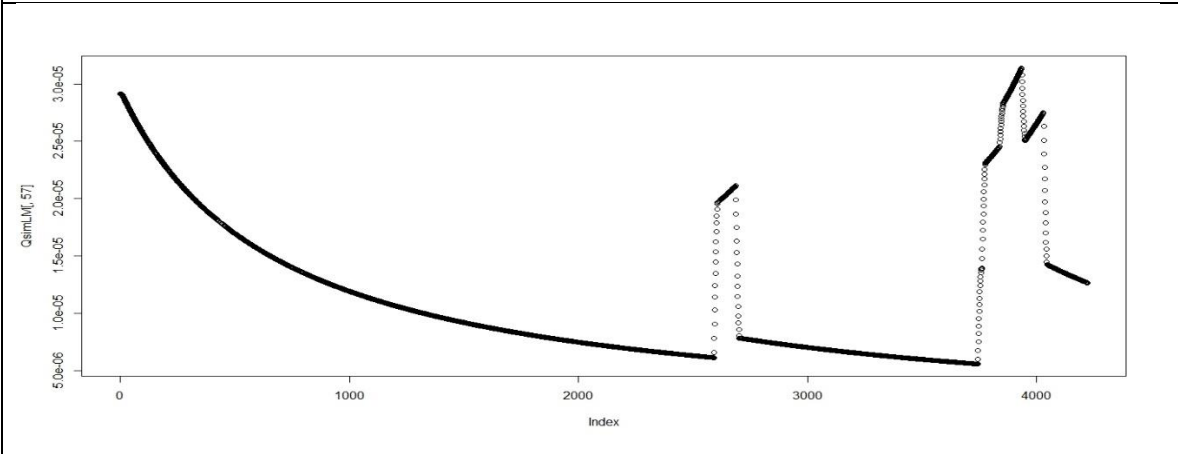
La tabla se realizó con el fin de comprobar en qué magnitud influye cada parámetro de topmodel en la simulación del caudal de la cuenca. De tal manera que, lo que se realizó fue alterar en pequeña y gran escala cada parámetro existente para corroborar lo ya mencionado. Las siguientes gráficas denominadas como mejores y peores combinaciones reflejan el trabajo realizado en la tabla.



*Iteración número 1 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*

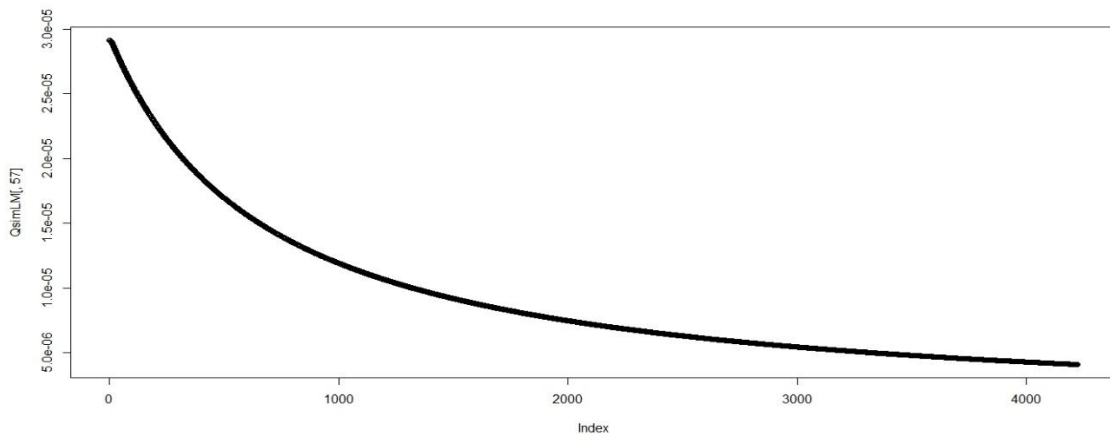


*Iteración número 11 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*

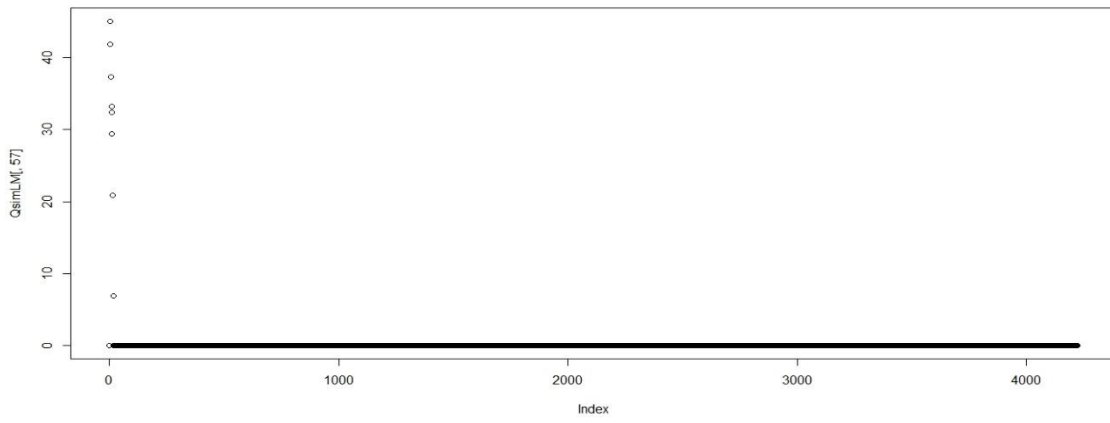


*Iteración número 12 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*

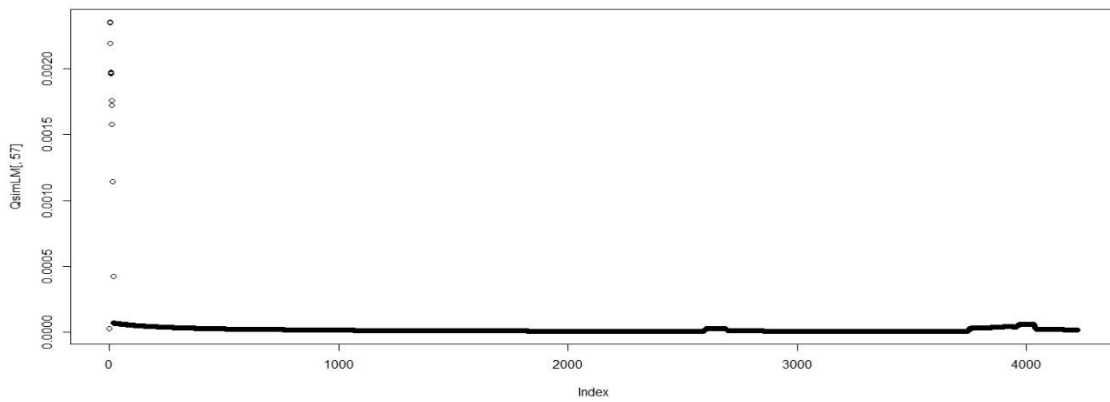
*Tabla 3 Mejores combinaciones de parámetros para el caudal simulado*



*Iteración número 4 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



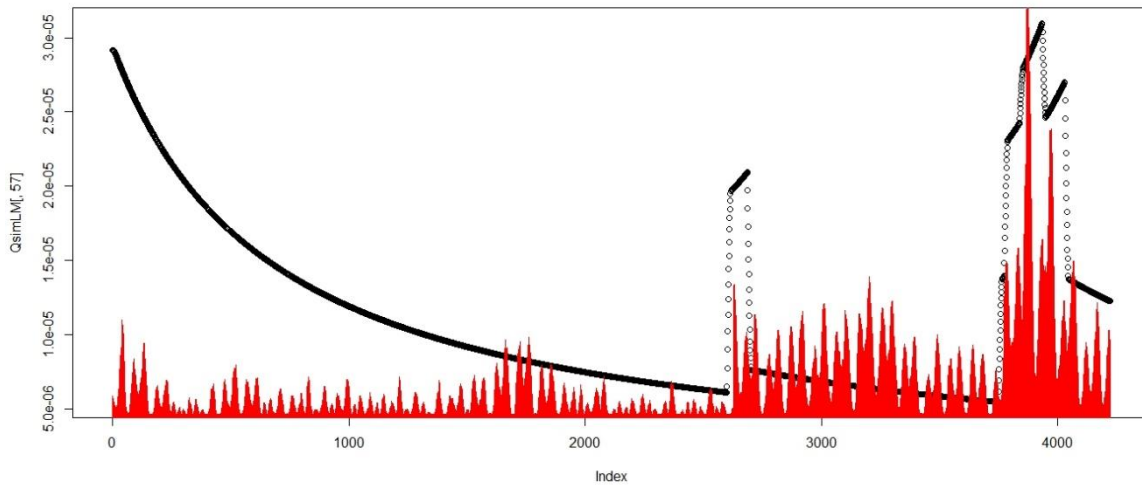
*Iteración número 5 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



*Iteración número 13 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*

*Tabla 4 Peores combinaciones de parámetros para el caudal simulado*

### 3. Coeficiente de Ajuste Nash-Sutcliffe



*Figura 5 Ajuste Nash-Sutcliffe Caudal Observado versus Caudal Simulado*

Determina mediante estadística el volumen de residuo o ruido en comparación con la varianza de datos medidos. Concretamente el desfase del caudal simulado con respecto al caudal observado, indicando que tan bien se encuentra su gráfica de datos. El dato final de la presente investigación donde la comparación era el caudal observado versus el simulado pudo ser extraído desde el mismo paquete de topmodel que incluye la función de Nash-Sutcliffe y dio como resultado  $-5.821447$ , determinando una considerable precisión en la comparación entre ambos caudales, pues el caudal observado sigue siendo apenas mejor que el caudal simulado por el modelo (hydroGOF, 2012).

## Discusión

El índice topográfico representa una gran importancia en la modelación hidrológica, debido a que resulta ser de gran utilidad para representar flujos superficiales. Arroja valores más altos mientras mayor sea la existencia de áreas con bastos cuerpos de agua, manifestando con gran claridad las zonas con tendencia a saturarse (K. Beven, Freer, & Pin, 1997). El flujo subsuperficial es el proceso que más resalta en la microcuenca, lo que establece el indicio de que estaría mayormente vinculado a la estructuración de los suelos, mismos que siendo propios de cuencas hidrográficas se caracterizan por sus elevados contenidos de humedad, así que se sostiene la creencia de que el sobrante de zonas no saturadas de la microcuenca mantiene de todos modos un flujo base (Eydith Girleza Gil Morales, 2012).

Respecto al análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo se ha hecho una observación a investigaciones pasadas que de igual forma estuvieron constituidas con topmodel. Parámetros como el retardo de tiempo de la zona no saturada por unidad de déficit de almacenamiento (td) y la velocidad del canal no son sensibles (Beneche, 2013). (Campling, Gobin, Beven, & Feyen, 2002) utilizaron TOPMODEL para simular la cuenca del río Ebonyi (379 km<sup>2</sup>), la cual es una cuenca húmeda y se encuentra en el límite occidental de las llanuras del río Cross. Encontraron que el parámetro más sensible era el parámetro m. El parámetro de disminución de la transmisividad (m) respalda la observación de que el flujo del subsuelo y los déficits de almacenamiento local son contribuyentes indispensables a la respuesta hidrológica de la cuenca (Campling et al., 2002).

(Ambikadevi, 2004) usó TOPMODEL en la cuenca de Stillwater y el modelo fue sensible al parámetro de escala que controla la disminución de la transmisividad con la profundidad y la forma de la recesión del hidrograma (m), al déficit máximo de humedad en la zona de la raíz (Srmax), al retraso de tiempo de la zona no saturada por unidad déficit de almacenamiento (td), y al logaritmo natural de la transmisividad efectiva del suelo (lnTe) (Beneche, 2013).

(Nourani, Roughani, & Gebremichael, 2011) encontraron en su análisis de sensibilidad que los parámetros  $m$  y  $\ln Te$ , que se refieren al estado de humedad del suelo, tienen una mayor incidencia en los resultados de la simulación de lluvia y escorrentía en la cuenca Ammameh (Beneche, 2013). La sensibilidad de los parámetros del modelo depende principalmente de factores como el área de la cuenca hidrográfica, el intervalo de tiempo que comprende la simulación, la magnitud de los flujos de agua, así como también la capacidad del suelo para retener humedad. En la presente investigación los parámetros que se manifestaron con mayor sensibilidad fueron  $m$ ,  $\ln Te$  y  $Sr_{max}$ .

## Conclusiones

Este estudio fue sometido a un análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad permite la cuantificación del efecto de cada entrada de parámetros en la salida del modelo. También indica que el rango dentro de algún parámetro puede influir más en la salida. El análisis de sensibilidad permite también la separación de los efectos de primer orden versus los de orden total. Las variaciones que se usaron para el análisis de sensibilidad mostraron que la sensibilidad varía con el tipo de flujo, no todos los parámetros llegan a ser sensibles. Sólo tres (3) de ellos, como la transmisividad ( $\ln T_e$ ), el parámetro de escala de la disminución de la transmisividad ( $m$ ), el déficit máximo de almacenamiento en la zona raíz ( $Sr_{Max}$ ), parecen influir en la simulación de escorrentía de R-TOPMODEL. También su influencia parece variar si los flujos son bajos o altos. Además de la conductividad hidráulica ( $k_s$ ), el parámetro de déficit de humedad ( $Sr_{Max}$ ) y la tasa de disminución de la transmisividad con profundidad ( $m$ ) que parecen afectar la respuesta hidrológica de la cuenca, ya sea que los flujos sean bajos, medios o altos, la velocidad ( $v_r$ ) parece impactar especialmente los flujos altos sin impacto en los flujos totales.

Los resultados de los análisis de sensibilidad parecen confirmar lo que otros estudios con TOPMODEL ya han revelado. El modelo es muy sensible a las variaciones del parámetro de decaimiento de la transmisividad del suelo, la transmisividad del suelo en la saturación, la capacidad de almacenamiento de la zona radicular y la velocidad de enrutamiento del canal en grandes cuencas.

La velocidad del canal dentro de la cuenca ( $v_r$ ), aunque menos sensible que los otros parámetros anteriores, también es sensible a los flujos altos. Parámetros como el retardo de tiempo de la zona no saturada por unidad de déficit de almacenamiento ( $td$ ) y la unidad capilar ( $CD$ ) parecen no tener influencia alguna en el flujo de salida.

## Referencias Bibliográficas

- (USGS), U. S. (31 de Enero de 1958). *EarthExplorer*. Recuperado el 9 de Marzo de 2020, de <https://earthexplorer.usgs.gov>
- Ambikadevi, K. M. (2004). *Simulation of Evapotranspiration and Rainfall- runoff for the Stillwater River Watershed in Central Massachusetts*. Retrieved from [https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=cee\\_ewre](https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=cee_ewre)
- Beneche, J. A. (2013). *Sensitivity and Uncertainty Analysis of Topmodel for the*.
- Beven, K. (1997). *TOPMODEL : A CRITIQUE*. 11(December 1996).
- Beven, K., Freer, J., & Pin, J. (1997). *MODELLING THE HYDROLOGICAL RESPONSE OF MEDITERRANEAN CATCHMENTS , PRADES , CATALONIA . THE USE OF DISTRIBUTED MODELS AS AIDS TO HYPOTHESIS FORMULATION*. 11(June 1996), 1287–1306.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Deckers, J., & Wyseure, G. (2011). *Modelando el Comportamiento Hidrológico de Microcuencas de Páramo en el Sur del Ecuador con TOP MODEL*. Retrieved from <http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/topmodel.pdf>
- Buytaert, Wouter, Célleri, R., & Timbe, L. (2009). *Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes : Effects of GCM uncertainty*. 36, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL037048>
- Campling, P., Gobin, A., Beven, K., & Feyen, J. (2002). *Rainfall-runoff modelling of a humid tropical catchment : the TOPMODEL approach*. 253(March 2001), 231–253. <https://doi.org/10.1002/hyp.341>
- CRAN. (2019). *Paramo Tutorial TopModel*. Recuperado el 11 de Marzo de 2020, de [http://paramo.cc.ic.ac.uk/topmodel\\_tutorial](http://paramo.cc.ic.ac.uk/topmodel_tutorial)

- Eydith Girleza Gil Morales. (2012). *Modelación Hidrológica de los Páramos Andinos con TOPMODEL : páramo de Chingaza , Colombia .*
- FAO. (1999). *CLIMWAT*. Recuperado el 9 de Marzo de 2020, de <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/es/>
- FAO. (1999). *Cropwat*. Recuperado el 9 de Marzo de 2020, de <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>
- Gil, E. G., & Conrado, T. (2016). Modelación hidrológica con TOPMODEL en el páramo de Chingaza, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919–7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Giler, A., Alarcón, J., Félix, J., & Caicedo, M. (2018). *Proyecto de Investigación “Procesos de generación de escorrentías en cuencas tropicales húmedas del Ecuador.”*
- Güntner, A., Uhlenbrook, S., Seibert, J., & Leibundgut, C. (1999). *Multi-criterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment Abstract : 1620*(January).
- hydroGOF. (2012). *Documentación R*. Recuperado el 13 de Marzo de 2020, de <https://www.rforge.net/doc/packages/hydroGOF/NSE.html>
- Jorquera, E., Weber, J. F., & Reyna, S. M. (2012). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada.*
- Metcalf, P., Metcalf, P., Beven, K., & Freer, J. (2015). Dynamic TOPMODEL : A new implementation in R and its sensitivity to time and space steps *Environmental Modelling & Software* Dynamic TOPMODEL : A new implementation in R and its sensitivity to time and space steps. *Environmental Modelling and Software*, 72(November 2017), 155–172. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.010>
- Nourani, V., Roughani, A., & Gebremichael, M. (2011). *TOPMODEL CAPABILITY FOR RAINFALL-RUNOFF MODELING OF THE AMMAMEH WATERSHED AT DIFFERENT TIME SCALES USING DIFFERENT TERRAIN ALGORITHMS*. 1–14. <https://doi.org/10.4090/juee.2011.v5n1.001014>

QGis. (Julio de 2002). *QGis*. Recuperado el 9 de Marzo de 2020, de <https://www.qgis.org/es/site/index.html>

Spark, W. (2000). *Weather Spark*. Recuperado el 12 de Marzo de 2020, de <https://es.weatherspark.com/y/18310/Clima-promedio-en-Calceta-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o>

## Anexos

### Script para ejecutar el modelo

```
## install and load the required packages:
install.packages("topmodel")
install.packages("Hmisc")
library(topmodel)
library(Hmisc)
DEM <- read.table(file.choose())
DEM
DEM <- as.matrix(DEM)
DEM
# Remove the values outside the catchment:
DEM[DEM==-9999] <- NA
# You may want to plot the DEM to see whether everything looks OK:
image(DEM)
DEM <- sinkfill(DEM, res=10, degree=0.1)
topindex <- topidx(DEM, res=10)
topindex
str(topindex)
image(topindex$area)
image(topindex$atb)
topindex$atb
topindex$area
topindex <- make.classes(topindex$atb,16)
write.csv(topindex$atb,file=~ /topindex$atb.csv",row.names = TRUE)
write.csv(topindex$area,file=~ /topindex$area.csv",row.names = TRUE)
write.csv(topindex,file=~ /topindex.csv",row.names = TRUE)
flowlength <- flowlength(DEM, c(8,1)) * 10
delay <- flowlength(DEM)*10
delay <- make.classes(delay, 5)
delay <- delay[5:1,]
delay[,2] <- c(0, cumsum(delay[1:(5-1),2]))
delay
QobsLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
QobsLM
QobsLMmat<- as.matrix(QobsLM)
plot(QobsLMmat,type="l", col="red")
rainLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
rainLM
plot(rainLM)
rainLMmat<- as.matrix(rainLM)
rainLMmat
plot(rainLMmat,type="l", col="red")
plot(rainLMmat)
```

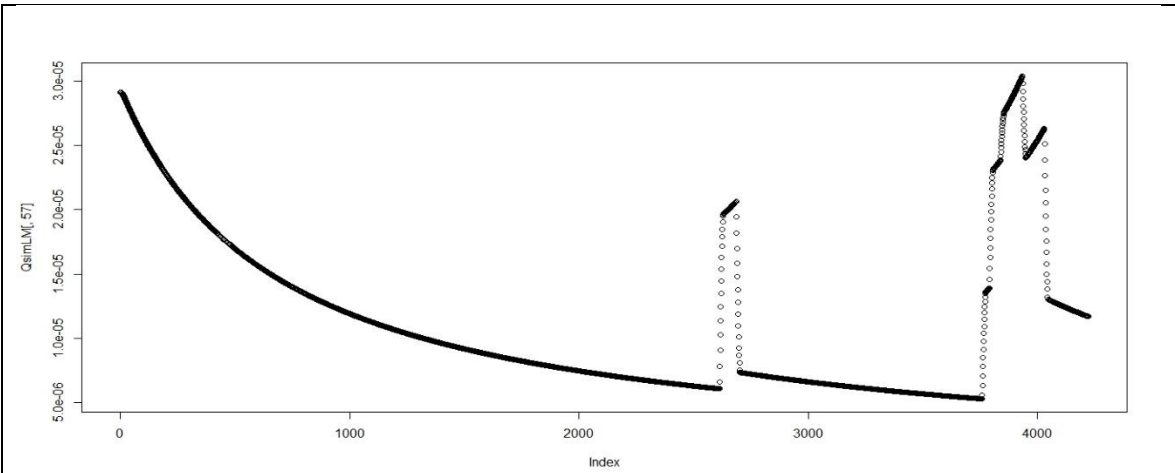
```

##### EXPORTANDO LA LLUVIA PARA EVALUAR CALIDAD DE DATOS
#####
write.csv(rainLMmat,file=~ /rainLMmat.csv",row.names = TRUE)
write.csv(rainLM,file=~ /rainLM.csv",row.names = TRUE)
ETpLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
ETpLM
summary(ETpLM)
ETpLMmat<- as.matrix(ETpLM)
ETpLMmat
plot(ETpLMmat,type="h", col="red")
topidxLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
topidxLM
summary(topidxLM)
plot(topidxLM,type="h", col="red",xlim=c(0,5000),ylim=c(0,0.00005))
topidxLMmat<- as.matrix(topidxLM)
topidxLMmat
plot(topidxLMmat,type="h", col="red")
##### AHORA EXPORTANDO topidx
write.csv(topidxLM,file=~ /topidxLM.csv",row.names = TRUE)
write.csv(topidxLMmat,file=~ /topidxLMmat.csv",row.names = TRUE)
delayLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
delayLM
summary(delayLM)
plot(delayLM)
##### esto no hago matrix
delayLMmat<- as.matrix(delayLM)
delayLMmat
plot(delayLMmat,type="h", col="red")
##### AHORA EXPORTANDO delay
write.csv(delay,file=~ /delayHuagrahuma.csv",row.names = TRUE)
write.csv(delayLM,file=~ /delayLM.csv",row.names = TRUE)
parametersLM<-read.csv(file.choose()) #no olvide ctrl+r para ejecutar
parametersLM
summary(parametersLM)
str(parametersLM)
parametersLMmat<- as.matrix(parametersLM)
parametersLMmat
summary(parametersLMmat)
str(parametersLMmat)
##### AHORA A SIMULAR
QsimLM <- topmodel(parametersLMmat, topidxLMmat, delayLM, rainLMmat,
ETpLMmat)
QsimLM
plot(QsimLM[,57])
points(QobsLMmat, type="h", col="red")
NSEff(QobsLMmat, QsimLM[,57])
NSEff

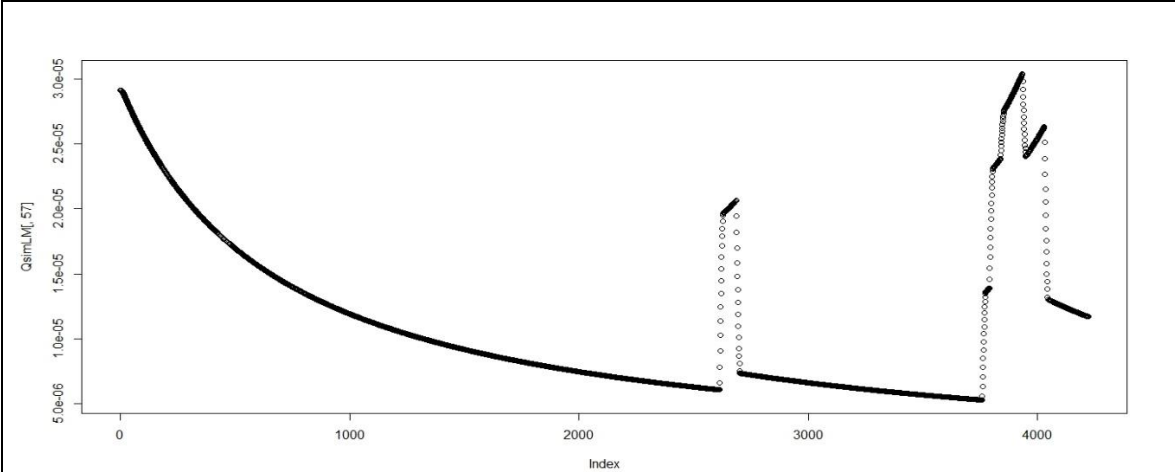
```

*QobsLMmat*  
*str(QsimLM)*  
*parametersLMmat[57,]*  
*parametersLMmat[1,]*  
*parametersLMmat[51,]*  
*parametersLMmat[71,]*  
*parametersLMmat[14,]*

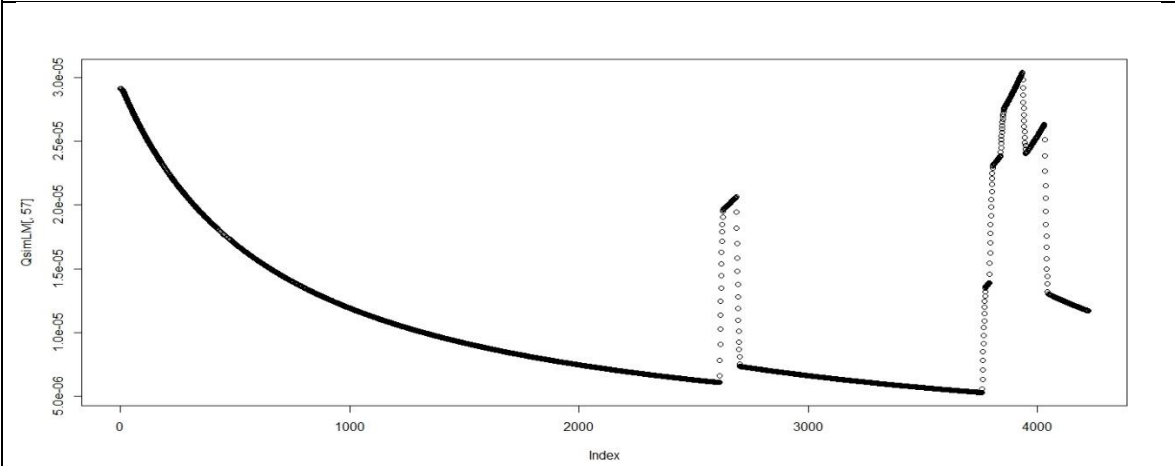
## Restante de simulaciones procedentes del ajuste de sensibilidad



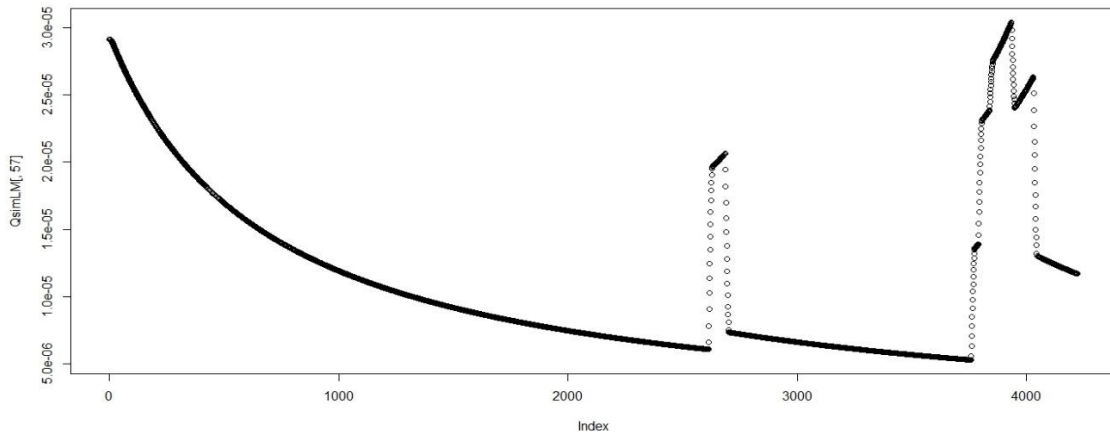
*Iteración número 2 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



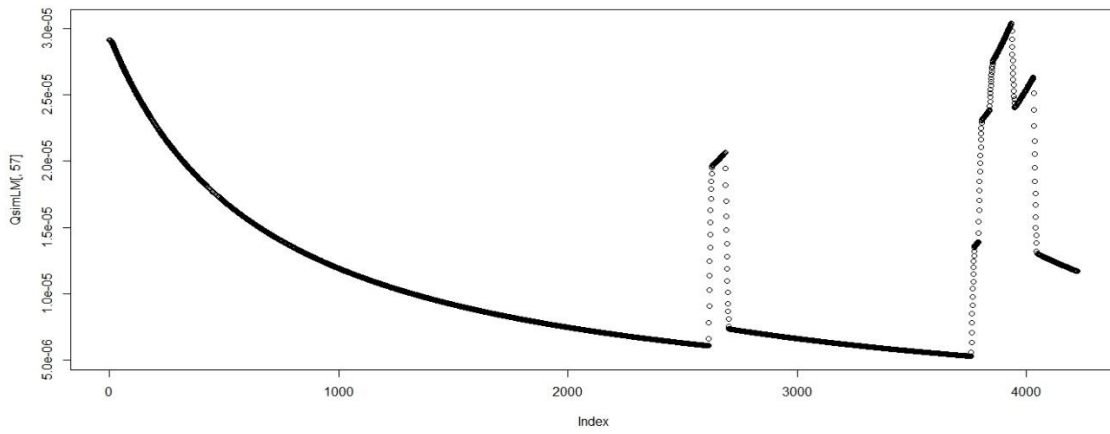
*Iteración número 3 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



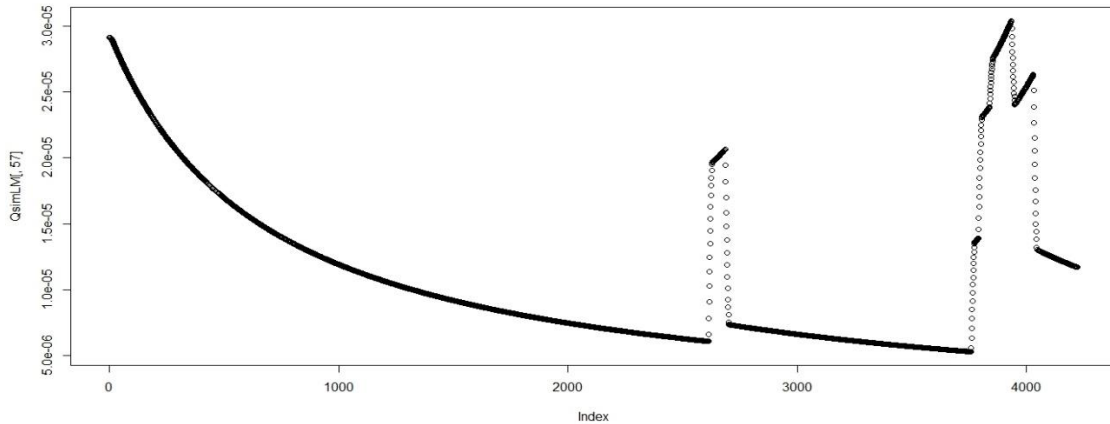
*Iteración número 6 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



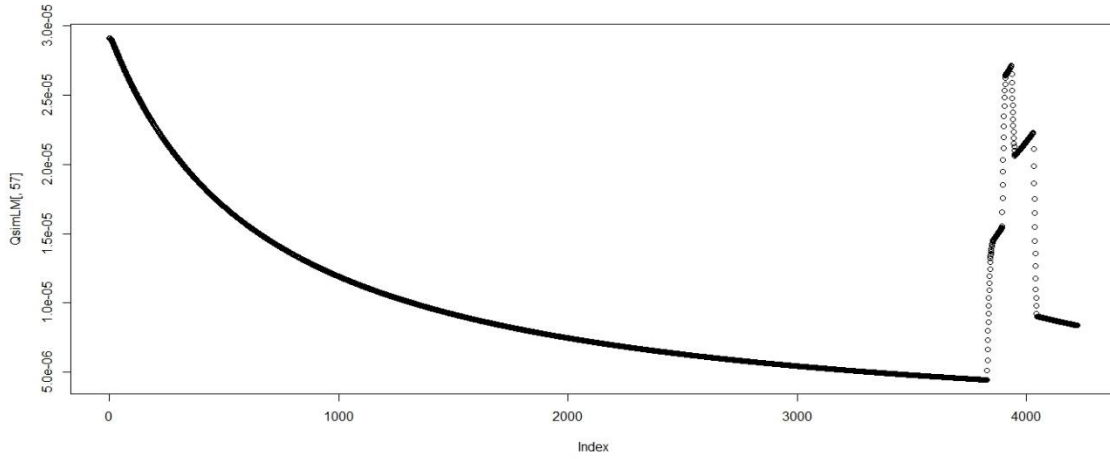
*Iteración número 7 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



*Iteración número 8 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



*Iteración número 9 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*



*Iteración número 10 del ajuste de parámetros para el caudal simulado*

## Anexos fotográficos de campo



*Aforo de río utilizando  $Q=V*A$  con el objetivo de confirmar mediciones del transductor de presión*



*Extracción de datos de caudales del transductor de presión*



*Extracción de datos de precipitación del pluviómetro*