



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESTIMACIÓN DE LA FRACCIÓN DE AGUA DE EVENTO Y PRE EVENTO QUE  
APORTAN AL CAUDAL, MEDIANTE EL USO DE ISÓTOPOS ESTABLES, EN LA  
CUENCA DEL RÍO ZHURUCAY**

Tesis previa a la obtención del  
título de Ingeniera Ambiental

**AUTORA:**

Mayra Elizabeth Ramón Reinozo

**DIRECTOR:**

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, Ph.D.

**Cuenca-Ecuador**

**2015**



## RESUMEN:

Durante los últimos años la información hidrológica relacionada a páramos ha cobrado gran importancia por los beneficios ecosistémicos éstos proveen en el ámbito social, económico y ambiental. Investigaciones realizadas en este ecosistema son aún necesarias para esclarecer y entender su funcionamiento y dinámica hidrológica.

Para estimar la fracción de agua de evento y pre-evento que aportan las fuentes de escorrentía al caudal durante eventos de precipitación, mediante el uso de modelos de mezcla, fue analizada información isotópica (Oxígeno 18) de precipitación y caudal de la cuenca del río Zhuruca y para el período febrero - abril 2014.

El análisis de los resultados muestra que los aportes de agua de pre-evento son predominantes, alcanzando hasta un 98% en función de la humedad antecedente y la intensidad de la lluvia. Se observa una alta correlación del porcentaje de pre-evento con los suelos Andosoles e Histosoles ( $r^2= 0.7$ ), mostrando la importancia que las características y propiedades físico-químicas de estos suelos cumplen en la generación de la escorrentía. Asimismo se observa una dependencia de la fracción de pre-evento con la humedad antecedente y la intensidad de la lluvia.

Los resultados sometidos a un análisis de incertidumbre, revelaron un rango de variación entre el 4 y 31 %, pudiendo considerarse como confiables. Aunque también se dieron casos en los que se presentaron incertidumbres mayores al 100%, siendo el principal contribuyente el componente agua de evento; por lo que los resultados correspondientes a éstos deben interpretarse con cuidado.

**Palabras Clave:** Separación hidrográfica; Generación de escorrentía; Trazador isotópico; Incertidumbre; Evento de Precipitación; Páramo; Modelo conceptual.



## **ABSTRACT:**

In recent years the hydrological information related to paramo has become very important for the ecosystem services provided in the social, economic and environmental fields. Researches conducted in this topic are still necessary to clarify and understand its operation and hydrological dynamics.

To estimate the fraction of event and pre-event water sources contributing runoff to flow during rainfall events using mixture models was analyzed isotopic data (oxygen 18) of precipitation and flow of the river basin Zhurucay for the period February - April 2014.

Analysis of the results shows that the pre-event water is predominant, reaching up to 98% depending on the antecedent moisture and rainfall intensity. A high correlation of the percentage of pre-event water with the Histosols and Andosols soils is observed ( $r^2 = 0.7$ ), showing the importance of the characteristics and physicochemical properties of these soils in runoff generation.

The results subject to an uncertainty analysis revealed a variation range between 4 and 31% and they can be considered reliable. Although cases where 100% greater uncertainty were also given, being the main contributor the event water component; so the results for these should be interpreted with caution.

**Keywords:** Hydrograph separation; Runoff generation; Isotopic tracer; Uncertainty; Rainfall events; Paramo; Conceptual model.



## ÍNDICE:

RESUMEN: .....	2
ABSTRACT .....	3
Índice de tabla:.....	6
Índice de figuras:.....	6
AGRADECIMIENTOS: .....	9
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO .....	12
2.1 Ciclo Hidrológico .....	12
2.2 Factores que influyen en la generación de la escorrentía. ....	14
2.2 Separación Hidrográfica .....	15
2.3 Isótopos.....	17
2.3 Relaciones isotópicas y abundancia:.....	18
2.4 Trazadores Ambientales:.....	18
2.5 Trazadores Geoquímicos:.....	19
2.6 Efectos en los Isótopos durante la precipitación .....	19
2.8 Análisis de Incertidumbre .....	19
2.9 Modelo Conceptual.....	20
CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS .....	20
3.1 Área de Estudio: .....	20
3.2 Sistema de Monitoreo:.....	24
3.3 Materiales y Equipos:.....	25
3.4 Análisis de Laboratorio:.....	27
3.5 Objetivo 1: Determinar el porcentaje de aporte de agua de evento y pre evento en la generación de caudal. ....	28
3.6 Objetivo 2: Cuantificar la incertidumbre de los porcentajes de agua de evento y pre evento determinados.....	30
3.7 Objetivo 3: Construir un Modelo Conceptual de los procesos que controlan el porcentaje de aporte de agua de pre-evento a la escorrentía. ....	31
CAPITULO 4: Resultados y Discusión.....	32
4.1 Objetivo 1 / 2: Determinar el porcentaje de aporte de agua de evento y pre evento en la generación de caudal / Cuantificar la incertidumbre de los porcentajes de agua de evento y pre evento determinados. ....	32



4.2 Objetivo 3: Construir un Modelo Conceptual de los procesos que controlan el porcentaje de aporte de agua de pre-evento a la escorrentía.....	44
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES:.....	51
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES:.....	52
BIBLIOGRAFÍA:.....	53
ANEXOS: .....	58

**Índice de tabla:**

Tabla 1: Características Biofísicas de las microcuencas monitoreadas.....	23
Tabla 2: Caracterización de los eventos (Precipitación-Caudal) .....	32
Tabla 3 Caracterización de eventos: Agua de pre-evento – evento / Incertidumbre. ...	40
Tabla 4: Resultados de las correlaciones del porcentaje de pre-evento con los diferentes parámetros.....	44

**Índice de figuras:**

Figura 1. Pajonal .....	24
Figura 2. Escorrentía Superficial.....	24
Figura 3. Mapa de la cuenca del río Zhurucay .....	25
Figura 4. Vertederos mixtos.....	27
Figura 5: Pluviógrafo ONSET, tipo balancín. ....	27
Figura 6: Recolectores de Lluvia. ....	27
Figura 7: A partir de los nuevos valores $f_p$ calculados, se genera una nueva curva y bajo esta se encuentra el porcentaje de agua de pre-evento. ....	30
Figura 8: Evento 1: microcuenca 4 (izquierda); microcuenca 7 (derecha).....	33
Figura 9. Evento 2: Izquierda (M1); Derecha (M2) .....	35
Figura 10: Evento 3: Izquierda (microcuenca 7), Derecha (microcuenca 4) .....	37
Figura 11: Evento 4: Izquierda (microcuenca 7), Derecha (microcuenca 6).....	39
Figura 12: comportamiento de la microcuenca (M7), durante cada uno de los eventos registrados para el año 2014. a) Evento 1; b) Evento 2; c) Evento 3; d) Evento 4.....	43
Figura 13. Correlación Andosoles vs Pre-evento.....	45
Figura 14. Histosoles vs Pre-evento .....	46
Figura 15. Precipitación $Ant_{4D}$ vs Pre-evento .....	47
Figura 16. Intensidad máxima vs Pre-evento .....	48
Figura 17 a. Precipitación Antecedente Alta .....	50
Figura 17 b. Precipitación Antecedente baja .....	50



**Universidad de Cuenca**  
**Cláusula de Propiedad Intelectual**

Mayra Elizabeth Ramón Reinozo autora de la tesis "ESTIMACIÓN DE LA FRACCIÓN DE AGUA DE EVENTO Y PRE EVENTO QUE APORTAN AL CAUDAL, MEDIANTE EL USO DE ISÓTOPOS ESTABLES, EN LA CUENCA DEL RÍO ZHURUCAY", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, mayo de 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Reinozo'.

---

Mayra Elizabeth Ramón Reinozo

C.I: 1400553580



**Universidad de Cuenca**  
**Cláusula de Propiedad Intelectual**

Mayra Elizabeth Ramón Reinozo autora de la tesis "ESTIMACIÓN DE LA FRACCIÓN DE AGUA DE EVENTO Y PRE-EVENTO QUE APORTAN AL CAUDAL, MEDIANTE EL USO DE ISÓTOPOS ESTABLES, EN LA CUENCA DEL RÍO ZHURUCAY", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, mayo de 2015

---

Mayra Elizabeth Ramón Reinozo

C.I: 1400553580





### **AGRADECIMIENTOS:**

Quiero agradecer infinitamente al Director del Dpto. de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales Phd. Patricio Crespo; a mis tutores/as Ing Patricio Lazo, Ing Alicia Correa, Ing Giovanni Mosquera y Blga. Camila Silva que me guiaron y colaboraron durante todo el desarrollo del presente trabajo, por toda la ayuda y paciencia brindada. Sus conocimientos, sus orientaciones y motivación han sido fundamentales para poder culminar esta investigación. Agradezco asimismo al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca y al proyecto “Prediction and composition of runoff; stable isotope and hydrochemical approaches in Andean paramo basins” por proveer la información necesaria para la investigación.



## **CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN**

El agua es un elemento natural calificado como fuente de vida para todos los seres vivos y está ampliamente interrelacionada con la ecología y la vida de diversos grupos humanos (Vásconez and Hofstede, 2006). Parte de su importancia se ve reflejada especialmente en aspectos socioeconómicos, pues es un elemento clave en el progreso de la civilización (Chow et al., 2000). En el Austro Ecuatoriano el agua es usada principalmente para riego, uso doméstico, y generación hidroeléctrica (Buytaert et al., 2005; 2006a; 2006b). El mayor porcentaje de agua para estos usos proviene del páramo (Buytaert, 2004; Quintero et al., 2010).

Los páramos son reconocidos por su alta biodiversidad, por sus servicios ambientales como alta capacidad de retención y regulación hídrica, por ser proveedor permanente de agua de buena calidad para millones de personas y por actuar como sumidero de carbono (Buytaert et al., 2006c; Llambí et al., 2012; Quichimbo et al., 2012; Quintero et al., 2010; Vásconez and Hofstede, 2006), debido principalmente a las propiedades físico-químicas de sus suelos (Borja et al., 2008; Lazo and Mosquera, 2012; Pipes et al., 2014).

El páramo ocupa las partes altas de los Andes de Venezuela, Colombia, Ecuador y el noreste de Perú (Buytaert et al., 2006b; 2007a). En el Ecuador, el páramo abarca el 6% del territorio nacional con alrededor de 1.250.000 ha, razón por la que es considerado el país con mayor porcentaje de páramos respecto al total de su territorio (Medina & Mena 2001). Sin embargo, no existen suficientes investigaciones que permitan entender los procesos que tienen lugar en este ecosistema (Quichimbo et al., 2012), la dinámica del agua y las interrelaciones existentes entre el ciclo hidrológico y el funcionamiento de las cuencas de páramo alto andino, lo cual es esencial para el manejo y conservación del mismo (Buytaert et al., 2006a; Hofstede et al., 2003; Quintero et al., 2010; Vásconez and Hofstede, 2006).

Conocer las fuentes temporales de las que proviene el agua permite tener una idea más amplia sobre las características y el funcionamiento hidrológico de este ecosistema y aportar con conocimiento para la toma de decisiones respecto al desarrollo de políticas públicas y medidas preventivas relacionadas al agua en pro de la protección, conservación y mejora de la gestión hídrica, beneficiando así al ambiente y sociedad.



Los porcentajes de aporte de agua a la escorrentía indican como responde la cuenca ante un evento de precipitación, y los análisis de estos resultados permiten entender qué papel juegan las características del ecosistema sobre los procesos de generación de escorrentía (Beighley et al., 2005). Asimismo permite entender el proceso de transformación lluvia – escorrentía y su dependencia con la dinámica del ciclo del Carbono y de los Nutrientes, puesto que autores como Goller (2004); Mcdiffett et al., (1989) reconocen una relación evidente entre la movilización de carbono y nutrientes durante un evento de lluvia.

Howson (2012), por su parte, señala que los isótopos del agua han sido utilizados en varios estudios en un amplio rango climático, geológico y de uso de suelo para conceptualizar la generación de la escorrentía. Respecto a sus utilidades, Genereux (1998) menciona que los datos hidrométricos sumados a los datos de señal isotópica logran revelar las proporciones de agua de evento y pre-evento en la escorrentía y al mismo tiempo contribuir al conocimiento cuantitativo de los mecanismos físicos de escorrentía. Rice and Hornberger (1998) también instan a utilizar datos hidrométricos e hidroquímicos para una exitosa separación de hidrograma. La combinación de técnicas genera un entendimiento más exacto de los procesos de lluvia-escorrentía (Crespo, 2012; Lorentz et al., 2008).

Varias investigaciones indican que cuantificar la respuesta de la cuenca durante un evento de lluvia en relación a flujos de agua y composición química es una cuestión importante en la hidrología de cuencas (Howson, 2012; Klaus and McDonnell, 2013; Ladouche et al., 2001; Uhlenbrook and Hoeg, 2003). Con este antecedente el presente estudio tiene como objetivo principal estimar la fracción de agua de evento y pre-evento de escorrentía utilizando el isótopo Oxígeno 18 como trazador durante eventos de lluvia, con la finalidad de conocer los procesos que controlan el aporte de la fracción de pre-evento.

Para alcanzar el objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos: I) Determinar el porcentaje de aporte de agua de evento y pre-evento en la generación de caudal. II) Cuantificar la incertidumbre de los porcentajes de agua de evento y pre-evento determinados. III) Construir un Modelo Conceptual de los procesos que controlan el aporte de agua de pre-evento a la escorrentía durante eventos de precipitación.



## CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es uno de los principales mecanismos para que la vida en la tierra sea posible, razón por la cual es el foco central en la hidrología. Cumple un rol vital dentro de la regulación del clima, y gracias a la interacción con la tierra y con los demás ciclos naturales da soporte para que se realicen otros procesos como la asimilación del carbono y el aporte de nutrientes, entre otros (Chow et al., 2000; Mook and Custodio, 2002)

El ciclo hidrológico está conformado por varios procesos que ocurren simultáneamente, entre los cuales se mencionan los siguientes:

**Precipitación:** Es el agua que cae a la superficie de la tierra, como resultado de la condensación, misma que toma lugar cuando la temperatura de una masa de aire desciende bajo su punto de rocío, por lo que parte del vapor de agua comienza a condensarse en forma de gotas o en su defecto si la temperatura es menor a 0°C, se transforma en hielo directamente. Mediante núcleos de condensación, que no son más que partículas higroscópicas, es decir, afines al agua, las gotas empiezan a aumentar de tamaño, hasta que por su peso precipitan (Fisure, 2009).

La precipitación puede presentarse como lluvia, llovizna, granizo, neblina, nieve, rocío, entre otros. Para la presente investigación cuando se hable de precipitación se referirá exclusivamente a la lluvia/llovizna que según Padrón (2013) representa alrededor del 80% de la precipitación total que ocurre en la zona de estudio.

Dentro de las características de la precipitación se encuentra la duración, intensidad y frecuencia. Generalmente la duración e intensidad son inversamente proporcionales, mientras que la frecuencia tiende a aumentar con la altitud de la zona.

**Evaporación:** Es el agua que mediante una fuente de energía es transportada desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Los factores más influyentes en la evaporación son el suministro de energía y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación. La principal fuente de energía calórica es la radiación solar (Chow et al., 2000).

**Infiltración:** Es el transporte o movimiento del agua debido a fuerzas de gravedad y capilaridad desde la superficie hacia el interior del suelo, especialmente en la zona no saturada que se encuentra entre la superficie del suelo y el nivel freático, donde los



poros no están llenos completamente. La infiltración está limitada por fuerzas en el flujo dentro de los poros del suelo en términos de permeabilidad o conductividad hidráulica (Oñate, 2009; Tarboton, 2003).

La velocidad de infiltración depende de la textura, humedad del suelo y de la intensidad de la lluvia. La textura del suelo está determinada por el tamaño de las partículas de minerales del suelo, a mayor tamaño mayor porosidad y por lo tanto aumenta la capacidad de infiltración. El contenido de humedad juega también un papel importante, ya que si los poros están llenos de agua la infiltración será escasa o nula. En cuanto a la intensidad de la lluvia, mientras mayor sea ésta, la cantidad de agua que infiltre también aumentará. En relación con la cobertura vegetal, experimentos demuestran que un suelo con raíces permite una infiltración casi total por lo que la escorrentía superficial podría considerarse nula, incluso en casos de lluvia intensa (Giraldo, 2002).

**Escorrentía:** Son los trayectos que realiza el agua hasta llegar a un cauce. La escorrentía puede ser superficial, subsuperficial y subterránea, los cuales frecuentemente interactúan entre sí (Buttle, 1999).

La escorrentía superficial se forma cuando todos los poros del terreno han sido saturados de agua mediante la infiltración, de manera que el agua empieza a fluir por la acción de la gravedad hacia el cauce más cercano. El volumen de escorrentía superficial que se genere depende de las características de la cuenca, como condiciones climáticas, topográficas y de suelos (Oñate, 2009).

La escorrentía superficial es un flujo libre del agua sobre el terreno de manera que muestra un aporte rápido al cauce; la escorrentía subsuperficial tiene una respuesta intermedia y se encuentra parcialmente saturada, mientras que el aporte de la escorrentía subterránea es lenta debido a que el flujo se encuentra saturado.

Dentro del ciclo hidrológico uno de los engranajes clave y más importantes es la escorrentía, por lo que entender su generación es sustancial para mejorar la gestión hídrica, optimizar los usos del agua y el manejo y conservación de acuerdo a la realidad zonal (Quintero et al., 2010), para lo cual el uso de isótopos estables como trazadores es una herramienta esencial (Buttle, 1994; Klaus and McDonnell, 2013; Mook and Custodio, 2002).



## 2.2 Factores que influyen en la generación de la escorrentía.

Klaus and McDonnell (2013), en una revisión de los estudios publicados hasta la fecha muestran 5 características que consideran importantes e influyentes en la generación de la escorrentía y en la división de agua de evento y pre-evento. Dentro de las características se cuentan: Tamaño de la cuenca, paisaje, uso de suelo, estado inicial de la cuenca y características de la precipitación.

De los resultados de los estudios realizados no se llega a un consenso puesto que se reportan diferentes respuestas para cada característica mencionada, imposibilitando la generalización y su conceptualización. Por ejemplo: Mientras Gomi et al. (2010), al igual que Sklash et al. (1976) reportan que el agua de pre-evento incrementa con el tamaño de la cuenca; Shanley et al. (2002) y Brown et al. (1999) encontraron que las contribuciones de agua de evento aumentan de forma proporcional al tamaño de la cuenca.

Un estudio realizado en la cuenca del río Zhuruca y (Mosquera et al., 2012) utilizando isótopos estables, llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se observa la presencia del efecto altitudinal, de cantidad, continentalidad y estacionalidad para la señal isotópica de la precipitación.
- Para períodos secos, la principal fuente de regulación de escorrentía es el agua sub-superficial. Además se muestra que los Histosoles son los tipos de suelos que principalmente se encargan de la retención de la escorrentía en la cuenca, tanto en épocas secas como durante eventos de lluvia.

Sobre los procesos hidrológicos en la zona de estudio, se han realizado varias investigaciones multidisciplinarias que han logrado generar información importante:

Respecto a la escorrentía los resultados apuntan a que se encuentra controlada principalmente por la precipitación (que mayoritariamente cae en forma de llovizna) y por las características de los suelos (Padrón, 2013; Albuja and Tenelanda, 2014). El principal aporte de flujo al caudal es subsuperficial lateral (Albuja and Tenelanda, 2014; Mosquera et al., 2012), que como describe Rivera (2014) se debe a que la humedad es directamente proporcional a la conductividad hidráulica; la misma que, para la zona de raíces (0 a 12 cm) es mucho mayor que para las zonas más profundas, lo cual explica que la mayor contribución al caudal sea por flujo lateral



subsuperficial. Goller (2004) y Crespo et al. (2011) también encontraron que el flujo predominante durante eventos es subsuperficial, para bosques montanos lluviosos y bosques nublados en el Ecuador.

En relación a la variabilidad temporal durante eventos, Rivera (2014) encontró que la variable principal es el volumen de lluvia, además demostró que valores menores a 1.11 mm no aportan al caudal sino que son interceptados por el pajonal y en su mayoría ingresan al horizonte Ah (orgánico); mientras que si es mayor a 10mm logra infiltrarse hasta el horizonte mineral. Por otra parte, para la variabilidad espacial en zona de laderas, la parte baja de la ladera tiene la mayor capacidad de almacenamiento (Histosoles) y es la que regula los ingresos laterales de la parte alta (Andosoles), mientras que la parte baja final es la que suministra agua hacia el cauce.

Según Borja et al. (2008) para los páramos de Quimsacocha la conductividad hidráulica saturada es más baja en los Histosoles comparada con los Andosoles, lo que explica que se forme escorrentía superficial cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración, aunque como indican Mosquera et al. (2012) este tipo de flujo es prácticamente inexistente en la cuenca de estudio, con excepciones en donde se han producido eventos con máxima precipitación y con condiciones anteriores de humedad. Asimismo no se evidencia aporte significativo de aguas subterráneas a la generación de caudal.

Estos resultados concuerdan con investigaciones análogas para cuencas altoandinas, referidas en los trabajos de (Buytaert et al., 2005; 2007b; Crespo, 2012; Goller, 2004) que indican que el flujo predominante es subsuperficial y que el flujo hortoniano es casi inexistente, aunque se puede producir por exceso de saturación. Respecto a la conductividad hidráulica Buytaert (2004), menciona que, para la zona de raíces, ésta es mayor que para los horizontes intermedios.

## **2.2 Separación Hidrográfica**

Una de las primeras formas de análisis hidrológicos es la separación hidrográfica que divide al hidrograma de escorrentía en sus componentes (agua de evento y pre-evento) y determina sus porcentajes de aporte (Genereux, 1998; Howson, 2012), mejorando la conceptualización de la generación de la escorrentía (Uhlenbrook and Hoeg, 2003) ya que permite cuantificar la respuesta de la cuenca a los eventos de lluvia en relación a los flujos de agua. Inicialmente se realizaba mediante recursos



gráficos y con los años ha ido mejorando por métodos basados en trazadores isotópicos y químicos (Genereux and Hooper, 1998)

La separación mediante el uso de isótopos, se basa en las diferencias de la abundancia isotópica que existe entre las contribuciones de agua a la escorrentía (Lorentz et al., 2008).

Se conoce como agua de evento, a la lluvia que cae durante un evento de precipitación; mientras que el agua de pre-evento se refiere al agua presente en una cuenca antes de comenzar el evento de interés, pudiendo ser agua subterránea y/o a su vez agua subsuperficial existente en el terreno (Genereux and Hooper, 1998; Klaus and McDonnell, 2013; Ogunka and Jenkins, 1993). En varios estudios se han acuñado los términos agua nueva y vieja como sinónimos de agua de evento y pre-evento, respectivamente (Richey et al., 1998; Sklash and Farvolden, 1979)

Para la separación del hidrograma existen ciertas suposiciones implícitas en la técnica. Estos se transcriben a continuación:

- (1) El contenido isotópico del componente evento es significativamente diferente del componente pre-evento.
- (2) El agua de evento mantiene una señal isotópica constante en espacio y tiempo.
- (3) El agua de pre-evento mantiene una señal isotópica constante en espacio y tiempo.
- (4) El agua subterránea y el agua del suelo son equivalentes isotópicamente y su contribución es despreciable.
- (5) El almacenaje superficial contribuye mínimamente a la escorrentía de evento (Sklash and Farvolden, 1979).

Aunque estos razonamientos tienen varias críticas, puesto que investigaciones demuestran que el agua del suelo puede contribuir significativamente al caudal; además de que el agua del suelo y el agua subterránea tienen señales isotópicas diferentes (Genereux and Hooper, 1998; Klaus and McDonnell, 2013), el método de separación hidrográfica con isótopos continua siendo uno de los mejores a la hora de generar información hidrológica.

Los análisis mediante isótopos han obligado a que se realice una reexaminación sobre los procesos de entrega de agua a la escorrentía (Klaus and McDonnell, 2013). Debido a que resultados en ciertos casos muestran una alta preponderancia del agua de pre-evento en los hidrogramas de eventos de lluvia, incluso en el flujo pico, contrario a lo





que se creía, puesto que se consideraba que el agua de pre-evento no aportaba significativamente al caudal de la escorrentía (Freeze, 1974). Sklash and Farvolden (1979), concluyen que en los sistemas húmedos en un hidrograma de tormenta, es el agua de pre-evento la fracción dominante. Aunque se debe mencionar que los resultados obtenidos varían ampliamente. Para algunos casos el agua de pre-evento contribuye significativamente (McGlynn, 2003) con valores que oscilan entre el 80 – 95%; mientras que también existen varios estudios que sugieren que el agua de evento se encuentre entre valores de 60% (Goller, 2004; Ogunkoya and Jenkins, 1991). Genreux and Hooper (1998), Klaus and McDonnell (2013) ofrecen un compendio de los resultados de varios estudios realizados, corroborando que la fracción dominante mayoritariamente es la de pre-evento.

### 2.3 Isótopos

Los átomos pertenecientes al mismo elemento que contienen el mismo número de protones pero distinto número de neutrones se definen como Isótopos. Diferentes isótopos de un mismo elemento tienen diferentes masas (Buttle, 1999; Kendall and Caldwell, 1999; Mook and Custodio, 2002)

Por ejemplo, para el caso del Oxígeno, todos los isótopos tienen 8 protones, sin embargo un átomo de oxígeno con una masa de 18 ( $^{18}\text{O}$ ), tiene dos neutrones más que el Oxígeno con una masa de 16 ( $^{16}\text{O}$ ).

Los isótopos muestran concentraciones relativamente variables debido a que algunas propiedades de los isótopos son ligeramente diferentes. De ahí derivan las aplicaciones isotópicas:

1. Isótopos estables utilizados como trazadores permiten identificar un cuerpo de agua o cierta cantidad de agua, admite analizar cuantitativamente los hidrogramas de escorrentía, y conocer el recorrido realizado por el agua de la lluvia a través de la escorrentía superficial.
2. El fraccionamiento isotópico, es decir, las variaciones en las concentraciones en los isótopos estables provocadas por el cambio de fase en el agua o en otros compuestos, indica sobre procesos geoquímicos e hidrológicos que estén ocurriendo.
3. Determinación de las edades del agua, mediante la desintegración radioactiva (Mook and Custodio, 2002).



### 2.3 Relaciones isotópicas y abundancia:

Para determinar las Relaciones isotópicas se hace uso de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\text{abundancia del isótopo en defecto}}{\text{abundancia del isótopo en exceso}} \quad (1)$$

La composición de los isótopos estables es reportada como valores  $\delta$  (abundancia isotópica), mismos que se expresan en partes por mil (‰) relativas a un valor estándar internacional, VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water) (Kendall and McDonnell, 1998; Lorentz et al., 2008), el cual establece un valor de referencia de 0‰ para la abundancia isotópica del agua oceánica.

$$\delta = \left[ \frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (2)$$

Donde:

$R_{\text{sample}}$  = Relación isotópica entre  $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$

$R_{\text{smow}}$  = Razón o proporción estándar, que para el Oxígeno es:

$$^{18}\text{O} / ^{16}\text{O} = 2005.2 \pm 0.45 \times 10^{-6} \quad (3)$$

### 2.4 Trazadores Ambientales:

Laudon and Slaymaker (1997) durante una comparación entre conductividad eléctrica (EC) y la separación hidrográfica mediante isótopos, concluye que los trazadores isotópicos pueden emplearse pero que deben verificarse para cada cuenca. Investigaciones previas realizadas en la cuenca de estudio muestran que el uso de isótopos es viable para este ecosistema, pues han generado información valiosa sobre el movimiento del agua en la cuenca (Mosquera et al., 2012)

Dentro de los trazadores ambientales encontramos a los isotópicos conservativos que permiten obtener conocimiento de los procesos hidrológicos en cuencas pequeñas (Kendall et al., 2001). Los isótopos más utilizados para distinguir entre agua de evento y pre-evento son el Oxígeno, Deuterio y Tritio, debido a que forman parte de la molécula misma del agua, añadidos naturalmente durante un evento de precipitación y sujetos únicamente a variaciones debido a la mezcla (Kendall and Caldwell, 1999; Klaus and McDonnell, 2013; Uhlenbrook and Hoeg, 2003) .

Los trazadores isotópicos  $^2\text{H}$  (Deuterio) y  $^{18}\text{O}$  (Oxígeno) se han usado sólo en raras ocasiones en conjunto debido a que se supone que guardan alta correlación entre sí por lo que generan la misma información (Howson, 2012); para la zona de estudio no



es la excepción pues los resultados de las investigaciones indican que el Oxígeno 18 y el Deuterio muestran tendencias similares (Mosquera et al., 2012).

### **2.5 Trazadores Geoquímicos:**

Dentro de los trazadores geoquímicos podemos encontrar a la EC, alcalinidad, entre otros, los cuales principalmente se usan para determinar el origen de los componentes de la escorrentía (Uhlenbrook and Hoeg, 2003). La EC responde a la presencia de sólidos disueltos inorgánicos; la alcalinidad mide la capacidad del agua para neutralizar los ácidos y está influenciada por el tipo de suelo y geología (USEPA, 2012).

En estudios realizados con los trazadores químicos e isotópicos en conjunto, se concluye que las diferencias entre las fracciones de pre-evento obtenidos se deben al comportamiento cuasi conservativo de los trazadores químicos (Richey et al., 1998)

### **2.6 Efectos en los Isótopos durante la precipitación**

Mook and Custodio (2002) indican los efectos que causan variaciones temporales y regionales en la señal isotópica:

- ✚ Efecto latitudinal.- A mayor latitud, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  disminuyen.
- ✚ Efecto Continental.- Precipitaciones ocurrientes en lugares mas cercanos al interior del continente, tienen valores de  $\delta^{18}\text{O}$  más negativos.
- ✚ Efecto Altitudinal.- A mayor altitud, menor valor de  $\delta^{18}\text{O}$  para la precipitación.
- ✚ Efecto Estacional.- En temporada invernal, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  se vuelven más negativos.
- ✚ Efecto Intensidad.- Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  más negativos, durante precipitaciones intensas.

### **2.8 Análisis de Incertidumbre**

La incertidumbre, según define Kline (1985), no expresa error sino inexactitud, cuyo valor debe ser previsto por un análisis de incertidumbre. En un sentido amplio, el valor reportado por una medición describe la tendencia central, generalmente el promedio. La incertidumbre en este caso describiría la dispersión en una medida con nivel de probabilidad indicado como la desviación estándar (Kline, 1985). En este estudio la incertidumbre es analizada con la finalidad de determinar la exactitud de la fracción de



pre-evento calculada, a partir del modelo de separación del hidrograma en dos componentes.

Para interpretar los modelos de mezcla durante la separación del hidrograma en fracción de evento y pre-evento es importante considerar su variabilidad espacial y temporal así como los errores analíticos de laboratorio y problemas de mezcla de agua (Genereux, 1998; Joerin et al., 2002). De esta manera mediante un análisis de incertidumbre que considere los factores más significativos que aportan al error, se logra validar los resultados obtenidos durante la investigación.

Mediante técnicas de propagación de incertidumbre que han sido usados en otros problemas de ingeniería y ciencia, Genereux (1998) relaciona la incertidumbre de las fracciones de mezcla con las concentraciones del trazador, permitiendo cuantificar formalmente la exactitud de los resultados.

## 2.9 Modelo Conceptual

Con la finalidad de conocer la manera en la que influyen las características del paisaje en los porcentajes de aporte flujos en la escorrentía se utilizaron técnicas estadísticas que permitan interpretar datos para explicar la ocurrencia de ciertos fenómenos y entender el funcionamiento integral del objeto de estudio. Las técnicas utilizadas fueron:

- a) **Correlación Lineal:** permite encontrar el grado en que se relacionan dos variables (Helsel and Hirsch, 2002). El coeficiente de relación nos indica cómo influyen las características o parámetros frente a los resultados que se obtengan de la separación del hidrograma.
- b) **Prueba P:** El valor p es la probabilidad de obtener la estadística de prueba. Se deriva de los datos y mide la "credibilidad" de la hipótesis nula. Cuanto menor sea el valor de p, menos probable es el estadístico. El valor p es también llamado "nivel de significancia alcanzado" (Helsel and Hirsch, 2002).

## CAPITULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Área de Estudio:

La microcuenca del río Zhurucay se encuentra al Suroeste de la República del Ecuador en la provincia del Azuay aproximadamente a 85 km de la ciudad de Cuenca, en los páramos de Quimsacocha. La zona de estudio cuenta con una superficie de 7,5



km<sup>2</sup> donde se encuentran 6 microcuencas tributarias y una a la salida de la cuenca (M1, M2, M3, M4, M5, M6 y M7). La microcuenca tiene rango altitudinal entre los 3505 y 3900 m.s.n.m.

Los páramos de Quimsacocha se encuentran bajo la influencia de las dos corrientes de aire que van desde los océanos ascendiendo por la cordillera, debido a que está situado en las cabeceras de los ríos Yanuncay, Tarqui y Rircay; los dos primeros son afluentes del río Paute, que desemboca en el Atlántico, el río Rircay, que es afluente del río Jubones, llega hasta el océano Pacífico (Iñiguez et al., 2008).

Para los páramos de Quimsacocha, la temperatura media mensual es de 6°C, con un 90% de humedad relativa media mensual. La velocidad del viento entre los meses de Enero a Junio (Invierno) es de 4 m/s; mientras que para Julio a Diciembre (verano) la media mensual alcanza valores de hasta 12 m/s (Iñiguez et al., 2008).

La precipitación anual varía entre 1221 y 1300 mm/año (Mosquera et al., 2013), dando un promedio en la microcuenca de 1277 mm/año, con una descarga de 27.4 l/s/km<sup>2</sup>, y un coeficiente de escorrentía anual de 0.68 a la salida de la cuenca (M7) (Albuja and Tenelanda, 2014). La precipitación acumulada en las microcuencas muestra una variación entre 1144 y 1278 mm/año, evidenciando que la precipitación es prácticamente homogénea, con intensidades bajas (menores a 10 mm/h) (Albuja and Tenelanda, 2014; Mosquera et al., 2013; Padrón, 2013), lo que coincide con estudios realizados en zonas de páramo (Buytaert et al., 2007b, 2006c)

A pesar de su compleja topografía y geología, los suelos del páramo son relativamente homogéneos (Buytaert et al., 2006a) y se ven influenciados por el clima y por una capa homogénea de cenizas volcánicas del cuaternario (Buytaert et al., 2005b). Los suelos más comunes son los Andosoles e Histosoles según la World Reference Base for soil Resources de la FAO (ISSS Working Group RB, 1988), que son suelos volcánicos poco profundos, oscuros y con estructura bastante porosa, lo cual disminuye su densidad aparente y les confiere su alta capacidad de retención de agua (Borja et al., 2008; Buytaert et al., 2006a; Crespo et al., 2014; Mosquera et al., 2013). Según Crespo et al. (2011) los Andosoles se encuentran en un 72% y en un 28% los Histosoles en la cuenca del Río Zhurucay.

El clima frío y húmedo y la baja presión atmosférica favorece la acumulación de materia orgánica (Buytaert et al., 2006a; 2007b). La cobertura vegetal de la cuenca está formada por pajonal (*Calamagrostis intermedia*) en un 71%, almohadilla (*Azorella*



*pedunculata*) en un 15%, 10% de humedal confinado, 2% de bosque de Pino (*Pinus patula*) y 2% de bosque de Polylepis (*Polylepis incana*).

La tabla 1, indica las características biofísicas presentes para cada microcuenca. La figura 1 muestra la cobertura vegetal dominante (pajonal), mientras que en la figura 2 se observa el fenómeno de la escorrentía superficial que se presenta únicamente durante eventos extremos de lluvia, y con alta humedad antecedente (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2012; Padrón, 2013).



Tabla 1: Características Biofísicas de las microcuencas monitoreadas

Cuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Altitud media (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Distribución de tipos de suelos (%)			Cobertura vegetal (%)				Geología (%)		
				AN	HS	LP	TG	CP	QF	PF	Qm	Tu	Qd
M1	0,2	3840	14	85	13	2	85	15	0	0	100	0	0
M2	0,37	3840	24	83	15	2	87	13	0	0	66	1	33
M3	0,38	3800	19	80	16	3	78	18	4	0	59	41	0
M4	0,65	3800	18	76	20	4	79	18	3	0	50	48	2
M5	1,71	3760	13	50	45	5	54	46	0	0	72	14	14
M6	3,28	3780	19	74	22	4	73	24	1	2	50	30	20
M7	7,53	3700	17	72	24	5	71	24	2	2	56	31	13

AN= Andosol; HS=Histosol; LP=Leptosol

TG=Pajonal; CP=Almohadillas; QF=Bosque de Polylepis; PF=Bosque de Pino

Qm=Formación Quimsacocha; Tu= Formación Turi; Qd= Depósitos del Cuaternario



Figura 1. Pajonal

Fuente: Mayra Ramón



Figura 2. Escorrentía Superficial

Fuente: Mayra Ramón

### 3.2 Sistema de Monitoreo:

Para el monitoreo dentro de la cuenca se han dispuesto 7 puntos de muestreo de caudal, distribuidos de tal manera que la información corresponda a un análisis representativo de la cuenca de estudio (figura 3), las muestras del caudal se toman directamente sobre las quebradas, aguas arriba de cada vertedero. El agua de precipitación fue monitoreada en 3 puntos en la zona alta, media y baja de la cuenca.



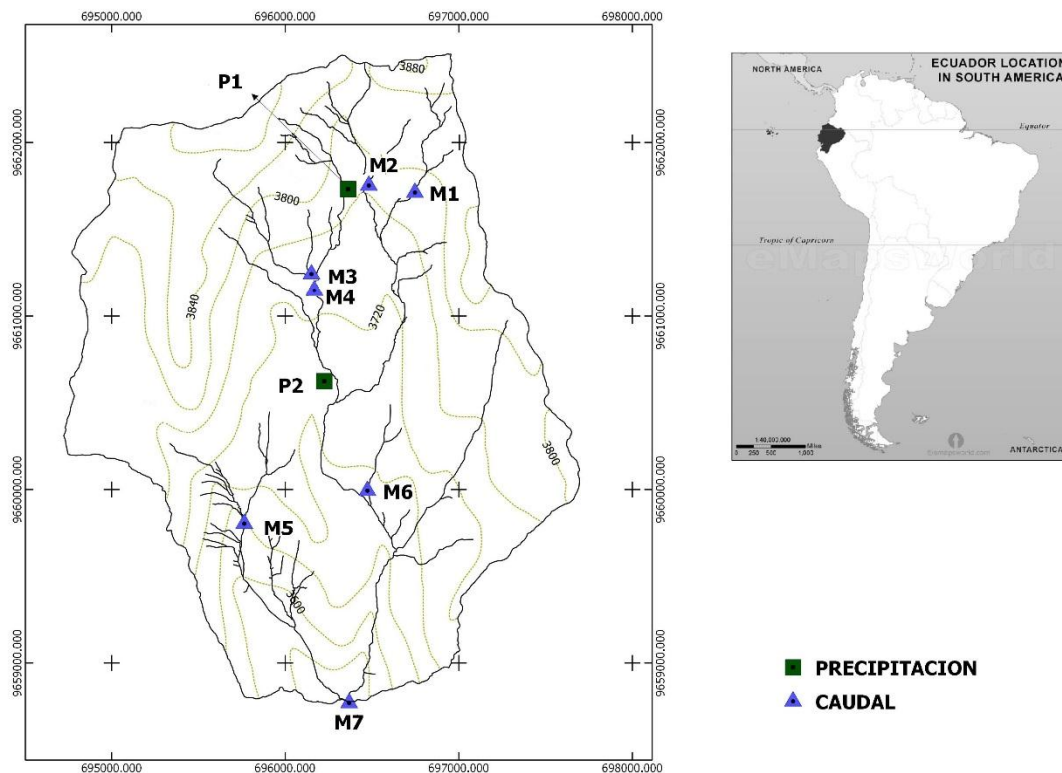


Figura 3. Mapa de la cuenca del río Zhurucay

Fuente: Patricio Lazo

La investigación está enfocada a eventos de precipitación, por lo que las muestras se tomaron simultáneamente en todos los sitios de monitoreo de caudales, en función de tiempo o subida de nivel del agua en los caudales, dependiendo de las condiciones y de la intensidad de la lluvia. Las muestras se tomaron en botellas de vidrio de 2ml color ámbar, fueron selladas con parafilm y almacenadas en un lugar protegido de la luz para evitar su evaporación.

### 3.3 Materiales y Equipos:

Para estimar los caudales se cuenta con vertederos en siete puntos (quebradas) de la cuenca. Todas las microcuenca tributarias tienen vertederos combinados de pared delgada (Figura 4), mientras que la microcuenca saliente tiene vertedero rectangular. En cada vertedero se hallan instalados sensores de nivel Baro-Diver tipo transductor de



presión, marca Schlumberger, para tomar registros con una resolución de 5 min y una precisión de  $\pm 5$  mm, los niveles son transformados a caudal utilizando las relaciones de Kindsvater-Shen (Francuo and Pouyau, 2004).

En algunos eventos se utilizaron muestreadores automáticos para caudales en sitios que se encontraban en lugares de difícil acceso o a su vez para lugares en donde se necesitaban muestras con mayor resolución temporal.

Para obtener datos de precipitación fueron utilizados 4 pluviógrafos (distribuidos en la cuenca) tipo balancín, marca Onset (Figura 5); con una resolución de 0,2 mm. La cuantificación de la cantidad de precipitación media para cada cuenca se realizó mediante la aplicación de polígonos de Thiessen (Aparicio, 1992).

Durante la recolección de las muestras de precipitación se utilizaron envases plásticos recubiertos con papel aluminio para minimizar la evaporación del agua, además se colocaron embudos de polipropileno para tener una mayor superficie de captación, y pequeñas pelotas plásticas en los embudos para disminuir la evaporación del agua recolectada, y a su vez evitar el ingreso de materiales que pudieran obstruir el embudo y/o alterar las muestras (Figura 6). Los recolectores están ubicados en la zona alta, media y baja de la cuenca a 3779, 3700 y 3297 m.s.n.m. respectivamente (Mosquera et al., 2013).

Todos los equipos descritos anteriormente fueron instalados en el año 2008 por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca. Una descripción más detallada de los equipos instalados puede encontrarse en (Mosquera et al., 2013). La cantidad recolectada fue comparada con la cantidad de precipitación calculada para cada cuenca.

La cuenca fue caracterizada anteriormente mediante mapas generados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con la ayuda de Sistemas de Posición Geográfica (GPS); mediante estos mapas se calculó el área, los porcentajes de suelos Andosoles e Histosoles, pendiente, altitud media y geología para cada subcuenca. Para la caracterización de eventos, los sensores de nivel proporcionan la información necesaria para conocer el Caudal máximo y mínimo para cada subcuenca analizada; mientras que los pluviógrafos ONSET brindaron datos para determinar los valores de la intensidad máxima, media, mínima, así como la precipitación antecedente 14, 7 y 4 días anteriores al

evento como un indicador de las condiciones de humedad antecedente. Estas características se correlacionaran con el porcentaje de pre-evento para determinar si existe alguna relación entre estas variables, que puedan utilizarse para construir un modelo conceptual.



Figura 4. Vertederos mixtos

Fuente: Mayra Ramón



Figura 5: Pluviógrafo ONSET, tipo balancín.

Fuente: Mayra Ramón



Figura 6: Recolectores de Lluvia.

Fuente: Mayra Ramón

### 3.4 Análisis de Laboratorio:

Las muestras de agua para el análisis isotópico fueron sellados con parafilm, se almacenaron y organizaron siguiendo un orden tipológico y cronológico para el análisis en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, mediante un analizador “Picarro L1102-i



Isotopic Liquid Water and Water Vapor Analyzer”. Los resultados de las concentraciones del Oxígeno 18 cuentan con una precisión de 0,1‰.

A continuación se describe la metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

### **3.5 Objetivo 1: Determinar el porcentaje de aporte de agua de evento y pre-evento en la generación de caudal.**

Para determinar el porcentaje de aporte de agua de evento y pre-evento a la escorrentía durante eventos de lluvia, se creó una base de datos de la información hidrométrica e isotópica correspondiente a la precipitación y caudal. Mediante un análisis gráfico se observaron posibles relaciones existentes y posteriormente mediante un balance de masas conocido como modelo de mezcla, se obtuvieron las fracciones de evento y pre-evento (Klaus and McDonnell, 2013; Rice and Hornberger, 1998; Richey et al., 1998):

$$Q_t = Q_p + Q_e \quad (4)$$

Donde:

$Q_t$ = Caudal Total

$Q_p$ = Caudal de pre-evento

$Q_e$ = Caudal evento

La ecuación de mezcla usada para determinar la fracción de pre-evento ( $f_p$ ) fue la siguiente:

$$f_p = \frac{(C_t - C_e)}{(C_p - C_e)} \quad (5)$$

Donde  $C_t$ ,  $C_e$ , y  $C_p$  son los valores isotópicos del caudal, evento y pre-evento, respectivamente.

Para el aporte del evento se consideró lo siguiente:  $f_p + f_e = 1$  (6)

#### **3.5.1 Concentración Isotópica de Evento y Pre-evento**

En la ecuación del modelo de mezcla, para cada evento, se definió la concentración isotópica perteneciente al evento y al pre-evento de acuerdo a las siguientes consideraciones:



- Para el pre-evento se consideró la señal isotópica de las muestras de caudal anterior a la crecida del hidrograma, y en los eventos para los que no se contó con muestras que pudieran ser representativas de pre-evento se consideraron las muestras post – evento en donde exista un flujo bajo. Para los casos en los que se contaba con más de una muestra se realizó un promedio simple.
- Para el agua de evento, la concentración isotópica usada se obtuvo mediante un promedio ponderado de la abundancia isotópica respecto al volumen de lluvia recolectada al momento de tomar la muestra, para luego mediante una correlación lineal a partir de la altura de los puntos de monitoreo de precipitación (ZLA, ZLB, ZLM) y los valores isotópicos ponderados del agua de evento, obtener la ecuación de la línea de tendencia y calcular la concentración isotópica de la lluvia según la altura media de cada cuenca.

A partir de la medición de caudal (resolución cada 5 min) y de las muestras isotópicas tomadas a lo largo de la duración del evento se genera un hidrograma de escorrentía, el mismo que, con las concentraciones de evento y pre-evento definidas, permitió determinar la fracción de pre-evento (fp) mediante la ecuación (5) para cada punto tomado durante la creciente y recesión del evento. Con estos valores de fp calculados se logró obtener una nueva serie de puntos que permitieron dividir al hidrograma en contribuciones de agua de evento y pre-evento. Para conocer el porcentaje de pre-evento se calculó el área bajo la curva de la nueva serie de puntos.

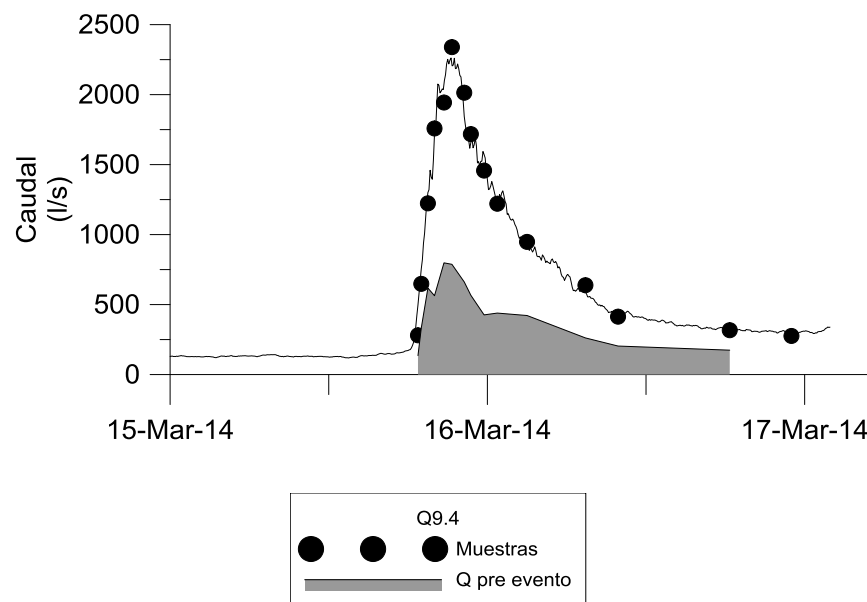


Figura 7: A partir de los nuevos valores  $f_p$  calculados, se genera una nueva curva y bajo esta se encuentra el porcentaje de agua de pre-evento.

### 3.6 Objetivo 2: Cuantificar la incertidumbre de los porcentajes de agua de evento y pre-evento determinados.

Una vez estimada la fracción del agua de evento y pre-evento dentro de la cuenca, se cuantificó la incertidumbre de los resultados, método que está basado en las concentraciones isotópicas y las fracciones de aporte (Genereux, 1998).

$$Wfp = \left\{ \left[ \frac{fp}{(C_e - C_p)} Wcp \right]^2 + \left[ \frac{fe}{(C_e - C_p)} Wce \right]^2 + \left[ \frac{-1}{(C_e - C_p)} Wcs \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Donde:

- $Wfp$  representa la incertidumbre en la fracción de pre-evento determinada.
- $Wcp$ ,  $Wce$ ,  $Wcs$ , simboliza la incertidumbre que se obtiene de multiplicar la desviación estándar por el valor t de la tabla de distribución T-Student y con el mismo nivel de confianza para los tres componentes: pre-evento, evento y error analítico de la medición de la concentración de caudal, que para nuestro caso de estudio es 0,1%.



- $C$  es la concentración de la abundancia isotópica del trazador. Los subíndices  $e$ ,  $p$  y  $s$ , representan al evento, pre-evento y al error analítico de la medición de caudal, respectivamente.
- $f_e$ ,  $f_p$  es el valor obtenido de la separación del hidrograma en evento y pre-evento, respectivamente.

Mediante la resolución de la ecuación (7) se obtiene la incertidumbre de la fracción calculada de pre-evento y los porcentajes con los que aportan los componentes de evento, pre-evento y caudal a la incertidumbre.

### **3.7 Objetivo 3: Construir un Modelo Conceptual de los procesos que controlan el porcentaje de aporte de agua de pre-evento a la escorrentía.**

Como indican Uhlenbrook et al. (2005) y Wels et al. (1991) la respuesta hidrológica de una cuenca depende las características de cada escenario. Por lo que, para entender los procesos que gobiernan el comportamiento de los porcentajes de pre-evento, se realizaron correlaciones entre los porcentajes obtenidos de pre-evento para cada subcuenca y las características físicas e hidrológicas de la cuenca en estudio; se consideraron varios parámetros, que podrían influir en el porcentaje de pre-evento calculado: tipos de suelos, cobertura vegetal, geología, altura media de las microcuencas, pendiente y área; además de características propias del evento (intensidad media y máxima, precipitación antecedente, y precipitación acumulada del día del evento). Se observó si existía cierta dependencia entre las características analizadas y la fracción de pre-evento, permitiéndonos inferir ciertos procesos.

Correlaciones lineales fueron empleadas para determinar el grado de relación o dependencia existente entre las variables y su significación estadística fue valorada mediante la prueba  $P$  utilizando el software para análisis estadístico XLSTAT.



## **CAPITULO 4: Resultados y Discusión**

### **4.1 Objetivo 1 / 2: Determinar el porcentaje de aporte de agua de evento y pre-evento en la generación de caudal / Cuantificar la incertidumbre de los porcentajes de agua de evento y pre-evento determinados.**

Para esta investigación se contó con 4 eventos consecutivos, todos ellos de corta duración y con precipitación antecedente diferenciada para cada evento. En la Tabla 2, se reporta las características de cada evento en función tanto de la precipitación como de caudal. Para la precipitación antecedente se considera la precipitación acumulada 4 días anteriores al evento, el día del evento y la intensidad media y máxima del evento; para el caudal se fija el máximo y mínimo observado.

Tabla 2: Caracterización de los eventos (Precipitación-Caudal)

P Ant<sub>4</sub>=Precipitación acumulada durante los 4 días anteriores al evento.



$P_{Acum_{DE}}$ =Precipitación acumulada durante toda la duración del evento.

I= Intensidad

$Q_{max}$ = Caudal máximo

$Q_{min}$ = Caudal mínimo

El tener una serie temporal de estos eventos permite visualizar de manera global la tendencia y comportamiento del agua al ingresar al sistema hídrico de estudio. Aunque no se cuenta con una serie completa de los 4 eventos monitoreados para el 2014, ya que debido a problemas logísticos no se pudieron muestrear todos los sitios de monitoreo en cada evento.

#### 4.1.1 Descripción de Eventos:

##### 4.1.1.1 Evento 1 (17-18 febrero 2014)

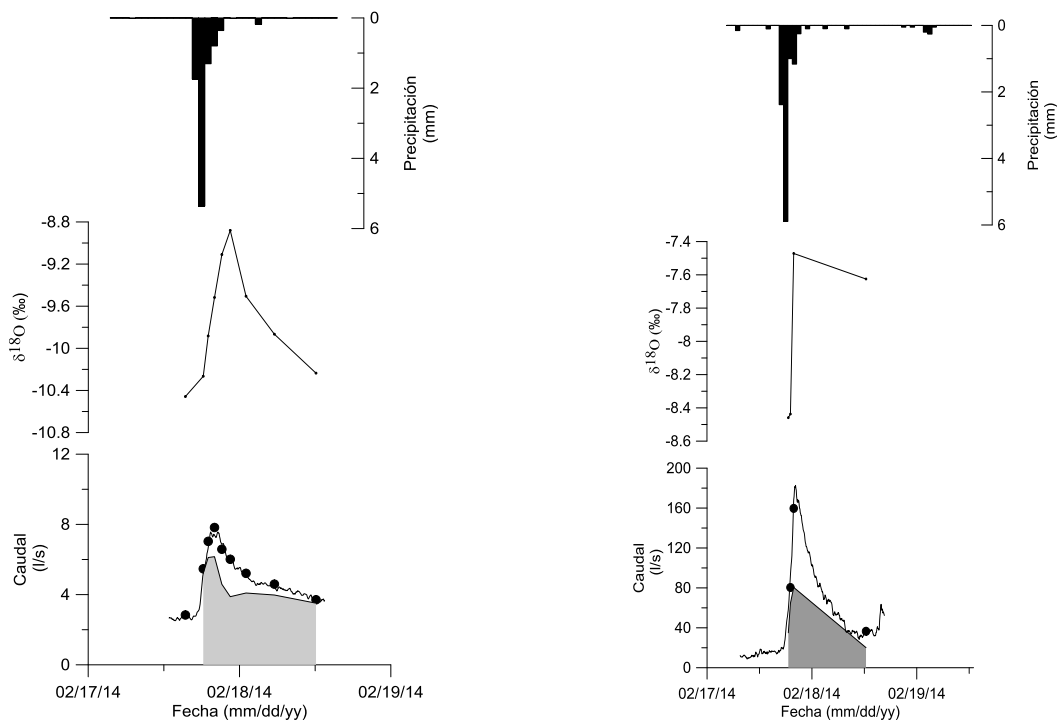


Figura 8: Evento 1: microcuenca 4 (Izquierda); microcuenca 7 (Derecha)



El primer evento, registrado del 17 a 18 de febrero de 2014 tuvo una duración de 5 horas, muestra una intensidad máxima entre 5.35 y 6.65 (mm/h) y un caudal máximo para la salida de la cuenca (M7) de 185 l/s. La Precipitación Antecedente de los 4 días anteriores al evento ( $P_{Ant_{4D}}$ ) se encuentra entre 10.3 – 14.6 (mm). Con estas características los porcentajes de pre-evento varían de un 52 a 82% (Tabla 3). Estos resultados podrían deberse a que la precipitación antecedente introdujo agua nueva al sistema mediante la infiltración de la lluvia en los suelos Andosoles y éstos, debido al potencial gravitacional que adquieren por su posición en el paisaje (ladera), llevan el agua subsuperficialmente hasta los Histosoles, los cuales se encargan de transportar el agua hasta los cauces, de acuerdo a lo reportado por Mosquera et al. (2012).

Este evento no se pudo analizar para todas las microcuencas, puesto que no se contó con los datos suficientes en cada una de ellas. Se analizaron las microcuencas M4, M5, M6 y M7; de éstas la mayor contribución de pre-evento se registra en M4 con un 82%, y en menor porcentaje en M7 con un 52% como puede observarse en la figura 8; esto, debido a que M7 presenta mayor intensidad de lluvia y precipitación antecedente (Tabla 2) respecto a M4, lo que indicaría que para M7 se infiltra mayor cantidad de agua de evento en los Andosoles, por el proceso descrito en el párrafo anterior. Esta adición de agua nueva se ve reflejada en un mayor porcentaje de agua de evento a la escorrentía en M7. Sin embargo, se debe considerar que este evento no cuenta con una buena resolución de muestras (con excepción de M4), lo que pudo alterar los resultados de los porcentajes de las contribuciones de agua de evento y pre-evento al caudal.

#### **4.1.1.2 Evento 2 (1 – 2 marzo de 2014)**

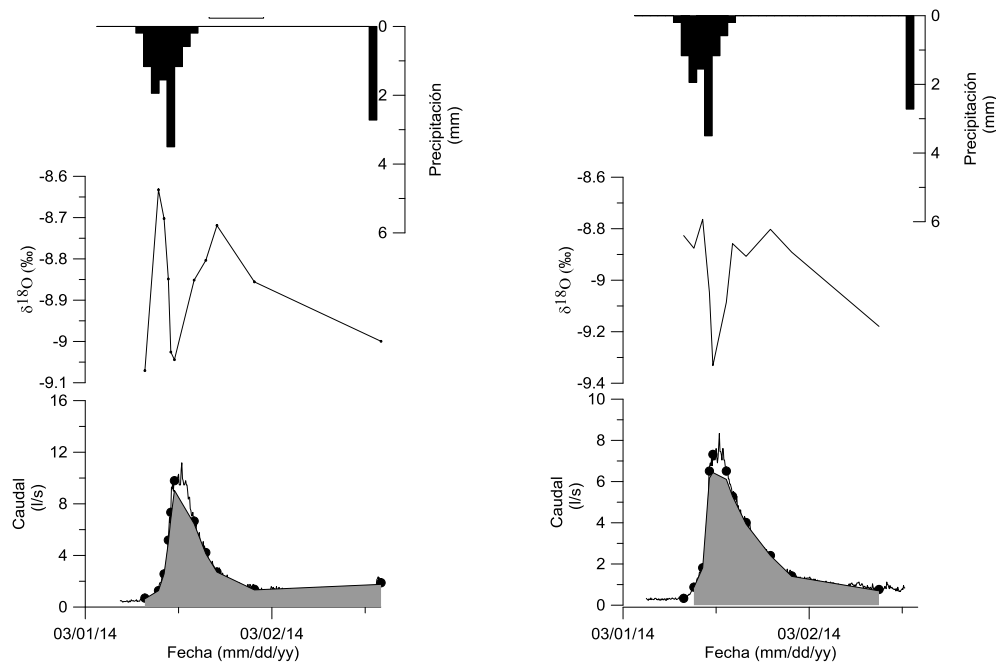


Figura 9. Evento 2: Microcuenca 1 (Izquierda); microcuenca 2 (Derecha)

El evento ocurrido entre el 1 y 2 de marzo de 2014, registra una intensidad media entre 1.08 y 1.28 mm/h, y una intensidad máxima que varía entre 2.7 y 3.4 mm/h. La duración del evento son 8 horas. La  $P_{Ant_{4D}}$  se encuentra entre 8.9 y 14.8 mm. El caudal máximo registrado para M7 es 767.4 l/s, siendo 4.8 veces mayor al caudal máximo registrado en el evento anterior.

En todos los casos el agua de pre-evento aporta en un 86% a 98% al caudal total (Tabla 3). M1, M2, M3 y M4, muestran aportes de agua de pre-evento similares del 96, 97, 98 y 96% respectivamente, debido a que presentan mayor porcentaje de Andosoles que el resto de las microcuencas monitoreadas. En la figura 9 se presentan de manera demostrativa las microcuencas M1 y M2.

Estas microcuencas concuerdan con la agrupación planteada por Mosquera et al. (2012) en función de la variabilidad temporal de la señal isotópica. Estos resultados evidencian que el agua de pre-evento, juega un rol clave en la generación de escorrentía durante eventos de precipitación ya que contribuye con un alto porcentaje de agua.

M5, es la que tiene menor porcentaje de agua de pre-evento (86%) esto debido a que recibe importantes contribuciones de agua desde una zona alta ubicada al oeste de la



cuenca, misma que contiene una gran cantidad de humedales que al encontrarse frecuentemente con altos contenidos de humedad favorece a que la lluvia que ingresa se mezcle rápidamente con el agua del suelo, por lo que existe una contribución importante de agua joven en esta microcuenca (Mosquera et al., 2012).

La separación del hidrograma muestra que la escorrentía durante eventos de lluvia está dominada por el agua de pre-evento, lo que concuerda con los resultados de varias investigaciones realizadas alrededor del mundo en cuencas pequeñas (menor a 10km<sup>2</sup>) durante eventos de lluvia (Klaus and McDonnell, 2013; Ogunka and Jenkins, 1993; Wels et al., 1990). Asimismo Sklash and Falvorden (1979) indican que para sistemas húmedos, como la cuenca del río Zhuruca, el pre-evento es la fracción dominante. Esto sugiere que el agua de evento no cae directamente en el cauce, sino más bien contribuye indirectamente a la crecida mediante el aumento de la descarga subsuperficial de agua de pre-evento a la corriente (Renshaw et al., 2003).

Sin embargo, autores como Genereux and Hooper (1998) y Klaus and McDonnell (2013) mencionan que la cantidad de pre-evento está dominado por diferentes factores como tamaño de la cuenca, paisaje, uso de suelo, estado inicial de la cuenca y características de evento, lo cual dificulta encontrar una buena correlación con otras cuencas hidrográficas, por lo que no se puede generalizar ya que se reportan diferentes respuestas para características similares.

#### 4.1.1.3 Evento 3 (9-10 marzo 2014)

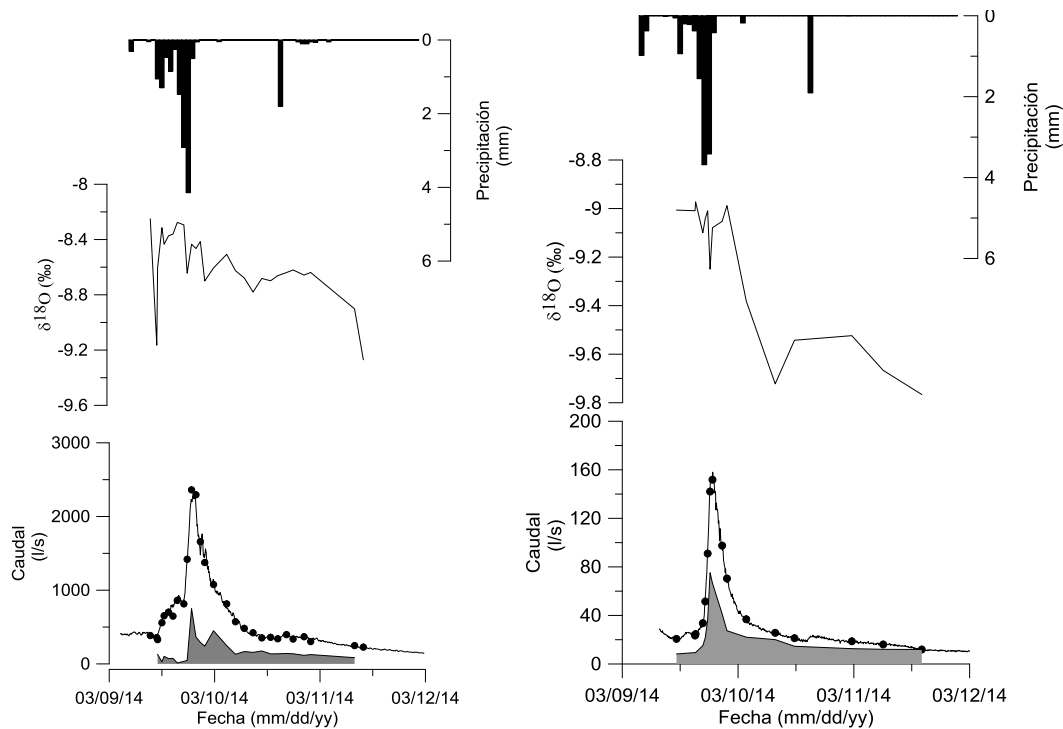


Figura 10: Evento 3: microcuenca 7 (Izquierda), microcuenca 4 (Derecha)

Para el evento 3, ocurrido durante el 9 – 10 marzo, se analizaron únicamente las microcuencas M4 y M7, por las razones descritas anteriormente.

Este evento es el más largo de los registrados para esta investigación, tiene una duración de 12 horas, el caudal máximo alcanzado en M7 es 2361,56 l/s, siendo 3 veces mayor al registrado durante el evento 2 y 14 veces mayor respecto al evento 1, aunque la precipitación acumulada se encuentra entre 11 – 13 mm/h, que es similar a los eventos 1 y 2, y con una Intensidad máxima entre 3 y 4 mm/h, muy parecida a la del evento 2. La  $P_{Ant_{4D}}$  se encuentra entre 20.7 - 26.8 mm, siendo el doble de la presentada por los demás eventos.

En este evento existe una gran diferencia entre los porcentajes de aporte de pre-evento. M4 contribuye con un 57% mientras que en su defecto M7 aporta únicamente con un 25% (Figura 10), es decir el agua de evento es predominante para esta microcuenca. En la tabla 2, se puede notar que M7 contiene mayor precipitación antecedente, lo que justifica



que el porcentaje de agua de evento sea mayor para esta microcuenca, debido al ingreso de agua nueva. Un comportamiento similar es observado en una microcuenca de bosque tropical nuboso, compuesto por Andosoles Umbricos en México, donde la fracción de agua de evento incrementa con la humedad antecedente (Muñoz and McDonnell, 2012).

Las características del evento mencionadas durante la descripción del evento sugieren que la cantidad registrada de precipitación antecedente genera una contribución alta de agua de evento, mediante un fenómeno hidrológico conocido como Flujo Pistón, donde el agua de precipitación infiltrada en los Andosoles, debido al empuje producido por el potencial gravitacional, desplaza el agua hacia los Histosoles y éstos últimos se encargan de alimentar a los cauces. Resultados similares fueron encontrados por Laudon and Slaymaker (1997) que indica que las altas contribuciones de agua de pre-evento a la escorrentía se debe a la presión que ejerce el agua de evento sobre el agua de pre-evento, cuando ingresa en el medio subsuperficial.

#### 4.1.1.4 Evento 4 (15-16 marzo 2014)

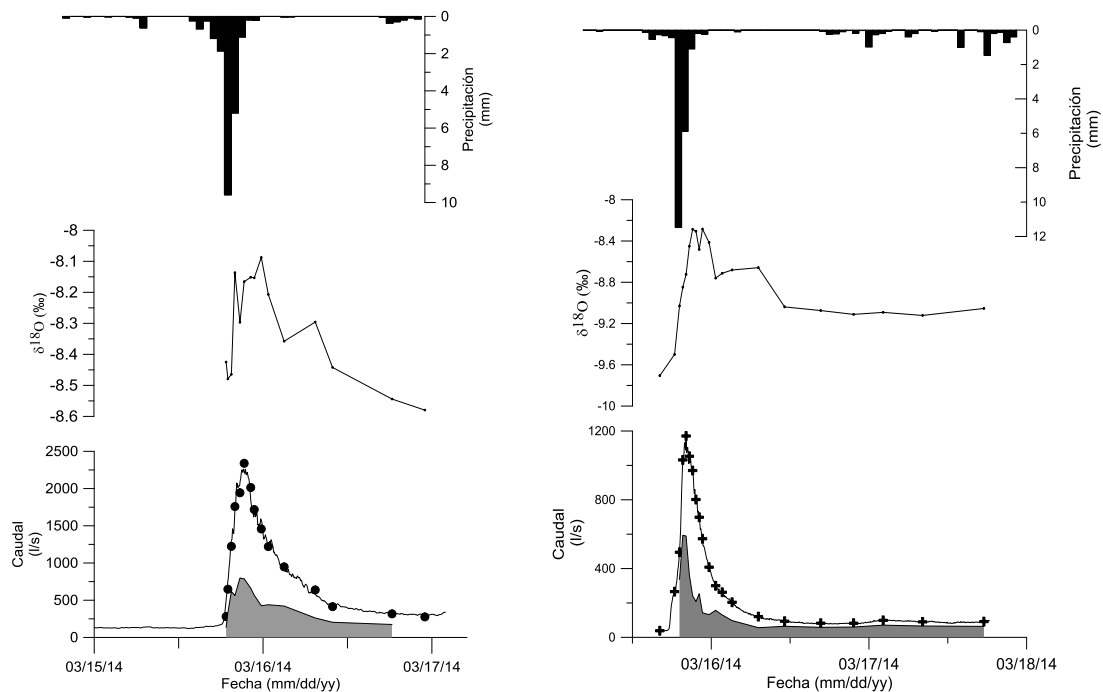


Figura 11: Evento 4: microcuenca 7 (Izquierda), microcuenca 6 (Derecha)

Durante este evento se toma muestras significativas únicamente para M5, M6 y M7. La  $P_{Ant_{4D}}$  se encuentra entre 6.5 y 8.8 mm, siendo la más baja de los eventos analizados. Aunque presenta dos veces más precipitación acumulada durante el evento, es decir este evento cuenta con mayor precipitación y una intensidad máxima 3 veces mayor al evento 2 y 3, y dos veces mayor al evento 1. El caudal máximo a la salida de la cuenca es 2339.2 l/s, muy parecido al del evento 3.

Estas características sugieren que debido a que la  $P_{Ant_{4D}}$  es baja, la entrada de agua nueva mediante infiltración en los Andosoles es menor que para los eventos anteriores, pero la alta intensidad registrada (Tabla 2) provoca un empuje desde los Andosoles hacia los Histosoles permitiendo al agua de pre-evento volver a incrementar su contribución.

Los porcentajes describen un 38, 52 y 40% de aporte de agua de pre-evento para M5, M6 y M7, respectivamente (Figura 11). Estos resultados demuestran que los procesos descritos en el párrafo anterior son válidos para este evento, pues se puede notar que el agua de pre-evento tiene mayor porcentaje que para el evento anterior (evento 3).



Respecto a la generación de escorrentía Mc.Cartney et al. (1998); Klaus and McDonnell, (2013) y Soulsby et al. (1998), indican que ésta se ve dominada por el pre-evento, pero que cuando la capacidad de almacenamiento del suelo se ve excedida, el agua de evento empieza a dominar la escorrentía.

Tabla 3 Caracterización de eventos: Agua de pre-evento – evento / Incertidumbre.

Fp<sup>a</sup> Incertidumbre calculada para el porcentaje de agua de pre-evento

La tabla 3 muestra la concentración isotópica tanto del pre-evento como del evento, utilizada para la separación del hidrograma. Se observa los porcentajes de agua de pre-evento y evento calculado mediante el modelo de mezcla. Asimismo se muestran los resultados del análisis de incertidumbre (Incertidumbre media y la calculada para el porcentaje de agua de pre-evento)





Posterior a la separación del hidrograma, se procedió a calcular la incertidumbre propuesta por Genereux (1998) para un 95% de confianza. Mediante este análisis podemos entender que tan exacto son los resultados obtenidos de la separación. Los resultados del cálculo de la incertidumbre (Tabla 3) para los porcentajes de pre-evento determinados para el evento 1, 2 y 3 se encuentran en un rango de 4 a 37%, a excepción de M5 del evento 1 y M5, M6, M7 del evento 4 que muestran un 85, 132, 88 y 107 % de incertidumbre, lo que indicaría que porcentajes de pre-evento son poco exactos, porque existe una banda de incertidumbre muy amplia. Esto debido a que las muestras para el agua de evento no se pudieron tomar durante el mismo día en los tres sitios de recolección de lluvia (ZLA, ZLB, ZLM) por lo que la variabilidad isotópica en las muestras generó mayor desviación estándar aumentando así la incertidumbre de la separación del hidrograma (Genereux, 1998) (Uhlenbrook and Hoeg, 2003). Esto se pudo evidenciar ya que el componente que más aporta a la incertidumbre es el agua de evento (alrededor de 90% para la mayoría de los casos).

En este sentido los resultados del porcentaje de aporte que presentan incertidumbres altas deben interpretarse con cuidado, ya que, aunque no indican error, muestran una amplia inexactitud. Las diferencias de incertidumbre que se presentan entre eventos se deben a que la respuesta de cada subcuenca es diferente para cada evento de lluvia, es decir la incertidumbre es específica para cada evento (Joerin, 2002).

#### **4.1.2 Comportamiento de la fracción de pre-evento, a lo largo de los eventos monitoreados:**

Se observa que la humedad antecedente, y la intensidad máxima juegan un rol importante en el porcentaje de aporte de agua de pre-evento, por ejemplo para el caso de M7:

Para el evento 1, se cuenta con una  $P_{Ant_{4D}}$  de 14,66 mm y una  $I_{max}$  de 5,8 mm/h; para el evento 2 presenta 11,74 mm de  $P_{Ant_{4D}}$  y 3,15 mm/h de  $I_{max}$ . El evento 3 muestra una  $P_{Ant_{4D}}$  de 26,89 mm y 4,14 mm/h de Intensidad. El evento 4 registra 7,68 mm y 9,6 mm/h de  $P_{Ant_{4D}}$  e Intensidad, respectivamente.

Del párrafo anterior se observa que el evento 1, tiene mayor  $P_{Ant_{4D}}$  respecto al evento 2, por lo tanto tendrá mayor entrada de agua nueva, lo que explica que el porcentaje de pre-evento sea menor en relación al evento 2 (Figura 12a y 12b). En el caso del evento 3, la  $P_{Ant_{4D}}$  es dos veces mayor que el evento 1, por lo que se puede prever un mayor



porcentaje de contribución de agua nueva (Figura 12c). Por otro lado, el evento 4 presenta menor  $P_{Ant_{4D}}$  respecto a los demás eventos, con la intensidad más alta registrada; lo que contribuye a incrementar el porcentaje de pre-evento, respecto al evento anterior (Figura 12d).

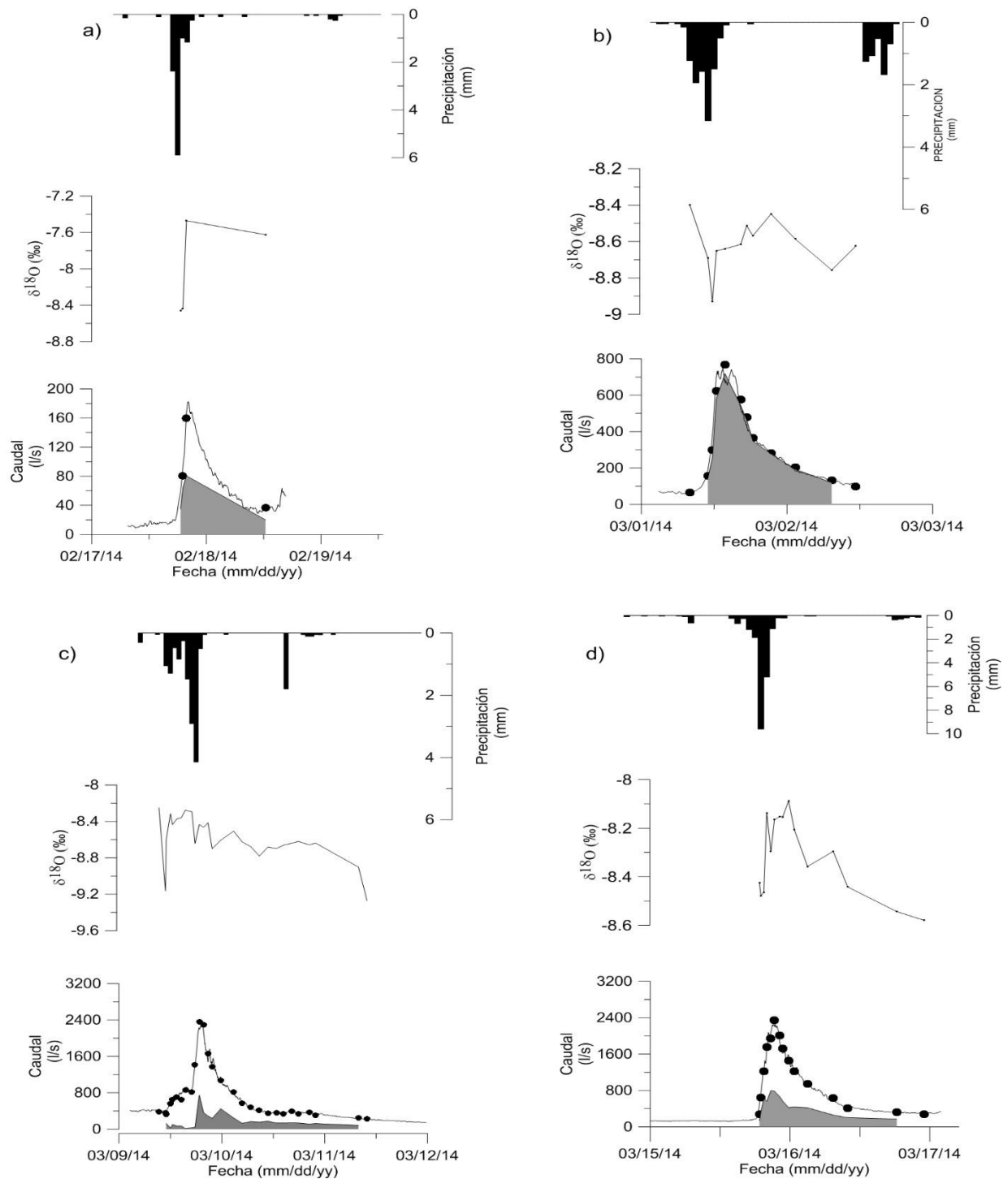


Figura 12. Comportamiento de M7, durante cada uno de los eventos registrados para el año 2014. a) Evento 1; b) Evento 2; c) Evento 3; d) Evento 4.



Como parte de un análisis complementario, se realizó la separación del hidrograma monitoreado el 17 – 18 de abril de 2013; dando como resultados que el porcentaje de pre-evento se encontraba entre un 59 – 86% para los vertederos muestreados (M1, M2, M4, M6, M7). Estos resultados pueden deberse a que en días anteriores a este evento, mediante el sensor de presión que se encuentra instalado en cada vertedero se registraron dos eventos de lluvia de menor precipitación, que aunque no fueron monitoreados incorporaron agua nueva al sistema, de manera que los porcentajes un tanto bajos sería el resultado de ese nuevo ingreso de agua. Para este evento no se encontró dependencia con ningún parámetro propuesto, por lo que no se puede hacer un análisis completo.

Comparando los sitios de monitoreo, se puede notar que el agua de pre-evento es la que más contribuye al caudal. Lo que concuerda con la afirmación de Buttle (1994) quien realizó un sinopsis de las contribuciones de pre-evento en relación al uso de suelo y concluye que para cuencas forestadas el porcentaje de pre-evento es mayor que para cuencas urbanas(Buttle, 1994), otros estudios muestran tendencias similares (Ladouche et al., 2001; Klaus and McDonnell, 2013).

#### **4.2 Objetivo 3: Construir un Modelo Conceptual de los procesos que controlan el porcentaje de aporte de agua de pre-evento a la escorrentía.**

Para cumplir con este objetivo se analizó el evento 2 ya que en este evento se cuenta con información suficiente en todas las microcuencas.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) muestra una dependencia del porcentaje de pre-evento con los parámetro descritos en la tabla 4. Los valores en negrita indican su significancia estadística ( $p < 0,05$ ). Estos resultados indican, que estos parámetros influyen en la respuesta de las microcuencas a los eventos de precipitación.

*Tabla 4: Resultados de las correlaciones del porcentaje de pre-evento con los diferentes parámetros.*

Parámetros	$R^2$
%Andosoles	<b>0,78</b>
%Histosoles	<b>0,79</b>
P Ant <sub>4D</sub>	<b>0,75</b>
I max	<b>0,75</b>

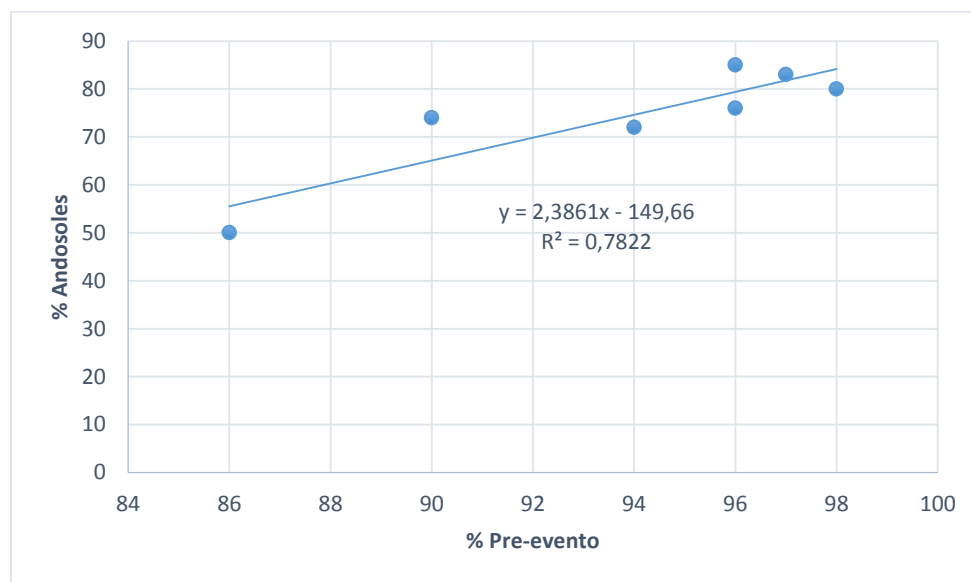
P Acum<sub>DE</sub>      **0,67**

---

P Ant<sub>4D</sub> = Precipitación antecedente 4 días anteriores al evento.

P Acum<sub>DE</sub> = Precipitación acumulada durante el evento.

I max = Intensidad Máxima



*Figura 13. Correlación Andosoles vs Pre-evento*

Borja, et al.(2008) describe las propiedades físico-químicas para los páramos de Quimsacocha, que les confiere las importantes características hidrológicas de los suelos de páramos como alta capacidad de retención y regulación hídrica (Borja et al., 2008; Buytaert, 2004; 2006a; Crespo et al., 2011; Iñiguez et al., 2008) por lo que se puede prever que almacenen gran cantidad de agua de pre-evento. En este sentido, Genereux and Hooper (1998) mencionan que “la cantidad de precipitación que ingresa durante un evento es relativamente pequeña en comparación con la capacidad de almacenamiento de agua de pre-evento de los suelos”. Marc et al. (2001) en un estudio realizado en una cuenca pequeña en el Mediterráneo indica que el gran porcentaje de pre-evento se debe a la alta permeabilidad de los suelos, característica compartida por los suelos que se encuentran en la cuenca del río Zhurucay.

En concordancia a esto en nuestro estudio se observa en la Fig. 13 que existe una dependencia directamente proporcional del porcentaje de pre-evento con el porcentaje de Andosoles. Esta relación permite inferir que durante un evento de precipitación al existir mayor porcentaje de Andosoles se incrementa el empuje de agua (por la infiltración de la lluvia) a los Histosoles para que puedan alimentar a los caudales; lo que se debe a que los Andosoles son los encargados de la dinámica hidrológica de la cuenca principalmente por encontrarse ubicados en laderas (Mosquera et al., 2012; Rivera, 2014). Referente a esto McGlynn (2003); Sidle et al. (2001) y Wels et al. (1991) coinciden en que las zonas de ladera contribuyen a desplazar y/o a mezclarse con el agua en el fondo del valle.

En el caso de los Histosoles se puede observar que el porcentaje de agua de pre-evento tiende a incrementar a medida que el porcentaje de Histosoles disminuye (Figura 14), esto debido a que el agua de pre-evento muestra una correlación positiva para los Andosoles y como consecuencia se muestra un comportamiento inverso para los Histosoles que prácticamente son su complementario. Esto sugiere que la descarga de agua de pre-evento a la corriente durante una tormenta puede ser controlado por los procesos cinemáticos de flujo dentro de los suelos de la cuenca (Crespo et al., 2011; Renshaw et al., 2003) por lo que no se debe restar importancia a la interacción que ocurre entre estos suelos y a los Histosoles como encargados de llevar el agua a los cauces.

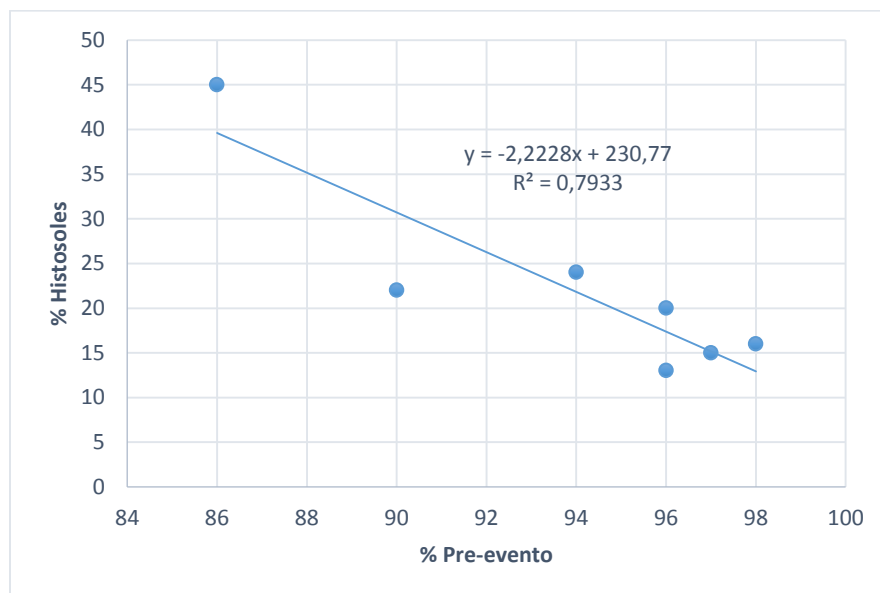


Figura 14. Histosoles vs Pre-evento

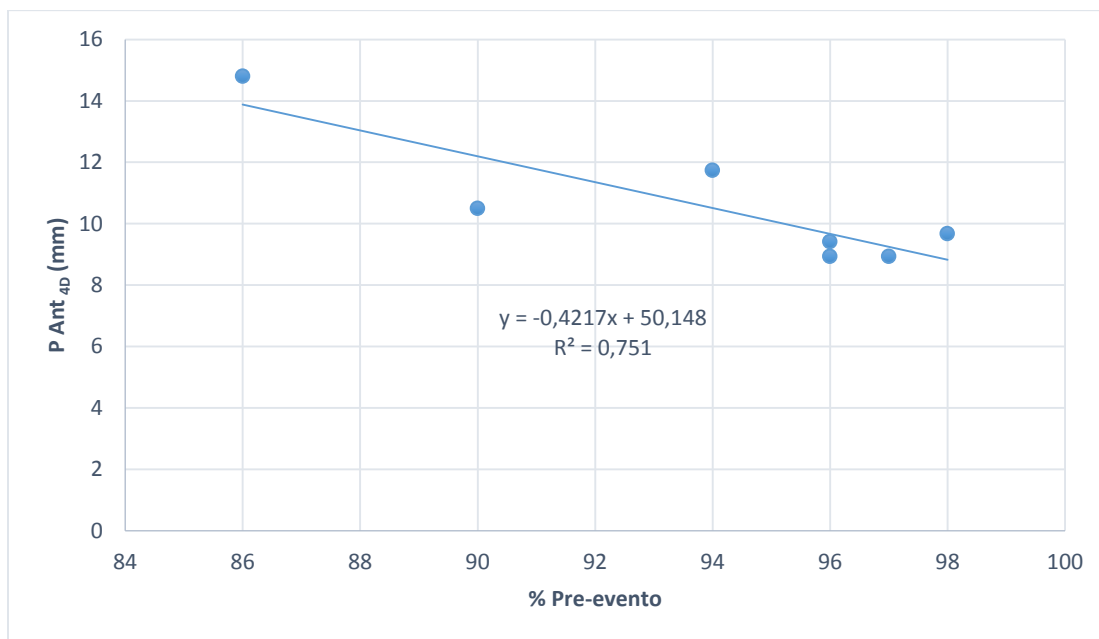


Figura 15. Precipitación Ant<sub>4D</sub> vs Pre-evento

En la Figura 15, se considera la precipitación antecedente como indicador de humedad existente en el suelo 4 días anteriores al evento. Se observa que existe una relación inversamente proporcional, es decir si la humedad antecedente disminuye el porcentaje de pre-evento aumenta (Ogunka and Jenkins, 1993), esto se explica debido a que la P Ant<sub>4D</sub> representa una entrada de agua nueva o agua de evento, que mediante la infiltración en los Andosoles incrementa la cantidad de agua de evento y éstos a su vez mediante el potencial gravitacional van desplazando el agua de pre-evento de los Histosoles a los cauces. Esto sugiere que el agua de evento va ganando presencia debido a la saturación del suelo que generalmente se inicia por la existencia de eventos consecutivos (Klaus and McDonnell, 2013; Mc.Cartney and Neal, 1998; Soulsby et al., 1998). Asimismo en las investigaciones en donde se busca realizar modelos que ayuden a predecir los procesos hidrológicos dentro de una cuenca, la humedad antecedente como parámetro es esencial, debido a que de ella dependen los procesos que se lleven a cabo en la cuenca (Bronstert et al., 1998; Burse, 2008; McGlynn, 2003; Uhlenbrook et al., 2005).

Un parámetro bastante relacionado a la humedad antecedente es la intensidad de precipitación, esto se debe a que la acción de la intensidad depende del contenido de humedad ya que si los poros están llenos de agua, la infiltración será escasa o nula. La Figura 16 indica que la Intensidad máxima de la lluvia, puede provocar un incremento de porcentaje de pre-evento en la escorrentía, ya que favorecerá la velocidad de infiltración del agua, especialmente en la zona no saturada (Tarboton, 2003) y provocará que el agua almacenada anteriormente se desplace hasta los cauces. Resultados similares fueron encontrados por Howson (2012) en la cuenca Blackwater que por las labores de agricultura cuenta con drenaje artificial; Howson compara dos eventos registrados, en donde el evento con mayor intensidad de lluvia presenta mayor porcentaje de pre-evento.

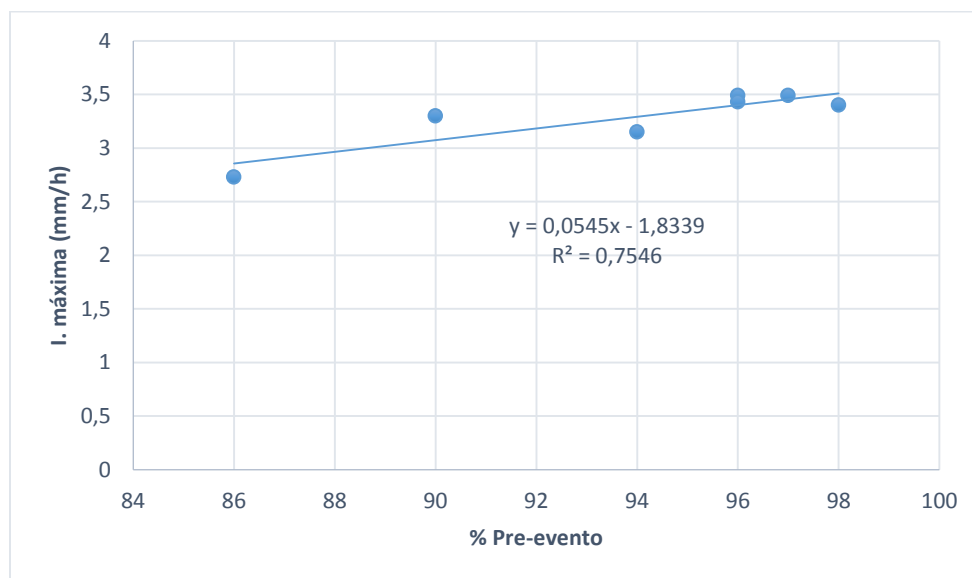


Figura 16. Intensidad máxima vs Pre-evento

En cuanto a la correlación entre precipitación acumulada y el porcentaje de pre-evento ( $r^2=0,67$ ) (Tabla 4), esta dependencia no se puede considerar real debido a que la correlación fue realizada para un mismo evento, por lo que la variación entre subcuencas es mínima (tabla 2). Aunque algunas investigaciones demuestran que los eventos con mayor cantidad de precipitación tienen mayores porcentajes de agua de evento (Litt et al.,





2015) y que períodos sin lluvia influyen en el porcentaje de agua de pre-evento en un hidrograma (Matsubayashi et al., 1993).

Del análisis realizado durante la investigación se pueden deducir los siguientes procesos hidrológicos:

La  $P_{Ant_{4D}}$  juega un papel clave en la entrega de agua a la escorrentía (Buytaert and Beven, 2011), ya que si la  $P_{Ant_{4D}}$  es alta, indica un ingreso de agua nueva por lo que el agua que es trasladada subsuperficialmente es el resultado de una mezcla entre estas dos fuentes. Los porcentajes de agua de evento y pre-evento dependerán de la cantidad de precipitación antecedente registrada. Asimismo la intensidad también es un parámetro importante pero que depende de la humedad antecedente, pues si ésta es alta y cercana a la saturación, la intensidad no influye en gran medida en la infiltración debido a que los poros del suelo ya están llenos de agua. En estos casos se podría presenciar flujo superficial por exceso de saturación y contribuir con mayor cantidad de agua de evento a la escorrentía, por lo que generalmente el agua de pre evento muestra una tendencia a decrecer para los eventos posteriores al inicial dentro de una serie ( Klaus and McDonnell, 2013; Marc et al., 2001; Mc.Cartney and Neal, 1998; Soulsby et al., 1998; Wels et al., 1991).

Los resultados sugieren que durante un evento de precipitación, la lluvia no influye directamente en los caudales sino que se infiltra (Wels et al., 1990, 1991) en los Andosoles que por encontrarse en zonas de ladera, mediante el potencial gravitacional y el fenómeno de flujo pistón (Crespo et al., 2011a; Renshaw et al., 2003), desplaza el agua que se encuentra almacenada en los Andosoles para recargar a los Histosoles y que éstos a su vez alimentan a los caudales; la fracción de agua de pre-evento que alimenta a los caudales dependerá de la humedad antecedente en los suelos y también de la intensidad de la lluvia aunque en menor medida. Si al inicio de un evento la humedad antecedente es muy alta, el porcentaje de agua de pre-evento no será tan significativo debido a la entrada de agua nueva recientemente, representada por el color azul en la Figura 17a, de manera que el flujo subsuperficial contendrá una alta cantidad de agua de evento; mientras que por otro lado si la humedad antecedente es baja no se cuenta con una entrada significativa de agua de evento como se observa en la Figura 17b (color azul). De manera que el agua que se infiltra va a desplazar al agua de pre-evento (color

gris) a los caudales, constituyéndose así como la principal fuente que alimenta a la escorrentía.

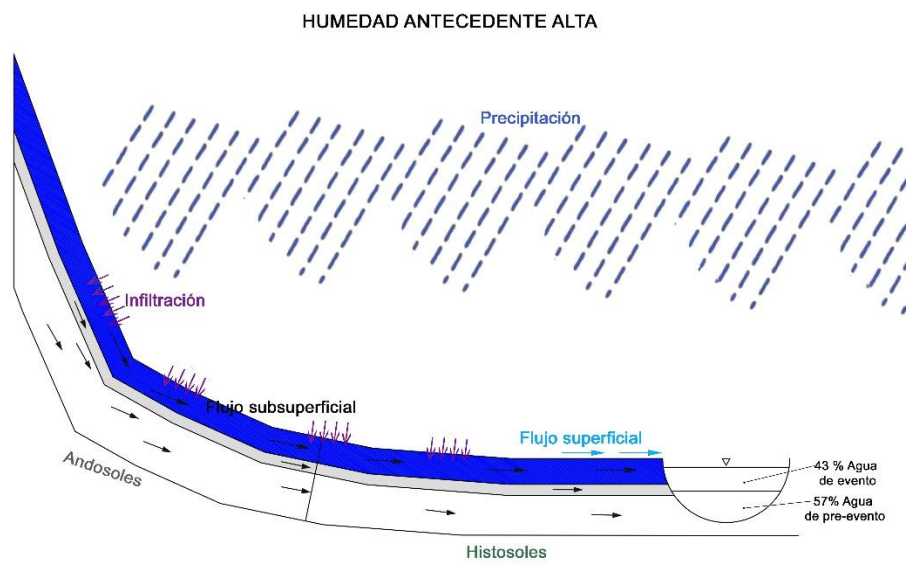
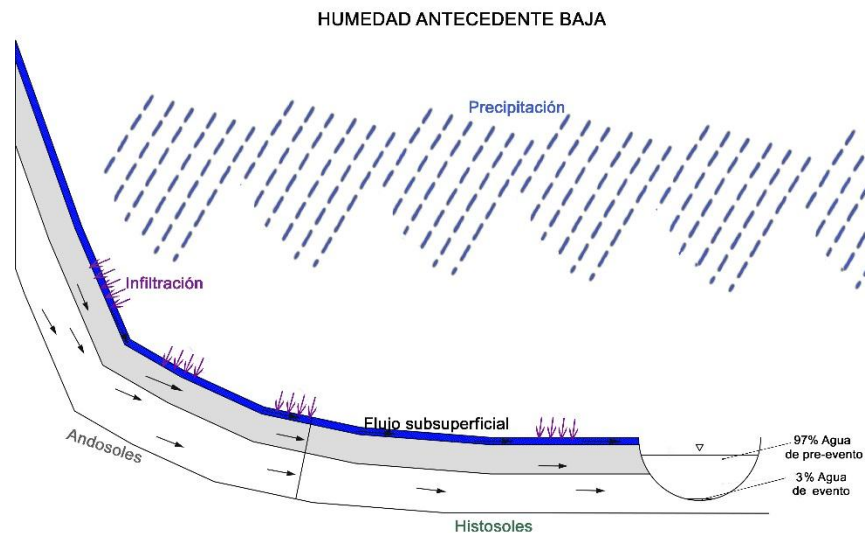


Figura 17 a. Precipitación Antecedente Alta



*Figura 17b. Precipitación Antecedente baja*

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES:

A partir del modelo conceptual, se concluye que:

- El aporte de agua a la escorrentía depende del porcentaje de los suelos, precipitación antecedente y la intensidad de la lluvia.
- La lluvia no influye directamente en los caudales, sino que recarga a los Andosoles, que debido al potencial gravitacional que adquieren por su posición en el paisaje (laderas), entregan el agua a los Histosoles, para que éstos, recarguen el flujo en los cauces.
- Los suelos juegan un papel muy importante que claramente influye en el porcentaje de pre-evento, por sus propiedades para retener y almacenar agua. Especialmente se puede notar la importancia de las zonas de ladera (Andosoles) para transmitir el agua.
- La fracción predominante en el hidrograma es el agua de pre-evento. Sin embargo, se comporta de diferentes maneras debido a la humedad antecedente y a la



intensidad de la lluvia. Se observa un aumento en la proporción de agua de evento al incrementar la humedad antecedente; mientras que con la intensidad aumenta la fracción de pre-evento, siempre y cuando no existan condiciones de saturación, caso contrario la infiltración se anula y da lugar a flujo superficial que aporta agua de evento mayoritariamente.

- En el análisis de incertidumbre, se observa que, en la mayoría de los casos, el evento es el que contribuye casi en su totalidad a la incertidumbre, esto se puede mejorar aumentando la resolución temporal de muestras para disminuir la desviación estándar.
- El proceso lluvia-escorrentía está gobernado por el fenómeno de flujo pistón, es decir, que el agua que ingresa empuja al agua almacenada anteriormente, esto se pudo comprobar con los resultados obtenidos de la separación del hidrograma en agua de evento y pre-evento.

#### **CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES:**

- Considerando que la señal isotópica del evento contribuye en mayor medida a la incertidumbre, se recomienda aumentar el número de muestras de agua de lluvia en futuros estudios.
- Se sugiere probar nuevos métodos para el cálculo de la incertidumbre, que consideren más variables, con la finalidad de disminuir la incertidumbre para los cálculos que se realicen.
- Aclarar los procesos lluvia-escorrentía, mediante investigaciones para este tipo de ecosistemas que todavía no son entendidos completamente, profundizar en el papel de la zona de laderas y en su función para desplazar agua.



## **BIBLIOGRAFÍA:**

- Albuja, C., Tenelanda, D., 2014. Desarrollo de un modelo conceptual lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhuruca. Universidad de Cuenca.
- Aparicio, F., 1992. Fundamentos de Hidrología de superficie. Mexico.
- Beighley, R.E., Dunne, T., Melack, J.M., 2005. Understanding and modeling basin hydrology : interpreting the hydrogeological signature. *Hydrol. Process.* 1353, 1333–1353. doi:10.1002/hyp.5567
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., Cisneros, F., 2008. Características Físico Químicas de Histosoles y Andosoles de los Páramos de Quimsacocha, Ecuador. XI Congr. Ecuatoriano la Cienc. del Suelo 29–31.
- Bronstert, A., Glüsing, B., Plate, E., 1998. Physically-based hydrological modelling on the hillslope and micro-catchment scale : examples of capabilities and limitations. *Hydrol. Water Resour. Ecol. Headwaters* 207–215.
- Burse, K.G., 2008. Quantifying hydrological fluxes of contributing hillslopes in the Weatherley Catchment , NE Cape , South Africa. University of KwaZulu-Natal.
- Buttle, J., 1999. Fundamentals of small catchments Hidrology, in: Kendall, C., McDonnell, J.J. (Eds.), *Isotope Tracers in Catchment Hidrology*. Elsevier Science, p. 870.



- Buttle, J.M., 1994. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Prog. Phys. Geogr.* 18, 16–41.  
doi:10.1177/030913339401800102
- Buytaert, W., 2004. The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. Ph.D. thesis. Katholieke Universiteit Leuven.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., 2006a. Hidrología del Páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. 1–26.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., Hofstede, R., 2006b. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Rev.* 79, 53–72. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.002
- Buytaert, W., Deckers, J., Wyseure, G., 2007a. Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena* 70, 143–154. doi:10.1016/j.catena.2006.08.003
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., Bièvre, B. De, Wyseure, G., Deckers, J., 2006b. Analysis of the water balance of small páramo catchments in south. *Environmental role Wetl. Headwaters* 271–281.
- Buytaert, W., Iñiguez, V., De Bièvre, B., 2007b. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *For. Ecol. Manage.* 251, 22–30.  
doi:10.1016/j.foreco.2007.06.035
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., Deckers, J., 2005. The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrol. Process.* 19, 3985–3997. doi:10.1002/hyp.5867
- Chow, V. Te, Maidment, D.R., Mays, L., 2000. *Hidrologia Aplicada*. McGraw Hill.
- Crespo, P., 2012. Analysis of the rainfall runoff processes of Andean ecosystems in Southern Ecuador : using hydrometric, tracers and modeling approaches.
- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., B, V.K., Frede, H.-G., Breuer, L., 2011a. Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrol. Process.* 15. doi:10.1002/hyp
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., 2014. Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos, in: Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L. (Eds.), *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos*. CONDESAN, pp. 288 – 304.



- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bücken, A., Breuer, L., Frede, H.-G., Ramírez, M., 2011b. Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *J. Hydrol.* 407, 164–174. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.07.021
- Francou, B., Pouyaud, B., 2004. Métodos de Observación de Glaciares en los Andes Tropicales, Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1. IRD. GREAT-ICE Y GLACIOCLIM.
- Fisure, R., 2009. Meteorología y Oceanografía. Colección ITSASO, Vitoria-Gasteiz.
- Genereux, D., 1998. Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separations. *Water Resour. Res.* 34, 915.
- Giraldo, L., 2002. Memorias: Hidrología Forestal ( Influencia de los bosques ). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Goller, R., 2004. Biogeochemical Consequences of Hydrologic Conditions in a Tropical Montane Rain Forest in Ecuador. Bayreuth.
- Helsel, D.R., Hirsch, R.M., 2002. Statistical Methods in Water Resources. doi:10.2307/1269385
- Hofstede, R., Segarra, P., Vásconez, P.M., 2003. Paramos del mundo. Proyecto atlas mundial de los páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia, Quito.
- Howson, T.J., 2012. Hydrograph Separation Using Stable Isotopes : An Assessment of Flow Contributions in the Blackwater Catchment.
- Iñiguez, V., Borja, P., Crespo, P., Cisneros, F., 2008. Importancia de la Hidropedología en la determinación de Procesos Hidrológicos a escala de ladera en zonas de Páramo, in: XI Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo. Quito, pp. 29–31.
- Joerin, C., Beven, K.J., Iorgulescu, I., Musy, A., 2002. Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models. *J. Hydrol.* 255, 90–106.
- Kendall, C., Caldwell, E., 1999. Fundamentals of isotope geochemistry, in: Isotope Tracers in Catchment Hydrology.
- Kendall, C., McDonnell, J.J., Gu, W., 2001. A look inside ?black box? hydrograph separation models: a study at the Hydrohill catchment. *Hydrol. Process.* 15, 1877–1902. doi:10.1002/hyp.245
- Klaus, J., McDonnell, J.J., 2013. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *J. Hydrol.* 505, 47–64. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.09.006
- Kline, S.J., 1985. The purposes of Uncertainty Analysis. *J. Fluids Eng.*



- Ladouche, B., Probst, a., Viville, D., Idir, S., Baqué, D., Loubet, M., Probst, J.-L., Bariac, T., 2001. Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *J. Hydrol.* 242, 255–274. doi:10.1016/S0022-1694(00)00391-7
- Lazo, P., Mosquera, G., 2012. Fraccionamiento y concentración de Deuterio ( $\delta$  H) y oxígeno ( $\delta$  18 O) en diferentes fuentes de agua que aportan a la cuenca del río Zhurucay. *Zhurnal Eksp. i Teor. Fiz. Universidad de Cuenca.*
- Litt, G.F., Gardner, C.B., Ogden, F.L., Lyons, W.B., 2015. Hydrologic tracers and thresholds: a comparison of geochemical techniques for event-based stream hydrograph separation and flowpath interpretation across multiple land covers in the Panama Canal Watershed. *Appl. Geochemistry.* doi:10.1016/j.apgeochem.2015.04.003
- Llambí, L.D., Soto-w, A., Céleri, R., Bievre, B. De, Ochoa, B., Borja, P., 2012. Ecología, hidrología y suelos de páramos, in: *Proyecto Páramo Andino. CONDESAN*, p. 284.
- Lorentz, S. a, Bursey, K., Idowu, O., Pretorius, C., Ngeleka, K., Hydrology, E., 2008. *Definition and Upscaling of Key Hydrological.* Pietermaritzburg.
- Marc, V., Didon-Lescot, J.-F., Michael, C., 2001. Investigation of the hydrological processes using chemical and isotopic tracers in a small Mediterranean forested catchment during autumn recharge. *J. Hydrol.* 247, 215–229. doi:10.1016/S0022-1694(01)00386-9
- Matsubayashi, U., Velasquez, G.T., Takagi, F., 1993. Hydrograph separation and flow analysis by specific electrical conductance of water. *J. Hydrol.* 152, 179–199. doi:10.1016/0022-1694(93)90145-Y
- Mcdiffett, W.F., Beidler, A.W., Dominick, T.F., Mccrea, K.D., 1989. Nutrient concentration-stream discharge relationships during storm events in a first-order stream 97–102.
- McGlynn, B.L., 2003. Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff. *Water Resour. Res.* 39, 20. doi:10.1029/2003WR002091
- Mook, W.G., Custodio, E., 2002. *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico : principios y aplicaciones, SERBIULA (sistema Librum 2.0).* Madrid.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., Crespo, P., 2012. Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo : mediante el uso de los isótopos estables deuterio ( $\delta$  2 H ) y oxígeno- 18 ( $\delta$  18 O ). *Maskana* 3, 87–105.





- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., Crespo, P., Célleri, R., 2013. Delineation of the streamflow contributing components in a wet Andean páramo catchment combining hydrometric and isotopic data.
- Muñoz, L.E., McDonnell, J.J., 2012. Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resour. Res.* 48, 1–17. doi:10.1029/2011WR011316
- Ogunka, O.O., Jenkins, A., 1993. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. *J. Hydrol.* 142, 71–88.
- Oñate, F., 2009. Hidrología (apuntes de clase). Loja.
- Padrón, R., 2013. Análisis de la estructura de lluvia del páramo. Universidad de Cuenca.
- Pipes, R., Holstein, J., Aguirre, M., 2014. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. homeworkmarket.com.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., Célleri, R., 2012. Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo: Páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Soc. Colomb. la Cienc. del Suelo* 42, 138–153.
- Quintero, M., Célleri, R., Navarrete, F., Blanco, J., Garzón, A., 2010. Servicios ambientales hidrológicos en la región andina. CONDESAN.
- Renshaw, C.E., Feng, X., Sinclair, K.J., Dums, R.H., 2003. The use of stream flow routing for direct channel precipitation with isotopically-based hydrograph separations: the role of new water in stormflow generation. *J. Hydrol.* 273, 205–216. doi:10.1016/S0022-1694(02)00392-X
- Rice, K.C., Hornberger, G.M., 1998. Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment. *Water Resour. Res.* 34, 1755–1766.
- Richey, D.G., McDonnell, J.J., Erbe, M.W., Hurd, T.M., 1998. Hydrograph separations based on chemical and isotopic concentrations: a critical appraisal of published studies from New Zealand, North America and Europe. *J. Hydrol.* 37, 95–111.
- Rivera, S., 2014. “Análisis de la Dinámica Hidrológica en Cuencas de Páramo Húmedo: Estudio de Caso a Escala de Ladera.” Universidad de Cuenca.
- Sidle, R.C., Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Laursen, K., 2001. A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: Evidence of self-organization. *Hydrol. Process.* 15, 1675–1692. doi:10.1002/hyp.233



- Sklash, M.G., Farvolden, R.N., 1979. The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.* 43, 45–65.
- Tarboton, D.G., 2003. Rainfall- Runoff processes. Utah.
- Uhlenbrook, S., Hoeg, S., 2003. Quantifying uncertainties in tracer-based hydrograph separations: a case study for two-, three- and five-component hydrograph separations in a mountainous catchment. *Hydrol. Process.* 17, 431–453. doi:10.1002/hyp.1134
- Uhlenbrook, S., Wenninger, J., Lorentz, S., 2005. What happens after the catchment caught the storm? Hydrological processes at the small, semi-arid Weatherley catchment, South-Africa. *Adv. Geosci.* 2, 237–241. doi:10.5194/adgeo-2-237-2005
- Vásconez, P.M., Hofstede, R., 2006. Los páramos ecuatorianos.
- Wels, C., Cornett, R.J., Lazerte, B.D., 1990. Groundwater and Wetland Contributions to Stream Acidification: An Isotopic Analysis. *Water Resour. Res.* 26, 2993–3003.
- Wels, C., Taylor, C.H., Cornett, R.J., Lazerte, B.D., 1991. Streamflow generation in a headwater basin on the precambrian shield. *Hydrol. Process.* 5, 185–199. doi:10.1002/hyp.3360050206

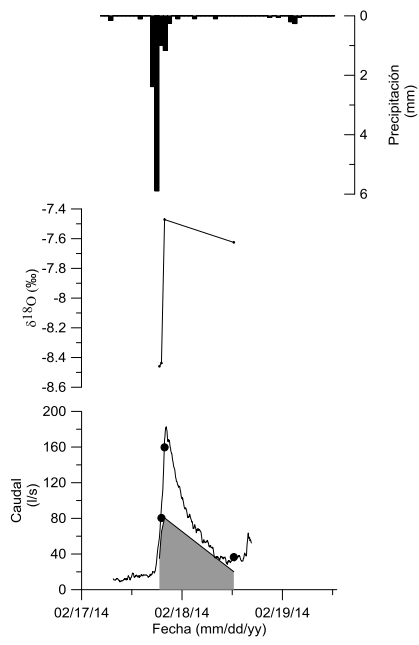
## **ANEXOS:**

### **FIGURAS DE SEPARACIÓN DE HIDROGRAMA**

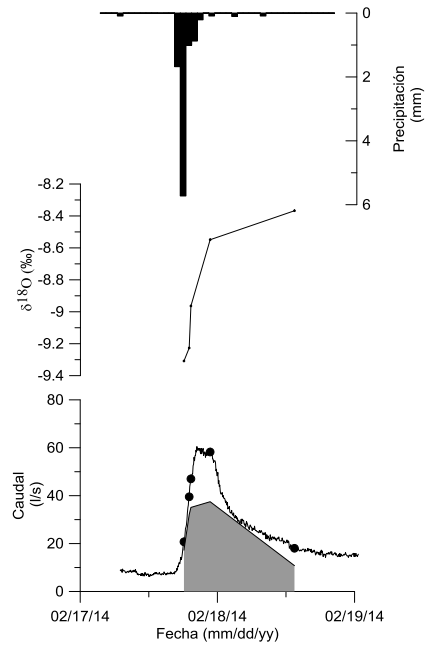
#### **EVENTO 1: 17 – 19 FEBRERO 2014**

Microcuenca 7

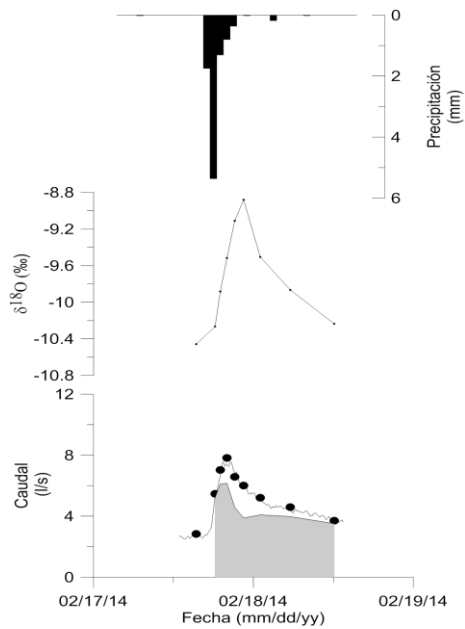
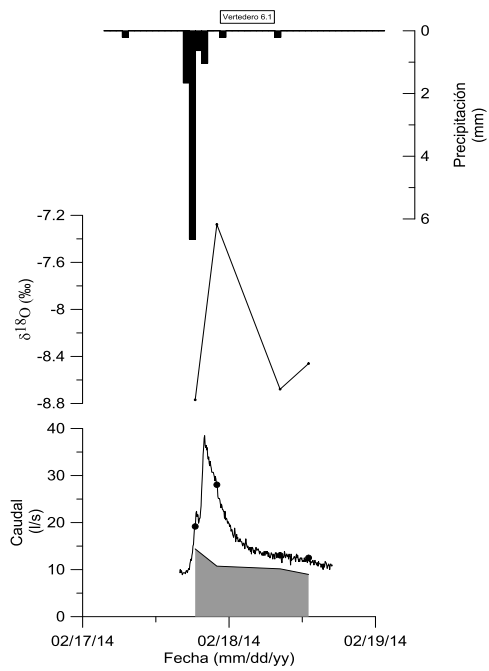
Microcuenca 6



Microcuenca 5

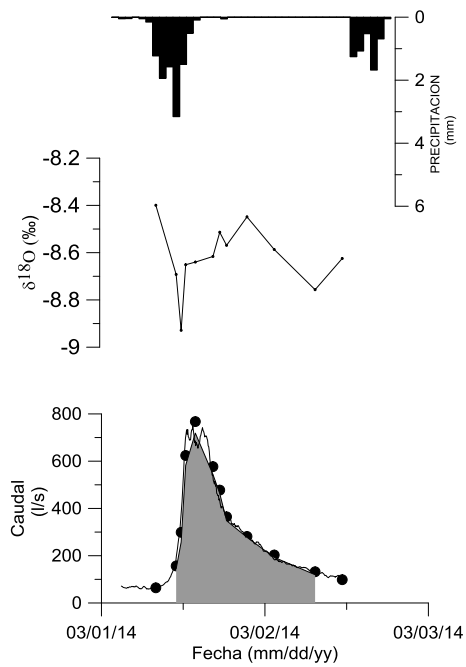


Microcuenca 4

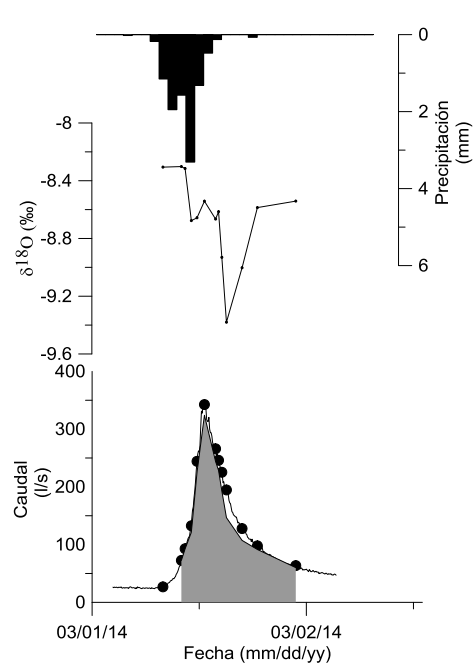


**EVENTO 2:**

Microcuenca 7

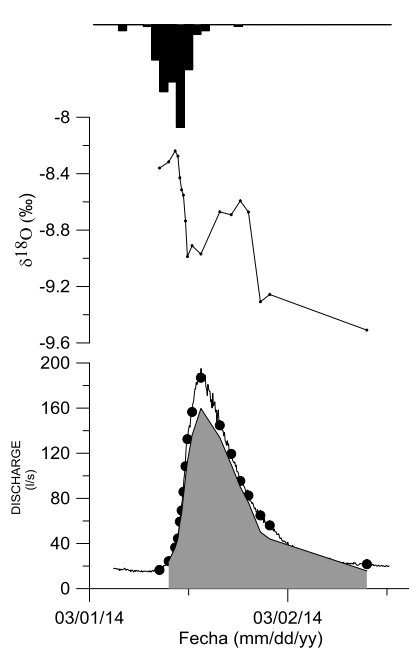


Microcuenca 6

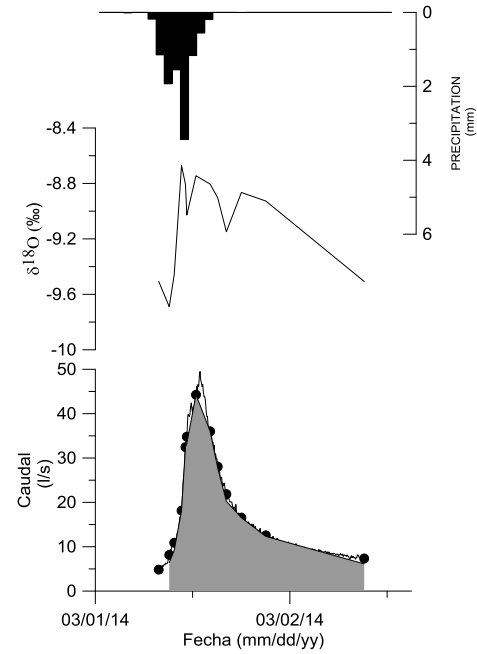


Microcuenca 5

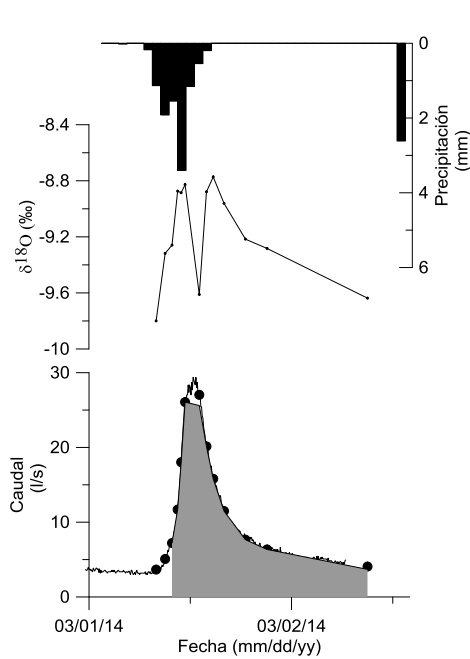
Microcuenca 4



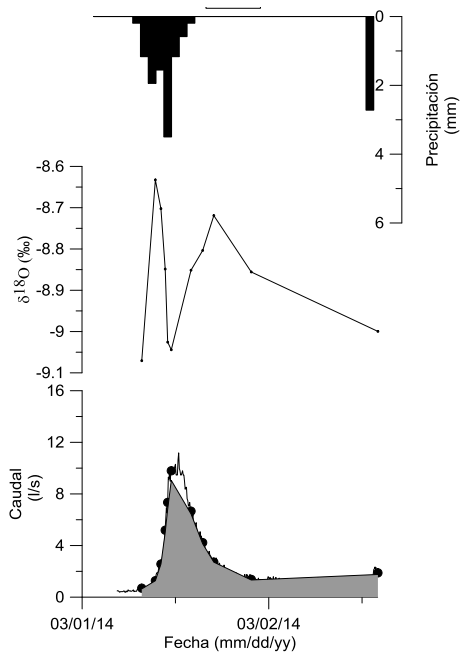
Microcuenca 3



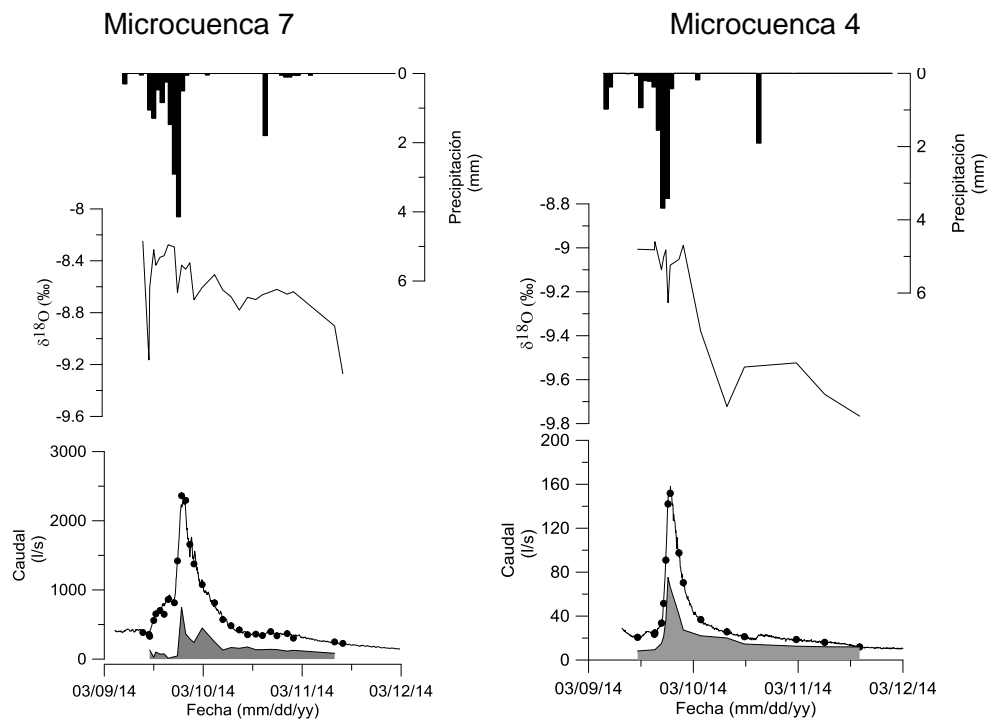
Microcuenca 2



Microcuenca 1



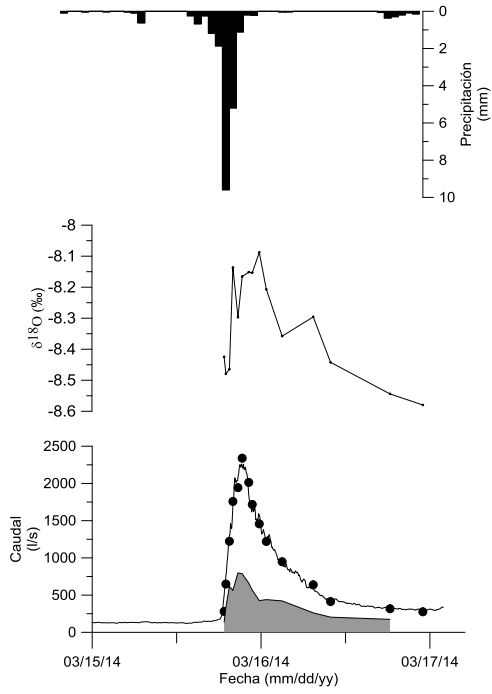
**EVENTO 3:**



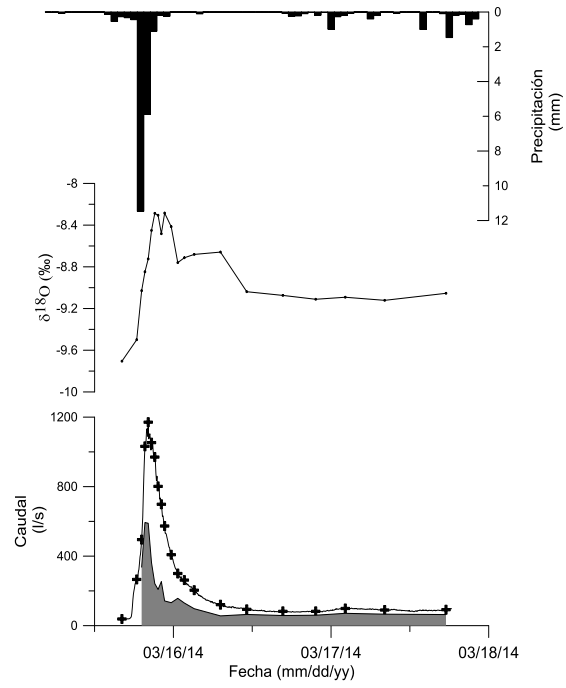
**EVENTO 4:**



### Microcuenca 7



### Microcuenca 6



### Microcuenca 5

