



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE AGUA
QUE GENERAN ESCORRENTÍA EN ZONAS DE PÁRAMO Y SU
CONTRIBUCIÓN, USANDO TRAZADORES AMBIENTALES**

**Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Ambiental**

AUTORES:

Jorge David Ramón Flores

María Fernanda Ortiz Chimbo

DIRECTOR:

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, PhD.

CUENCA - ECUADOR

2015



RESUMEN

A pesar de la importancia del ecosistema páramo gracias a los servicios ambientales que presta al planeta, la investigación del mismo es escasa, lo que ha motivado a desarrollar nuevos estudios para el conocimiento de su funcionamiento hidrológico. Este estudio, llevado a cabo en la cuenca del Río Zhurucaý situado en la Cordillera Andina del Sur del Ecuador entre 3200 y 3900 m s.n.m., se enfocó en identificar las principales fuentes geográficas que aportan a la escorrentía mediante la técnica de end-members en zonas de páramo y la determinación de los porcentajes de contribución de los mismos mediante un modelo de mezcla. La recolección de muestras de agua se realizó en la red de monitoreo ubicada en la cuenca alta del Río Zhurucaý durante el periodo Abril 2012- Junio 2013. La aplicación de un modelo de mezcla se ha utilizado para identificar como principales end-members al Manantial (M), Andosol 1 (A1) e Histosol 1(H1), siendo considerado al Histosol (H1) como el mayor contribuyente en la generación de escorrentía en la cuenca con porcentajes de contribución entre 20 y 80%, seguido del Andosol 1 que presentó porcentajes de contribución entre 20 y 55%, y finalmente el punto de Manantial que presentó porcentajes de contribución entre 5 y 20%, señalando que esta fuente es la que menos aporte tiene a la escorrentía de la cuenca.

Palabras clave: páramos, Río Zhurucaý, fuentes geográficas de aporte, end-members, modelo de mezcla.



ABSTRACT

Despite the importance of the *paramo* ecosystem due to the environmental services it provides to the planet, the research on the topic is scarce; an issue that has led to the development of new studies to understand its hydrological function. This study conducted in the Zhurucay River Basin located in the southern Ecuadorian Andes between 3200 and 3900 m a.s.l., focused on identifying the main geographic sources that contribute to runoff using the end-member technique in *paramo* areas and determining their percentage of contribution through a mixture model. Water samples recollection was conducted in the monitoring network located in the upper basin of the Zhurucay River during the period April 2012 - June 2013. The mixture model was applied to identify as the main end-members Manantial (M), Andosol 1 (A1) and Histosol 1 (H1), considering Histosol (H1) as the largest contributor to runoff generation in the basin, with a percentage of contribution between 20 and 80%, followed by Andosol 1 with percentages between 20 and 55%, and finally Manantial point presenting a contribution between 5 and 20%, indicating that this source contributes the least to the basin runoff..

Keywords: *paramo*, Zhurucay River, geographic sources of supply, end-members, mixing model



ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE IMÁGENES	6
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 EL PÁRAMO.....	15
2.2 PROPIEDADES DEL PÁRAMO	16
2.2.1 CLIMA	16
2.2.2 SUELO	17
2.2.3 TRAZADORES.....	19
2.2.4 END-MEMBERS	20
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOS	22
3.1 ÁREA DE ESTUDIO	22
3.2 SISTEMA DE MONITOREO	23
3.3 TOMA DE MUESTRAS.....	26
3.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO	27
3.5 PROCESAMIENTO DE DATOS	27
3.6 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE END-MEMBERS	28
3.6.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE TRAZADORES	28
3.6.2 ANÁLISIS DE CORRELACIONES DE LOS TRAZADORES.....	29
3.6.3 SELECCIÓN DE END-MEMBERS.....	29



3.7 CUANTIFICACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE END-MEMBERS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS COMBINACIONES DE TRAZADORES UTILIZADAS..... 31

CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 33

4.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE END-MEMBERS 33

4.1.1 SELECCIÓN DE TRAZADORES 33

4.1.2 SELECCIÓN DE END-MEMBERS..... 40

4.2 CUANTIFICACIÓN DE PORCENTAJES DE CONTRIBUCIÓN DE END-MEMBERS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS COMBINACIONES DE TRAZADORES UTILIZADAS..... 42

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 55

5.1 CONCLUSIONES 55

5.2 RECOMENDACIONES..... 56

CAPITULO 6. BIBLIOGRAFÍA..... 57

ANEXOS 62

ANEXO 1. DIAGRAMAS DE CAJAS DE LAS CONCENTRACIONES DE TRAZADORES EN LOS POSIBLES END-MEMBERS..... 62

ANEXO 2. GRAFICOS DE DOS DIMENSIONES CON LA IDENTIFICACIÓN DE END-MEMBERS..... 64

ANEXO 3. DIAGRAMAS DE CAJAS DE LOS PORCENTAJES DE CONTRIBUCIÓN DE LOS TRES END-MEMBERS..... 65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de correlaciones entre trazadores 38

Tabla 2 Tabla de caracterización de trazadores..... 39

Tabla 3 Tabla de diferencias significativas en la comparación de diferentes combinaciones de trazadores..... 51



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de la ubicación de la zona de estudio 23

Figura 2 Gráficos de dos dimensiones con ejemplos de los posibles end-members. 30

Figura 3 Diagramas de caja de la concentración de (a) Litio, (b) Magnesio y (c) Calcio en los posibles end-members..... 35

Figura 4 Gráficos de correlaciones entre (a) K-Ca, (b) K-Sr y (c) Li-Na. 36

Figura 5 Gráficos de dos dimensiones del (a) K-Sr, (b) K-CE y (c) Ca-Y con la selección de end-members. 41

Figura 6 Diagramas de caja de los porcentajes de contribución del Histosol 1.44

Figura 7 Diagramas de caja de los porcentajes de contribución del Andosol 1. 45

Figura 8 Diagramas de caja de los porcentajes de contribución del Manantial. 46

Figura 9 Comparación de las combinaciones de trazadores (a) K-Sr, (b) Li-Rb y (c) K-Rb para el Histosol 1 y Andosol 1..... 48

Figura 10 Comparación de las combinaciones de trazadores (a) Li-CE, (b) Na-Y y (c) Mg-K para el Manantial 49

Figura 11 Diagramas de cajas de los porcentajes de contribución a la escorrentía de los tres end-members con las combinaciones (a) Li-CE, (b) K-Ca y (c) K-Sr 53

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 Colector de agua de precipitación. 24

Imagen 2 Plato de succión colocado en sitio de monitoreo..... 25

Imagen 3 Colectores de agua de suelo de 900 ml. 25

Imagen 4 Punto de caudal ubicado en la salida de la cuenca..... 26

Imagen 5 Filtro de 45 um 26

Imagen 6 Botella de polipropileno de 50 ml 26



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CLÁUSULAS DE DERCHOS DE AUTOR

Yo Jorge David Ramón Flores autor de la tesis "DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE AGUA QUE GENERAN ESCORRENTÍA EN ZONAS DE PARAMO Y SU CONTRIBUCIÓN, USANDO TRAZADORES AMBIENTALES" 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 Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, Mayo de 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jorge David Ramón Flores'.

Jorge David Ramón Flores
C.I: 0104888128



Yo María Fernanda Ortiz Chimbo autora de la tesis "DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE AGUA QUE GENERAN ESCORRENTÍA EN ZONAS DE PARAMO Y SU CONTRIBUCIÓN, USANDO TRAZADORES AMBIENTALES" 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



María Fernanda Ortiz Chimbo
C.I: 0105216295



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Yo, Jorge David Ramón Flores autor de la tesis "DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE AGUA QUE GENERAN ESCORRENTIA EN ZONAS DE PÁRAMO Y SU CONTRIBUCIÓN, USANDO TRAZADORES AMBIENTALES", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, mayo de 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jorge David Ramón Flores', written over a horizontal line.

Jorge David Ramón Flores
C.I: 0104888128



Yo, María Fernanda Ortiz Chimbo autora de la tesis "DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE AGUA QUE GENERAN ESCORRENTIA EN ZONAS DE PÁRAMO Y SU CONTRIBUCIÓN, USANDO TRAZADORES AMBIENTALES", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, mayo de 2015



Maña Fernanda Ortiz Chimbo
C.I: 0105216295



AGRADECIMIENTOS:

Queremos hacer llegar nuestro profundo agradecimiento a todos aquellos que nos supieron brindar su apoyo e impartir sus conocimientos durante la elaboración de este proyecto. Al director del departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales Ing. Patricio Crespo, a nuestras tutoras Ing. Alicia Correa y Blga. Camila Silva, que nos brindaron su ayuda durante todo el desarrollo de este proyecto. Así también queremos agradecer al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca por proveer la información requerida para el desarrollo de esta investigación



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La importancia de los ecosistemas de páramo radica en el servicio natural que cumple como reguladores hídricos, en los que los suelos desempeñan un papel de gran importancia siendo considerados como biomas exclusivos de las montañas neo tropicales que se encuentran dispuestos sobre las cadenas montañosas de los Andes (Daza & Hernández, 2014). El uso razonable de los recursos hídricos tiene gran valor en la actualidad, debido a la importancia del agua para el desarrollo de la vida, siendo necesaria la investigación de su comportamiento y poder asegurar el empleo apropiado de este recurso (Iñiguez et al., 2008)

En nuestro medio Andino la generación del recurso hídrico primordialmente ocurre en las cuencas altas de los páramos, los cuales integran las fuentes de agua en las tierras altas (Buytaert et al., 2006a, 2006b; Iñiguez et al., 2008). A pesar de esto, existe poca investigación desarrollada en estos ecosistemas, siendo insuficientes los intentos para modelar su hidrología (Buytaert et al., 2005, 2007) debido a su ubicación remota y escaso monitoreo.

Las zonas de páramo, consideradas las más importantes dentro de los ecosistemas de montaña ya que proveen de servicios ambientales (Buytaert et al., 2006a; Iñiguez et al., 2008) de manera directa o indirecta a millones de personas (IUCN, 2002), siendo las zonas de montaña las principales proveedoras de recursos hídricos a las partes bajas de las mismas (Buytaert et al., 2006b, 2007).

Pese a la importancia que tienen los ecosistemas de montaña para la regulación y dotación del recurso agua, es notable la falta de estudios enfocados a conocer la hidrología del páramo y los mecanismos que rigen su comportamiento (Buytaert et al., 2005, 2006a). Naciendo la necesidad de mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en cuencas de páramo. En este sentido es necesario el delineamiento de programas de investigación que garanticen la comprensión de la dinámica de estos ecosistemas a fin de dar un apoyo



científicamente sustentado para la toma de decisiones de gestión y uso del recurso agua; dentro de este marco, el uso de trazadores ambientales, contribuye a generar este conocimiento.

Los modelos de mezcla proporcionan herramientas para la investigación de los procesos que generan escorrentía, así como también la determinación de las principales fuentes de origen del recurso agua, la simulación de procesos hidrogeoquímicos que ocurren en las cuencas y sus tiempos de residencia (Bassett, 1997; Uhlenbrook et al., 1999).

En la actualidad, métodos geoquímicos han sido utilizados para la determinación de los componentes del caudal en varias cuencas de diferentes ecosistemas. La necesidad imperiosa de mejorar nuestro entendimiento sobre procesos en cuencas de paramo justifica el interés de aplicar modelos de mezcla con trazadores químicos para cuantificar las potenciales fuentes geográficas de contribución a la escorrentía superficial (Barthold et al., 2008; Ladouche et al., 2001).

La técnica de análisis de mezcla mediante end-members supone que hay una relación química entre el agua de las quebradas y sus fuentes como suelos, precipitación, manantiales. Por lo tanto este enfoque propone que el agua de las quebradas es un resultado de mezcla de soluciones de agua provenientes de diferentes fuentes (Christophersen et al., 1990; Hooper et al., 1990). Esta técnica se ha demostrado que es muy apropiada para identificar y cuantificar las diferentes fuentes de aporte en varias cuencas (Ali et al., 2010; Hooper, 2003; James & Roulet, 2006). Dentro de estudios realizados por Crespo et al. (2012) en la cuenca del Río San Francisco, se han obtenido resultados que determinan que los suelos cumplen un papel muy importante en la generación de escorrentía por el hecho de que el agua fluye sub superficialmente de manera lateral, evidenciando además la influencia de las aguas subterráneas en la generación de escorrentía.



El desarrollo de esta tesis de investigación se justifica por la inexistencia de estudios que utilicen trazadores ambientales (químicos) en zonas de páramo en nuestro país y muy escasos a nivel de los Andes (Buytaert et al., 2006). La utilización de métodos tradicionales de lluvia-escorrentía para estudios hidrológicos son limitados y no permiten identificar fuentes de aporte a la escorrentía superficial (Buytaert et al., 2004) ; visto de esta manera, el avance en la investigación y conocimiento de procesos en nuestros ecosistemas andinos, impulsa el desarrollo de este proyecto, para generar conocimiento y robustecer la toma de decisiones en cuanto al manejo de cuencas de páramo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es determinar la contribución de las diferentes fuentes geográficas a la generación de escorrentía en zonas de páramo en la cuenca del Río Zhurucay, durante épocas secas, usando un modelo de mezcla.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los end-members o fuentes geográficas de aporte, representativos de la cuenca.
- Cuantificar la contribución de las distintas fuentes a la escorrentía superficial.



CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EL PÁRAMO

La Cordillera de los Andes atraviesa el callejón occidental de Sudamérica pasando por Ecuador, donde esta cadena montañosa configura la región Sierra. En la parte más alta de esta región, con un rango altitudinal entre los 3000 y 5000 m s.n.m aproximadamente, se encuentra el páramo (Acosta,1984; Córdova et al., 2013).

Los páramos son ecosistemas importantes por su función natural como almacenadores y reguladores hídricos, pues debido a su constitución es capaz de retener en sus suelos grandes volúmenes de agua y controlar su flujo a través de las cuencas hidrográficas. Los páramos por ende desempeñan un papel fundamental en la disponibilidad de agua para toda la población de los valles interandinos ya que permite su aprovechamiento permanente (Carúa et al, 2008; Daza & Hernández, 2014; Mena et al., 2000).

Sin embargo, el páramo en la actualidad es uno de los ecosistemas más amenazados debido principalmente a las actividades antropogénicas como la expansión de las zonas de cultivo, las prácticas pecuarias, quemas, sobrepastoreo, la introducción de especies exóticas, la minería y la cacería, que han transformado este paisaje frágil pero poseedor de arbustos, pastos, rosetas y turberas en un paisaje de pastizales pobres y fragmentados (Hofstede et al., 2003). Los fenómenos globales como el calentamiento global tendrán impactos negativos de gran importancia en este ecosistema (Poulenard et al., 2003).

En el Ecuador, el páramo cubre alrededor de 1.250.000 ha, es decir aproximadamente un 6% del territorio nacional. Ecuador es el país que más páramos posee en relación a su extensión total (Carúa et al., 2008; Mena & Hofstede, 2006). El páramo se encuentra constituido de planicies y valles accidentados de origen glacial, con una gran diversidad de lagunas, pantanos y praderas húmedas (Buytaert et al., 2004; Córdova et al., 2013).



2.2 PROPIEDADES DEL PÁRAMO

2.2.1 CLIMA

El clima de los Andes depende de ciertas condiciones como la ubicación de los Andes del Ecuador en la zona tropical, además de la influencia de las corrientes marinas del Océano Pacífico y la humedad proveniente de la cuenca amazónica determinan en gran medida los patrones de precipitación que se registran. La altitud es considerada también otra de las condiciones que establecen el clima de los Andes (Calles et al., 2013). La tasa de cambio en el promedio de temperatura con respecto a la altitud está típicamente entre 0,6 y 0,7 °C/100 m (Buytaert et al., 2009; Castaño, 2002). El páramo posee un clima tropical de alta montaña y debido a que se encuentra cerca de la línea equinoccial, la radiación solar diaria es casi constante todo el año (Buytaert et al., 2004a).

Una característica común de los páramos es la presencia de temperaturas muy frías, la temperatura media a 3.5000 m es de alrededor de 7°C (Buytaert et al., 2004a). La precipitación anual es relativamente alta en comparación con aldeñas más bajas (700 – 3000 mm) (Mena & Hofstede, 2006).

A una escala pequeña lo que determina la variabilidad de lluvia depende principalmente variaciones en la dirección y velocidad del viento, las cuales están controladas por pendientes pronunciadas y la topografía accidentada (Beltrán et al., 2009; Mena & Hofstede, 2006); mientras que la variabilidad de la temperatura en el páramo depende principalmente de dos aspectos: la gradiente altitudinal y la humedad del aire, determinados por el clima local (Buytaert et al., 2004a).

La relación entre temperatura y precipitación constituye una segunda fuente de variación. La prevalencia de una elevada nubosidad durante los días de lluvia propicia niveles de radiación bajos en la superficie terrestre, mientras que una elevada humedad relativa en la noche decrece el frío debido a la emisión de radiación de onda larga desde la superficie de la tierra y desde la vegetación (Buytaert et al., 2006a).



2.2.2 SUELO

A pesar de la compleja geología y topografía, los suelos del páramo son bastante homogéneos (Buytaert et al., 2006b). Los suelos típicos del páramo son húmedos, negros, con pH ácido y alto contenido de materia orgánica. La descomposición de materia orgánica es muy lenta lo que ocasiona que se acumule una capa gruesa de suelo orgánico (Mena et al., 2000).

Los factores que forman los suelos son el clima, la roca madre y la edad de los mismos (Mena et al., 2000; Podwojewski, 1999). El clima depende de las relaciones existentes entre la precipitación y la evapotranspiración (Podwojewski, 1999). Un clima frío y húmedo, así también como la presión atmosférica, favorecen a la acumulación de materia orgánica en el suelo. Esta acumulación es además reforzada por la formación de complejos órgano-metálicos altamente resistentes a la descomposición microbiana (Buytaert et al., 2004b; De Bièvre et al., 2005).

La diferencia de los suelos de páramos en el Ecuador se debe principalmente a la diferencia de roca madre entre las regiones norte y sur del país. Los distintos tipos de suelos se encuentran clasificados en roca madre de origen volcánico, en el caso de la zona Norte y roca madre de origen no volcánico, en la zona Sur del Ecuador (Buytaert et al., 2006a; Mena et al., 2000; Poulénard et al., 2003; Tenorio & Cajamarca, 2009).

Las cenizas volcánicas cubren toda la parte norte del Ecuador hasta el Sur de Cuenca y evolucionan según un clima-crono-litosecuencia a la escala del país, pero también a la escala de un área más reducida (Podwojewski, 1999). El tipo general de suelo que se forma sobre las cenizas volcánicas es el Andosol (Mena et al., 2000). Según la clasificación de la World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2006), los Andosoles y los Histosoles son los suelos más comunes en el páramo de Quimsacocha.



2.2.2.1 ANDOSOLES

Los Andosoles cumplen un rol importante dentro del complejo proceso de regulación y almacenamiento del agua en los ecosistemas de páramo (Borja et al., 2008). De acuerdo a la Word Reference Base for Soil Resources, los Andosoles acomodan a los suelos que se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo cualquier clima, excepto en condiciones climáticas híper áridas. Estos también pueden desarrollarse en materiales ricos en silicatos bajo meteorización ácida en climas húmedo y perhúmedo (FAO, 2007).

Los Andosoles son suelos jóvenes con horizontes poco diferenciados, estos contienen una alta tasa de materia orgánica por lo que mantienen su color negro del horizonte superior, además tienen una alta porosidad y una estructura muy estable con micro agregación. Además, mantienen ciertas características morfológicas y físicas que se encuentran determinadas por el estado de meteorización y las condiciones climáticas (Buytaert et al., 2004a).

Los Andosoles son suelos resistentes a la erosión, con buena tasa de humedad y una gran permeabilidad, lo cual permite el desarrollo de raíces, además de una baja densidad aparente (Borja et al., 2008; Mena & Hofstede, 2006; Mena et al., 2000; Podwojewski, 1999; Poulenard et al., 2003; Tenorio & Cajamarca, 2009). Se desarrollan a partir de material piroclásico y su fracción coloidal esta dominada por materiales de rango corto (alofana) o complejos órgano-metálicos (aluminio-humus) (Van Rast, 1997); tienen una alta tasa de retención aniónica en partículas como los fosfatos y los sulfatos (Podwojewski, 1999).

2.2.2.2 HISTOSOLES

Los Histosoles comprenden suelos formados de material orgánico, además se encuentran en todas las altitudes, pero la gran mayoría ocurren en tierras bajas (FAO, 2007), en áreas más saturadas por agua o en zonas con menor influencia volcánica y en donde las bajas temperaturas, escasa aireación y alta acidez favorecen la acumulación de materia orgánica. Poseen propiedades físicas,



químicas y mecánicas que difieren en gran medida de los suelos minerales (Buytaert et al., 2004, 2005; Sauer, 1957). Pueden contener considerables cantidades de agua y poseen materia orgánica a más de 40 cm de profundidad.

Según la World Reference Base for Soil Resources (FAO, 2007) los nombres comunes de los Histosoles, son suelos de turba, suelos fangosos, suelos de pantanos y suelos orgánicos. Los Histosoles tienen una gran capacidad para retener agua y una baja densidad aparente (Buytaert et al., 2004).

2.2.3 TRAZADORES

Un trazador es una sustancia artificial, natural (isótopos estables y radioisótopos) o provenientes de acciones no controladas sobre el ciclo de las aguas subterráneas (procesos de contaminación), que utilizan para “marcar” o hacer más fácilmente identificable una fase específica o parte de un sistema además se mueve con la misma velocidad que el flujo subterráneo (Barbón et al., 2009; Siegel, 1992).

La técnica de trazadores permite obtener información sobre un sistema, o parte de él, observando el comportamiento de una sustancia específica presente en ese medio y constituye el método más apropiado para seguir el movimiento del agua (León, 2012; Romero, 2001).

Ramspacher (1999) clasifica a los trazadores en:

- a) Trazadores naturales, que son aquellos que son agregados por procesos naturales considerando que su producción sea natural o resultado de la actividad global del hombre (Peralta et al., 2005). Estos a su vez se clasifican en sustancias hidrogeoquímicas naturales e isótopos ambientales.
- b) Trazadores artificiales, se clasifican en sustancias solubles tales como las sales, trazadores fluorescentes y radioactivos, así también como sustancias insolubles en el agua como esporas, fagos, y bacterias



Un trazador ambiental aparece de forma natural; su modelo espacial o su balance de masas global se utiliza para inferir los caudales de recarga y descarga. Una de las desventajas es que frecuentemente resulta difícil definir o estimar su función de entrada de manera exacta (tiempo – amplitud) (Mook, 2002).

Los trazadores ambientales han sido ampliamente utilizados en estudios para cuantificar la producción de componentes de escorrentía dominantes. Tanto la geología y los suelos determinan la composición química de los trazadores que se liberan en el agua (Barthold et al., 2011).

Mediante el uso de trazadores, varios autores (Barthold et al., 2010; Burns et al., 2001; Hooper et al., 1990) llevaron a cabo sus respectivos estudios para la obtención de un modelo químico de la escorrentía y la cuantificación de la contribución a la escorrentía mediante la aplicación de un análisis de mezcla con el uso de end-members.

2.2.4 END-MEMBERS

Se denominan end-members a las posibles fuentes de agua que presentan diferentes concentraciones químicas, en donde mediante su identificación nos permiten comprender procesos de generación de escorrentía (Barthold et al., 2008; Hooper et al., 1990).

La formación de dichos minerales va a depender de varios factores como la composición de las rocas, suelos adyacentes y el tiempo que ha estado el agua en contacto con el medio (Rankama, 1954). Estos son utilizados en estudios de seguimiento para poder diferenciar las fuentes de escorrentía variables en el tiempo (Soulsby et al., 2003).

Varios autores (Barthold et al., 2008, 2011; Katsuyama et al., 2001; Rice & Hornberger, 1998) para el desarrollo de sus estudios utilizaron tres end-members ya que Christophersen & Hooper (1992) demostró que si el caudal se



UNIVERSIDAD DE CUENCA

compone de una mezcla de aguas del suelo, por lo menos tres end-members del suelo son necesarias para abarcar las observaciones de los caudales.



CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Zhurucay se encuentra ubicada en las parroquias San Gerardo y Chumblín de la provincia del Azuay, aproximadamente a 85 km de la ciudad de Cuenca. Cuenta con una superficie de 7,5 km² y un rango altitudinal entre los 3400 y 3900 m s.n.m. El río Zhurucay es afluente del Rircay, el mismo que desemboca al río Jubones y cuyas aguas finalmente llegan al océano Pacífico.

La geología de la cuenca se encuentra caracterizada por las formaciones: Turi, conformada de brechas tobáceas primarias de composición andesítica, la formación Quimsacocha conformada por lavas y tobas y por la formación Santa Isabel conformada por lavas y tobas andesíticas (Mosquera et al. 2013)

Las principales coberturas existentes son: pajonal, bosque de polylepis y almohadilla. Los usos del suelo se distribuyen en un 56% pristino, 37% de pastoreo extensivo, 5% pastoreo intensivo y 2% bosque de pino. Los suelos más comunes son los Andosoles que ocupan aproximadamente un 70% de la cuenca y los Histosoles que cubren la mayor parte del 30% restante (Mosquera et al., 2015). Estos suelos están caracterizados por un elevado contenido de materia orgánica, grandes capacidades de retención de agua, elevada estabilidad estructural, y grandes cantidades de carbono.

El clima del sitio de estudio está influenciado por el régimen del Pacífico desde el lado oeste de la cuenca, aunque masas de aire continentales provenientes del lado amazónico también parecen presentar alguna influencia (Vuille et al., 2000)

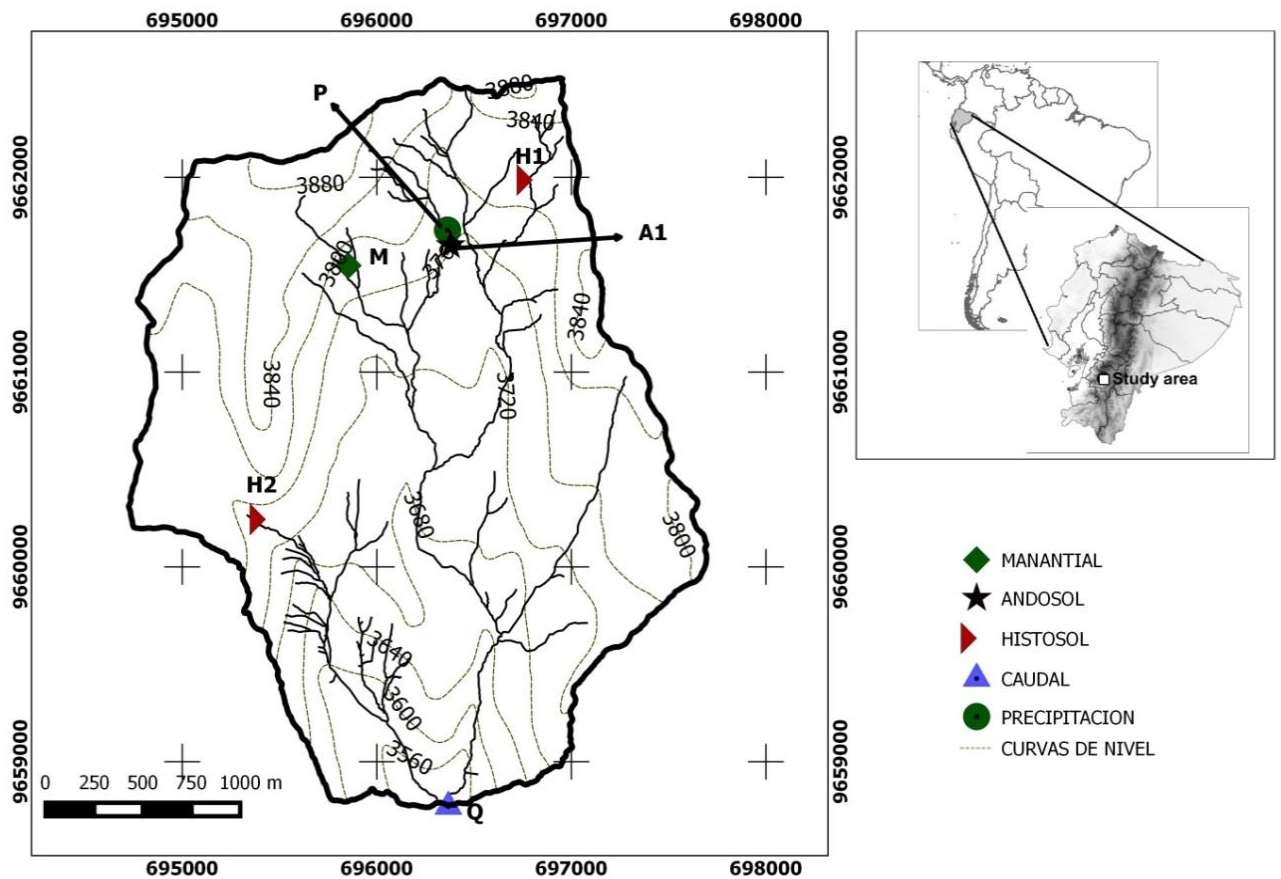


Figura 1 Mapa de la ubicación de la zona de estudio - Cuenca del río Zhurucay. Ubicación de los puntos de monitoreo dentro de la cuenca.

Fuente: Patricio Lazo

3.2 SISTEMA DE MONITOREO

Con la finalidad de identificar los trazadores representativos de la zona de estudio se colectaron muestras de agua en la cuenca alta del río Zhurucay durante el periodo Abril de 2012 – Junio de 2013, en la red de monitoreo (Figura 1) que cuenta con puntos distribuidos dentro de la cuenca. Los puntos monitoreados incluyeron:

a) Agua de precipitación (P) la cual cuenta con un punto en la parte alta de la cuenca, la recolección de las muestras de precipitación se realizó mediante colectores de lluvia (Imagen 1).



Imagen 1 Colector de agua de precipitación.

Fuente: Fernanda Ortiz

b) Agua de suelos tanto de Andosoles (A) e Histosoles (H), para los cuales se contó con puntos de muestreo en diferentes zonas de la cuenca, 2 en zonas de Histosoles y 1 en zonas de Andosoles. De los puntos anteriormente citados se tomaron 3 muestras en cada uno, en diferentes horizontes de suelo, 2 en horizontes orgánicos y 1 en un horizonte mineral. Los horizontes orgánicos para los Andosoles se encontraron entre los 25 cm y 35 cm de profundidad, mientras que para los Histosoles se encontraron entre los 25 cm y 45 cm. El horizonte mineral se encontró a 65 cm en los Andosoles y a 75 cm en los Histosoles. El agua de estos puntos fue recolectada mediante platos de succión conectados a botellas de vidrio graduadas de 900ml (Imágenes 2 y 3).



Imagen 2 Plato de succión colocado en sitio de monitoreo.

Fuente: Alicia Correa



Imagen 3 Colectores de agua de suelo de 900 ml.

Fuente: Jorge Ramón

c) Un punto de manantial (M) ubicado en la parte alta de la cuenca y un punto de agua de escorrentía superficial (Q) ubicado en la salida de la cuenca (Imagen 4), puntos en los que se tomaran muestras directamente.



Imagen 4 Punto de caudal ubicado en la salida de la cuenca

Fuente: Fernanda Ortiz

3.3 TOMA DE MUESTRAS

Se colectaron muestras de agua en los puntos de muestreo mencionados anteriormente. Las muestras de metales se filtraron a través de filtros de 0,45 μm (Imagen 5) y se acidificaron a un $\text{pH} < 2$, con ácido nítrico, para evitar la precipitación de trazas de metal y adsorción durante el almacenamiento en botellas de polipropileno de 50 ml (Imagen 6). El pH y la conductividad eléctrica fueron medidos en el campo mediante el uso de un sensor “WTW multi 3420 handheld digital pH and conductivity meter” (Weilheim, Germany).



Imagen 5 Filtro de 45 μm



Imagen 6 Botella de polipropileno de 50ml

Fuente: Jorge Ramón



3.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO

El análisis de laboratorio se realizó en el instituto de Ecología de Paisaje y Manejo de Recursos Hídricos en la Universidad Justus Liebig Universitat Giessen Alemania; se utilizó “Inductively coupled plasma-mass spectrometer ICP-MS”.

Este análisis brindó las concentraciones en partes por billón (ppb) de veintidós elementos: Litio (Li), Sodio (Na), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Sílice (Si), Potasio (K), Calcio (Ca), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr), Bario (Ba), Cesio (Ce), Vanadio (V), Cromo (Cr), Itrio (Y), Arsénico (As), Neodimio (Nd) y Uranio (U).

3.5 PROCESAMIENTO DE DATOS

La base de datos utilizada para el estudio cuenta con un conjunto de datos correspondientes a 82 monitoreos, de los cuales se realizaron análisis de conductividad, pH y la determinación de las concentraciones de los 22 tipos de metales y tierras raras (también denominados trazadores)

En dicha base de datos se encontraron valores que se encuentran por debajo de los límites de medición, motivo por el cual fue necesario el relleno de la base de datos mediante el siguiente procedimiento:

- Se retiraron los datos que correspondieron a muestras tomadas durante eventos de precipitación.
- Se obtuvo la mediana de los valores de diferentes trazadores.
- Se determinó el valor mínimo para los datos de los trazadores y del mismo se obtuvo el 75%.
- Con el valor obtenido se procedió al relleno de datos que presentaron valores menores a los límites de medición.



- Se determinó nuevamente las medianas de los trazadores y se comparó con las medianas de la base original, con lo que se observó que los valores no difirieron el uno del otro.

De la base de datos obtenida se procedió a determinar los “outliers”, Barthold et al. (2010) en su estudio identificó como outliers a los valores 1.5 veces mayores al rango intercuartílico. Estos constituyen datos cuyos valores se encuentran lejos de los rangos normales de concentración por lo que fue necesario descartarlos. Se realizó la depuración de la base de datos utilizando valores como la mediana, el cuartil 25 y el cuartil 75 y los límites máximos y mínimos.

3.6 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE END-MEMBERS

Como paso previo a la selección de end-members se considera la identificación y selección de los trazadores. La identificación de los potenciales trazadores a utilizarse en este estudio se llevó a cabo mediante el análisis de la variabilidad espacial de la concentración de los trazadores en los diferentes puntos de muestreo (potenciales end-members). La selección de los mismos se realizó mediante los resultados de los análisis gráficos y de correlaciones entre los potenciales trazadores

3.6.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE TRAZADORES

Este análisis se enfoca en una selección preliminar de trazadores. Según el enfoque utilizado por Hooper et al. (1990), el cual ha sido utilizado en varios estudios (Barthold et al., 2008, 2010; Bonell, 1998; Burns et al., 2001; Christophersen et al., 1990; Delphis et al., Moses, 2011), para una correcta selección de end-members estos deben presentar diferencias en la concentración de los trazadores que se utilicen. La determinación de los trazadores se basó en características químicas de los solutos y mediante el análisis de diagramas de caja que permitieron observar las diferencias que existen en las concentraciones entre cada end-member.



3.6.2 ANÁLISIS DE CORRELACIONES DE LOS TRAZADORES

Este análisis tiene como fin determinar los trazadores que mejor se ajusten al modelo de mezcla (Hooper et al., 1990), varios autores han basado sus estudios en la identificación de trazadores representativos de sus zonas de estudio (Barthold et al., 2010; Bonell, 1998; Burns et al., 2001; Christophersen et al., 1990; Christophersen & Hooper, 1992). Se determinaron aquellos trazadores que sean diferentes unos de otros, mientras que de los trazadores que mostraron características similares se descartó uno de ellos. Para determinar los trazadores que fueron descartados se realizaron correlaciones entre los mismos, graficando la concentración de un trazador contra la de otro (Delphis et al., 2011). El análisis se enfocó en la salida de la cuenca correspondiente al punto de caudal (Imagen 4).

3.6.3 SELECCIÓN DE END-MEMBERS

Similar al enfoque utilizado por Hooper et al. (1990), la selección de end-members se realizó mediante gráficos de dos dimensiones (Figura 2), en los cuales se graficaron las concentraciones medias de un trazador versus otro de cada end-member y las concentraciones puntuales de escorrentía para todas las combinaciones de trazadores seleccionados. Según lo encontrado en varios estudios (Christophersen et al., 1990; Christophersen & Hooper, 1992; Rice & Hornberger, 1998; Hooper, 2003; Barthold et al., 2010, 2011; Burns et al., 2001; Crespo et al., 2011; Katsuyama et al., 2001) en una correcta selección de end-members los puntos de caudal se encontrarán dentro del triángulo formado por los tres end-memebrs.

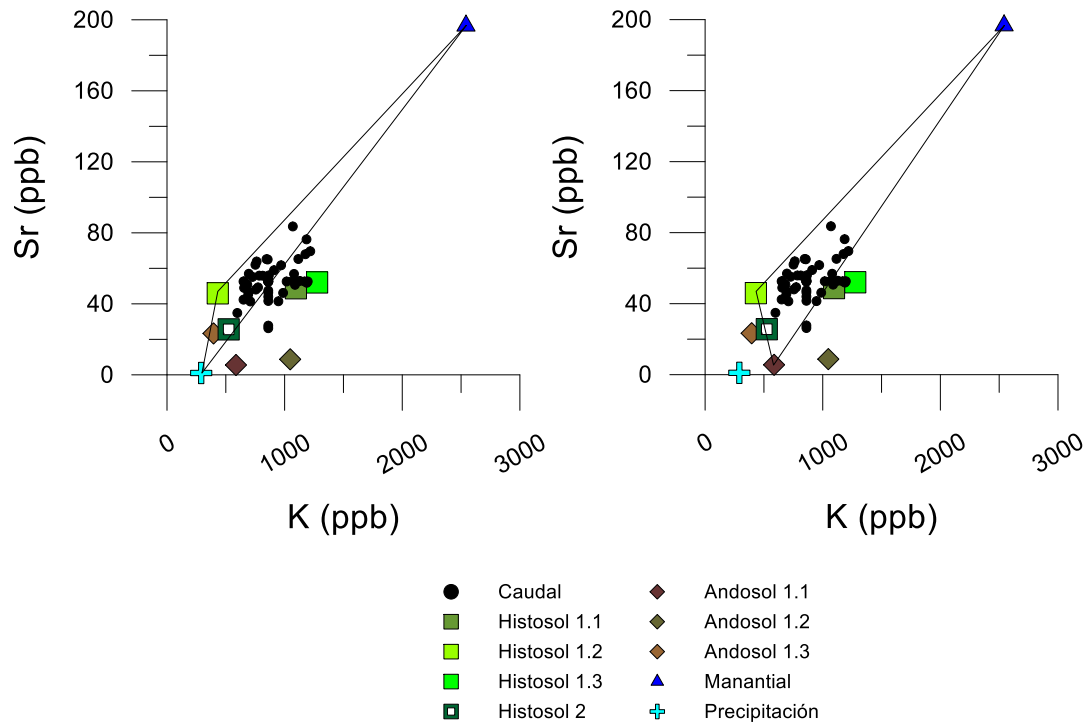


Figura 2 Gráficos de dos dimensiones con ejemplos de los posibles end-members.

En los gráficos de dos dimensiones (Figura 2.) se observó que no hay una clara diferenciación en las concentraciones de los trazadores entre los horizontes de los puntos de monitoreo de suelos (principalmente el Andosol) y el punto de Precipitación, lo que dificultó la selección de los principales end-members. Por lo que fue necesario ponderar las concentraciones de los puntos de monitoreo de suelo (Histosoles y Andosoles) y Precipitación. Las ponderaciones se realizaron en base al volumen de agua encontrado en cada horizonte durante los diferentes monitoreos, se obtuvo un volumen total con el cual se calcularon nuevas concentraciones de los end-members y se obtuvieron subtotales de cada uno de los monitoreos. Con este procedimiento se obtuvo un solo valor de concentración para los puntos de monitoreo de Histosoles, Andosoles y Precipitación.

Esto nos permitió reducir el número de posibles end-members entre los cuales se realizó la selección, además de permitirnos diferenciar entre los puntos de Andosoles y Precipitación, ya que estos presentaban concentraciones similares,



Mosquera et al. (2013) presenta una explicación detallada de la relación entre los puntos de Precipitación y suelos principalmente Andosoles.

3.7 CUANTIFICACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE END-MEMBERS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS COMBINACIONES DE TRAZADORES UTILIZADAS

Una vez identificadas las fuentes que contribuyen a la escorrentía (end-members) se procedió a determinar el porcentaje de contribución de cada una de estas al agua que llega al río. El cálculo de la contribución se realizó utilizando un modelo de mezcla de tres componentes, que se basa en la resolución de un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (Liu et al., 2008). Para este cálculo se utilizaron las combinaciones de trazadores que permitan una correcta selección de end-members.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_t \tag{1}$$

$$C_1^1 Q_1 + C_2^1 Q_2 + C_3^1 Q_3 = C_t^1 Q_t \tag{2}$$

$$C_1^2 Q_1 + C_2^2 Q_2 + C_3^2 Q_3 = C_t^2 Q_t \tag{3}$$

Dónde:

Q – Descarga

C – Concentración de los trazadores

Soluciones:

$$Q_1 = \frac{(C_t^1 - C_3^1)(C_2^2 - C_3^2) - (C_2^1 - C_3^1)(C_t^2 - C_3^2)}{(C_1^1 - C_3^1)(C_2^2 - C_3^2) - (C_2^1 - C_3^1)(C_1^2 - C_3^2)} Q_t \tag{4}$$

$$Q_2 = \frac{C_t^1 - C_3^1}{C_2^1 - C_3^1} Q_t - \frac{C_1^1 - C_3^1}{C_2^1 - C_3^1} Q_1 \tag{5}$$

$$Q_3 = Q_t - Q_1 - Q_2 \tag{6}$$



En el caso de presentarse porcentajes de aporte negativos se procederá a la corrección de los puntos de escorrentía. Este error se presenta debido a puntos de escorrentía que caen fuera del triángulo formado por los tres end-members. (Barthold et al., 2010) señala que este es un comportamiento típico en los modelos de mezcla, este puede presentarse por (i) incertidumbre, resultado de los monitoreos en campo o en los análisis de laboratorio, (ii) falta de invariancia temporal de los end-members, (iii) variación temporal en la mezcla de los diferentes end-members.

La teoría presentada por Christophersen et al. (1990) y Christophersen & Hooper (1992) indica que los puntos de escorrentia deberan ser proyectados en el espacio formado por los end-members. En vista de esto se utilizó la solución presentada por Liu et al. (2008), que consiste en la proyección de los puntos de escorrentia que se encuentre fuera del triángulo hacia las rectas formadas por cada end-member.

Una vez determinados los porcentajes de contribución se realizó un análisis de sensibilidad de las diferentes combinaciones de trazadores utilizadas en la cuantificación de la contribución de los end-members.

Para este análisis se realizaron diagramas de caja de los porcentajes de contribución que presentaron cada uno de los tres end-members con las diferentes combinaciones de trazadores utilizadas, con este análisis se eliminaron aquellas combinaciones que muestren un comportamiento anómalo de la zona de estudio.

Finalmente se realizó la prueba estadística U de Mann-Whitney, la cual es una prueba no paramétrica que se aplica a dos muestras independientes. En nuestro caso se compararon los porcentajes de contribución que presentan los end-members en las diferentes combinaciones de trazadores, esto con el fin de identificar las combinaciones que menos diferencias presenten al compararlas con todas combinaciones utilizadas, esto nos sugiere que estas combinaciones de trazadores son las que presentan valores reales para la zona de estudio.



CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

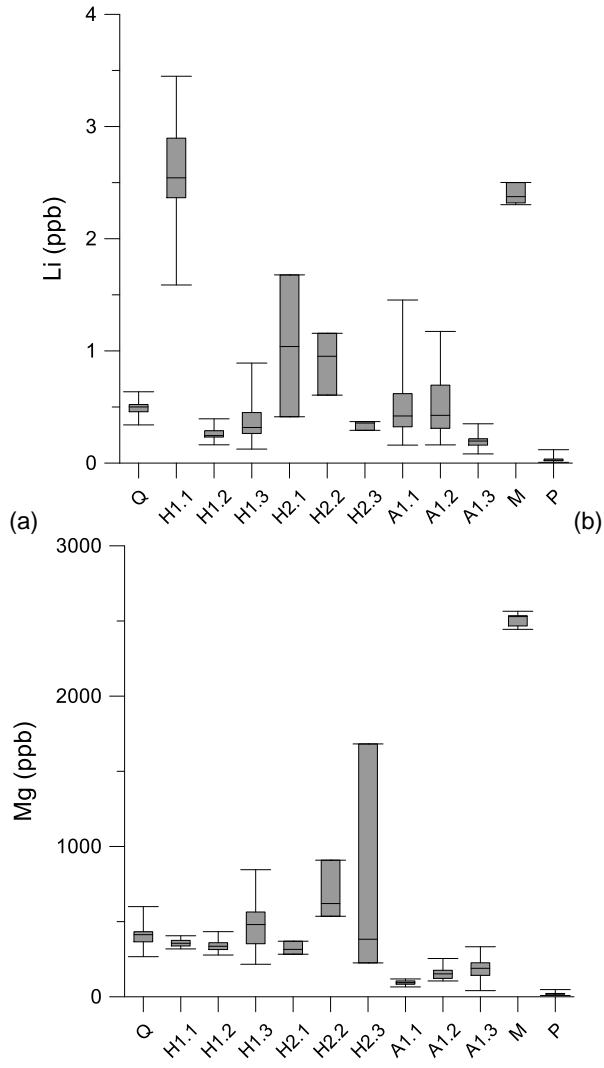
4.1 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE END-MEMBERS

4.1.1 SELECCIÓN DE TRAZADORES

El análisis gráfico que se realizó por medio de diagramas de cajas, se basó en la determinación de trazadores que muestren diferencias en la concentración de los posibles end-members (Hooper et al., 1990).

Como se observa en la Figura 3, se presentan diferencias en la concentración en los puntos de monitoreo. La Figura (3a) muestra diferencias en la concentración en los horizontes de los puntos de Histosol 1, Histosol 2 y Andosol 1, de igual manera nótese que en las figuras (3b) y (3c) la concentración en los puntos de Histosoles (H1.1, H1.2, H1.3) es mayor que la de los puntos de Andosoles (A1.1, A1.2, A1.3). Finalmente se puede observar, en las Figuras (a, b y c), que el punto de Manantial (M) presenta una mayor concentración con respecto a los demás end-members.

Estos altos valores de concentración de metales sugieren que el agua que circula por el manantial ha estado almacenada por un largo periodo de tiempo, un similar comportamiento fue encontrado por Mosquera et al. (2013) en su estudio realizado en la misma zona de estudio. Los diagramas de cajas de los otros 19 trazadores se los puede encontrar en el Anexo 1.



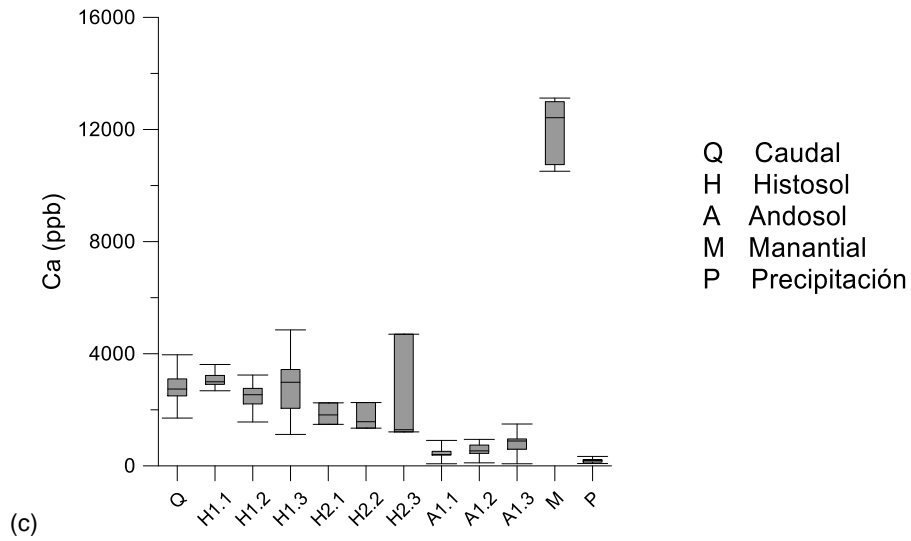


Figura 3 Diagramas de caja de la concentración de (a) Litio, (b) Magnesio y (c) Calcio en los posibles end-members.

En el análisis de correlaciones se identificaron aquellos trazadores que muestren comportamientos diferentes en la zona de estudio. Este análisis se realizó entre los 23 trazadores (metales y tierras raras y conductividad) obtenidos. Se determinaron los trazadores que presenten altas correlaciones, de los cuales uno de los trazadores deberá ser descartado.

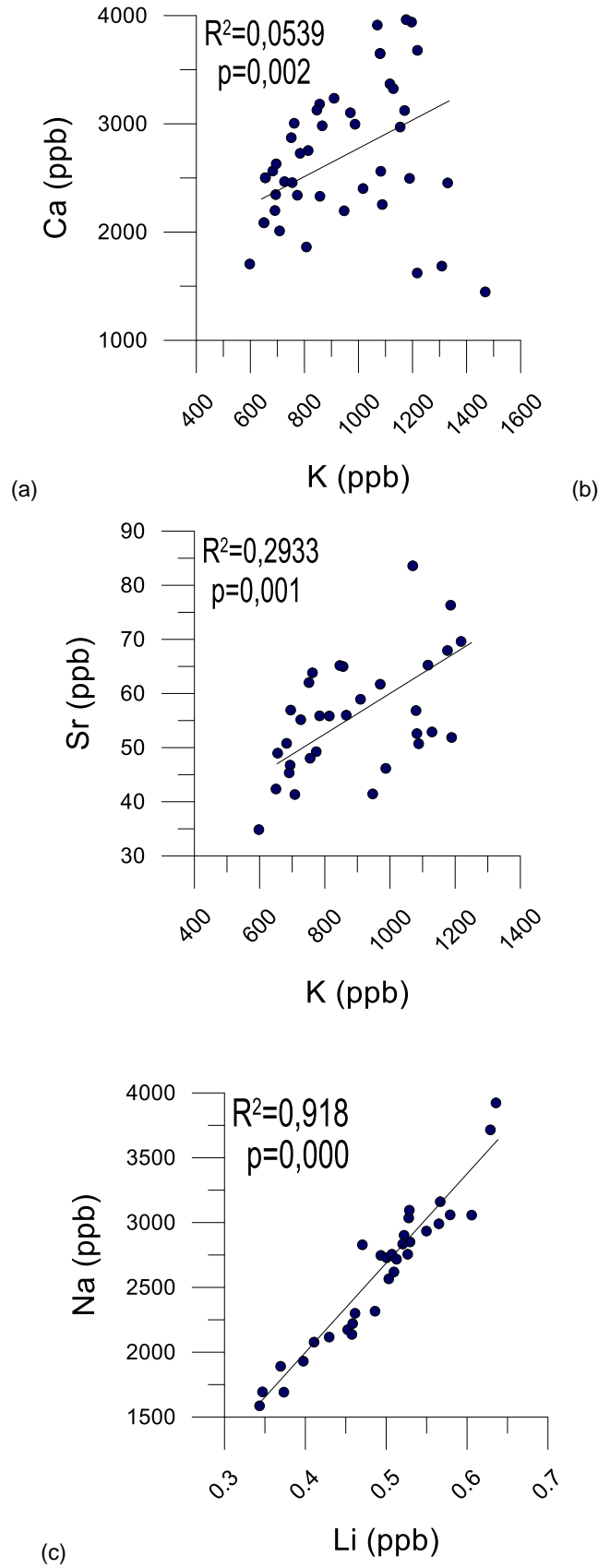


Figura 4 Gráficos de correlaciones entre (a) K-Ca, (b) K-Sr y (c) Li-Na.



Las figuras (4a, 4b y 4c) muestran las correlaciones realizadas para las combinaciones de trazadores Potasio-Calcio, Potasio-Estroncio y Litio-Sodio. Se observó que las primeras dos combinaciones de trazadores presentaron bajas correlaciones, con valores de R^2 de 0,0539 y 0,2933 respectivamente, lo que nos indica las diferencias que se presentan entre los trazadores, mientras que la figura (4c) muestra una alta correlación entre Li-Na con un $R^2=0,918$ lo que nos indica que uno de los dos trazadores será descartado. La Tabla 1 presenta los valores de las correlaciones que se realizaron para todas las combinaciones de trazadores. Se puede observar que existen altas correlaciones entre varios trazadores, los cuales se consideró que deberán ser descartados para el estudio.

Una vez finalizados los análisis gráficos y de correlaciones se procedió a descartar aquellos trazadores redundantes que se consideren no son representativos de la zona de estudio. La Tabla 2 muestra el conjunto de trazadores que resultaron del proceso de selección y eliminación y que fueron utilizados en los análisis posteriores. Se observó que se cuenta con un conjunto de 13 trazadores que se consideraron representativos de la zona de estudio, mientras que en diferentes estudios (Barthold et al., 2010; Crespo et al., 2011; Hooper et al., 1990) se han utilizado un conjunto más de trazadores normalmente compuestos por siete u ocho trazadores, Burns et al. (2001) con cinco trazadores y Rice & Hornberger (1998) con cuatro trazadores. Ha sido demostrado por Barthold et al. (2010) que la selección de un set más amplio de trazadores permitirá evitar llegar a conclusiones falsas sobre el funcionamiento de la cuenca, esto nos indica que es plausible trabajar con un set más amplio.



Tabla 1. Tabla de correlaciones entre trazadores. Se considera que hay una alta correlación cuando esta es $\geq \pm 0,75$, cuyos valores se encuentran resaltados en la tabla.

	Li	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	Mn	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Ce	V	Cr	Y	As	Nd	U	
Li	1,00																						
Na	0,96	1,00																					
Mg	0,94	0,92	1,00																				
Al	-0,40	-0,27	-0,28	1,00																			
Si	0,93	0,94	0,86	-0,28	1,00																		
K	0,78	0,28	0,34	0,00	0,34	1,00																	
Ca	0,80	0,83	0,80	-0,03	0,82	0,23	1,00																
Fe	-0,66	-0,60	-0,55	0,75	-0,62	-0,30	-0,46	1,00															
Mn	-0,59	-0,56	-0,52	0,65	-0,56	-0,25	-0,31	0,82	1,00														
Ni	0,42	0,32	0,21	-0,07	0,39	0,53	0,37	-0,26	-0,21	1,00													
Cu	0,34	0,40	0,16	0,19	0,31	0,61	0,25	-0,03	-0,09	0,67	1,00												
Zn	-0,04	-0,12	-0,06	0,44	-0,16	0,01	0,21	0,08	0,34	0,24	0,24	1,00											
Rb	0,91	0,91	0,93	-0,28	0,86	0,80	0,84	-0,53	-0,47	0,43	0,40	0,04	1,00										
Sr	0,88	0,88	0,95	-0,47	0,80	0,54	0,86	-0,68	-0,56	0,24	0,07	0,17	0,88	1,00									
Ba	0,67	0,70	0,81	-0,25	0,57	0,38	0,82	-0,45	-0,27	0,15	-0,02	0,06	0,77	0,89	1,00								
Ce	-0,41	-0,40	-0,43	0,61	-0,45	-0,11	-0,55	0,74	0,59	-0,13	0,20	0,05	-0,39	-0,65	-0,59	1,00							
V	0,84	0,83	0,80	-0,07	0,69	0,63	0,71	-0,38	-0,41	0,36	0,50	-0,10	0,82	0,77	0,69	-0,25	1,00						
Cr	-0,27	-0,24	-0,32	0,60	-0,11	0,14	0,01	0,32	0,48	0,21	0,19	0,42	-0,26	-0,40	-0,29	0,32	-0,28	1,00					
Y	-0,53	-0,49	-0,44	0,65	-0,64	-0,33	-0,46	0,68	0,52	-0,02	0,18	0,30	-0,38	-0,60	-0,45	0,88	-0,18	0,18	1,00				
As	0,51	0,67	0,66	-0,04	0,57	0,56	0,63	-0,30	-0,32	0,37	0,30	-0,17	0,57	0,59	0,62	-0,19	0,63	-0,17	-0,15	1,00			
Nd	-0,65	-0,66	-0,59	0,72	-0,72	-0,41	-0,56	0,81	0,66	-0,14	0,14	0,38	-0,50	-0,70	-0,54	0,92	-0,39	0,27	0,96	-0,32	1,00		
U	-0,16	-0,06	-0,11	0,45	-0,15	0,13	-0,06	0,44	0,45	0,19	0,28	0,03	-0,04	-0,25	-0,19	0,58	0,18	0,10	0,50	0,20	0,45	1,00	



Tabla 2 Tabla de caracterización de trazadores. La tabla muestra los mínimos, máximos y la media de los trazadores seleccionados en cada uno de los puntos de monitoreo.

Muestra	Número de muestras n	Li (ppb)	Na (ppb)	Mg (ppb)	Al (ppb)	Si (ppb)	K (ppb)	Ca (ppb)	Fe (ppb)	Mn (ppb)	Rb (ppb)	Sr (ppb)	Y (ppb)	CE(uS)
Lluvia	34	0,0 (0,0-0,1)	178 (31,4-652,4)	20 (8,4-47,9)	112,3 (20,8-354,2)	54,6 (16,8-155,5)	376,0 (102,53-1179,45)	185,1 (83,3-336,6)	59,9 (15,7-161,4)	8,3 (2-20,2)	0,3 (0,1-1)	1,9 (0,4-2,5)	0,0 (0,005-0,06)	9,1 (4,8-31,9)
Suelo														
H1.1	16	2,6 (1,6-3,4)	1994,9 (1842,8-2234,9)	359,2 (318,4-405,9)	181,6 (76,9-298,6)	7717,4 (7471,1-7915)	1100,1 (309,5-2114,6)	3056,3 (2679-3616,6)	1186,2 (293,8-1928,5)	20,5 (7,7-32,5)	2,8 (1,8-4,6)	49,3 (38,3-62)	0,1 (0,04-0,1)	34,2 (28,9-38,5)
H1.2	39	0,3 (0,1-0,4)	1910,4 (1547,1-2274,4)	341,1 (277,7-433,2)	157,8 (59-293)	6655,6 (4781,6-7968,1)	477,4 (240,8-976,1)	2495,3 (1565,6-3240,4)	2186,5 (258,4-4774,9)	84,7 (52,6-110,1)	1,9 (1,2-2,8)	46,5 (29,7-62,9)	0,1 (0,03-0,1)	32,0 (25,1-47)
H1.3	42	0,4 (0,1-0,9)	2198,0 (1770,3-2698)	457,9 (216,3-845,3)	215,8 (44,9-472,1)	6843,4 (5304,7-7756,2)	1295,5 (478,4-1822,7)	2814,5 (1121,6-4850,6)	669,5 (109,7-4142,2)	75,9 (4,2-276,6)	4,3 (1,9-6)	49,7 (18,6-84)	0,2 (0,1-0,2)	38,0 (19,7-77)
H2.1	4	1,0 (0,4-1,6)	593,5 (450,9-755,9)	320,8 (283,1-369,7)	284,8 (205,7-394,4)	2911,5 (2346,4-3684,9)	127,5 (49,8-237,6)	1841,1 (1481-2248,2)	1031,6 (1005,8-1072,3)	43,5 (31,7-48,2)	0,2 (0,1-0,2)	29,7 (24,7-35,8)	0,2 (0,1-0,2)	16,3 (15,1-17,2)
H2.2	4	0,9 (0,6-1,1)	1042,2 (752-1246,1)	650,5 (535,5-908,7)	1199,6 (225-3436,3)	3800,5 (3427,6-4108,2)	666,5 (524,2-913,9)	1661,6 (1345,6-2258,4)	5110,1 (1654,5-9979,5)	16,1 (10,8-22,7)	2,0 (1,8-2,2)	22,3 (16,6-29,8)	0,4 (0,3-0,5)	28,9 (23,1-34,9)
H2.3	3	0,3 (0,2-0,3)	1969,8 (715,8-2834,6)	763,4 (225,4-1682,1)	299,9 (286,1-313,2)	4155,6 (1925-7364,2)	573,2 (106,7-955,9)	2399,7 (1211,6-4697,6)	7817,5 (691,7-15683,5)	77,3 (37,9-155,6)	1,4 (0,1-2,3)	35,0 (17,3-68,2)	0,3 (0,1-0,5)	24,2 (22,5-27,3)
A1.1	43	0,5 (0,1-1,4)	194,7 (110,1-331,6)	94,2 (65,6-118,7)	329,9 (102-609,6)	2068,3 (1729,8-2440,3)	684,7 (167,5-1528,7)	438,2 (75-908,1)	60,9 (22,3-148,1)	4,2 (1-9,1)	1,6 (0,3-3,6)	5,7 (3,4-8,9)	0,1 (0,06-0,1)	9,5 (5,6-64,2)
A1.2	37	0,5 (0,1-1,2)	322,8 (217,1-465)	153,1 (105,3-254,7)	232,3 (69,4-439)	2872,3 (2101,2-3577,1)	1066,1 (808,3-1406,4)	546,0 (107,7-944,6)	53,1 (13,6-108,8)	7,9 (4,5-11,2)	2,6 (1,7-3,4)	8,8 (3,9-17,1)	0,1 (0,04-0,1)	15,5 (7,6-30,7)
A1.3	41	0,2 (0,0-0,3)	573,8 (286,9-784,1)	178,6 (40,9-332,8)	160,2 (38-367,3)	2105,3 (1358,5-2882,1)	521,0 (156,6-1215,2)	751,6 (75-1493,2)	54,0 (14,2-163,5)	11,2 (2-21,9)	1,0 (0,3-1,7)	19,4 (2-43,2)	0,0 (0,008-0,03)	18,3 (10,2-80)
Manantial	8	2,4 (2,3-2,5)	6625,2 (6537-6695,9)	2509,2 (2444,4-2564,7)	45,1 (20,1-88,1)	15733,4 (14889-916731,8)	2550,4 (2428,6-2671,9)	12032,4 (10510,5-13121,2)	33,8 (13,6-79,5)	2,2 (0,8-4,1)	5,5 (5,2-5,8)	200,2 (193,3-211,4)	0,0 (0,005-0,02)	116,3 (114,8-120,4)
Caudal	50	0,5 (0,3-0,6)	2606,2 (1586,1-3923,2)	410,6 (266,8-599,8)	94,3 (32,4-149)	5970,1 (918,4-10325,3)	891,2 (597,7-1218,1)	2803,1 (1704,8-3962,2)	157,4 (64,6-217,2)	7,9 (4,2-13,2)	2,1 (1,6-2,9)	52,9 (26,3-83,6)	0,1 (0,03-0,1)	32,9 (19,1-47)



Las muestras de precipitación presentaron concentraciones bajas en comparación con las demás fuentes de escorrentía (Tabla 2), el mismo comportamiento fue encontrado por Crespo et al. (2011). Esto se presenta en la mayoría de trazadores debido a que muchos de los elementos no se encuentran en forma libre en la atmósfera presentando concentraciones bajas en el ambiente.

Las muestras de Histosoles presentaron concentraciones mayores a la de los puntos de Andosoles, además estas concentraciones fueron más cercanas o similares a las de las muestras de caudal, este comportamiento se presenta en todos los trazadores, lo que sugiere que esta fuente podría ser seleccionada como end-member.

Las muestras de manantial, a diferencia del resto de puntos de monitoreo, presentaron altas concentraciones, estos valores más enriquecidos sugieren que el agua que circula por este punto ha estado almacenada por un largo período de tiempo y que proviene de aguas más profundas (Mosquera et al., 2013).

4.1.2 SELECCIÓN DE END-MEMBERS

Como se indicó en el capítulo anterior se realizó una selección preliminar de end-members en la cual se pudo observar que algunas de las posibles fuentes de agua, principalmente el Andosol 1, presentó concentraciones similares en sus tres horizontes, además de presentarse concentraciones similares al punto de precipitación, se optó entonces por realizar ponderaciones para el Histosol 1 (H1), Andosol 1 (A1) y Lluvia (P). Una vez obtenidos los promedios ponderados se procedió a realizar gráficos de dos dimensiones en los cuales se seleccionaron tres posibles set de end-members (Figura 5).

De los 53 gráficos realizados para las diferentes combinaciones de trazadores 35 de ellos indicaron como end-members al Manantial (M), Andosol 1 (A1) e Histosol 1 (H1), 10 gráficos mostraron como end-members al Manantial (M),

Andosol 1 (A1) e Histosol 2 (H2), finalmente 8 gráficos muestran como end-members al Manantial (M), Lluvia (P) e Histosol 1 (H1).

En vista de que un mayor número de gráficos indican como principales end-members a los que conforman el primer set de datos (Figura 5), se consideró a este como el más importante y se trabajó con este set en análisis posteriores. El Anexo 2. presenta los gráficos de dos dimensiones para las demás combinaciones de trazadores utilizadas.

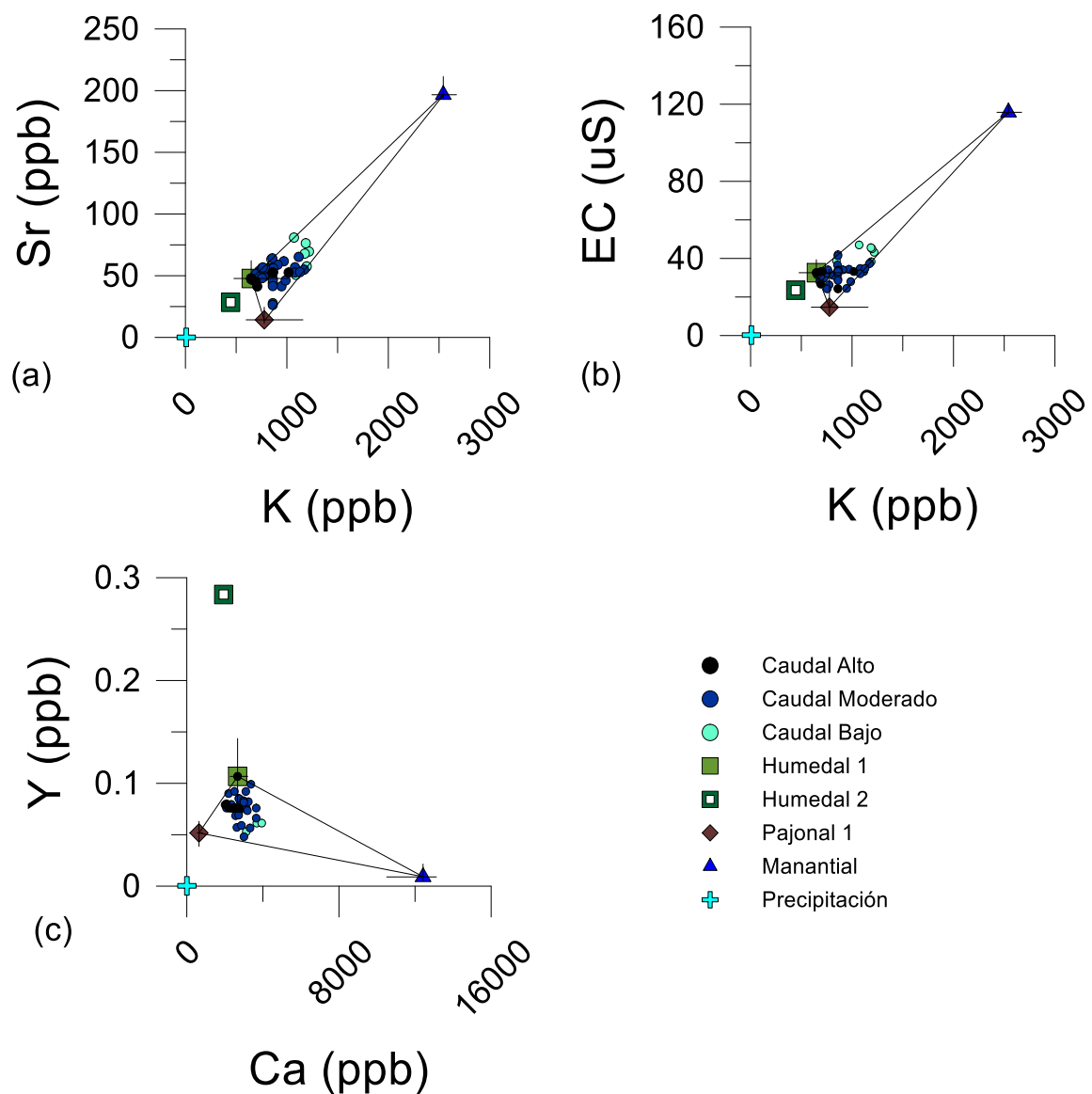


Figura 5 Gráficos de dos dimensiones del (a) K-Sr, (b) K-CE y (c) Ca-Y con la selección de end-members.



4.2 CUANTIFICACIÓN DE PROCENTAJES DE CONTRIBUCIÓN DE END-MEMBERS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS COMBINACIONES DE TRAZADORES UTILIZADAS

Una vez identificados los end-members se determinó el porcentaje de contribución de cada una de ellos a la escorrentía superficial. La cuantificación del porcentaje de contribución se realizó mediante la resolución de un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas. Esta cuantificación se realizó para todas las combinaciones de trazadores que indicaron como end-members al Histosol 1, Andosol 1 y Manantial.

En una primera cuantificación se observó que ciertas combinaciones presentaron porcentajes de contribución negativos en las diferentes fuentes, esto debido a que puntos de caudal se encontraron fuera del triángulo formado por los tres end-members. El capítulo anterior se detalla el proceso de corrección de estos puntos de caudal, que consiste en proyectar los mismos las rectas (Liu et al., 2008), formadas ya sea, por el Histosol 1–Andosol 1, Histosol 1–Manantial o Andosol 1–Manantial. Luego de realizada la corrección de los puntos de caudal se calculó nuevamente los porcentajes de contribución.

Posteriormente se realizó un análisis de sensibilidad para las diferentes combinaciones de trazadores utilizadas en los cálculos de la contribución de los end-members. Una primera parte del análisis de sensibilidad consistió en un análisis de diagramas de caja de los porcentajes de contribución que presentaron cada uno de los end-members en las diferentes combinaciones de trazadores, estos mostraron porcentajes que se encuentran fuera de rangos posibles para la zona de estudio

Como se observa en la Figura 6, en el punto de Histosol 1, combinaciones de trazadores como Litio-Sodio presentan porcentajes de contribución mayores al 80% llegando incluso a valores cercanos al 100%. Un escenario diferente se observó en combinaciones como Litio-Hierro en las cuales los porcentajes de contribución estuvieron por debajo del 10%. En ambos casos se observó que los



valores que no obedecen a un comportamiento normal de la cuenca, por lo que estas combinaciones de trazadores fueron descartadas.

De igual manera el análisis de los gráficos de caja se realizó para en punto de Andosol 1 (Figura 7) y el punto de Manantial (Figura 8), en los que se descartaron las mismas combinaciones de trazadores que para el Histosol 1, igualmente se observó que estas presentaron comportamientos erróneos.

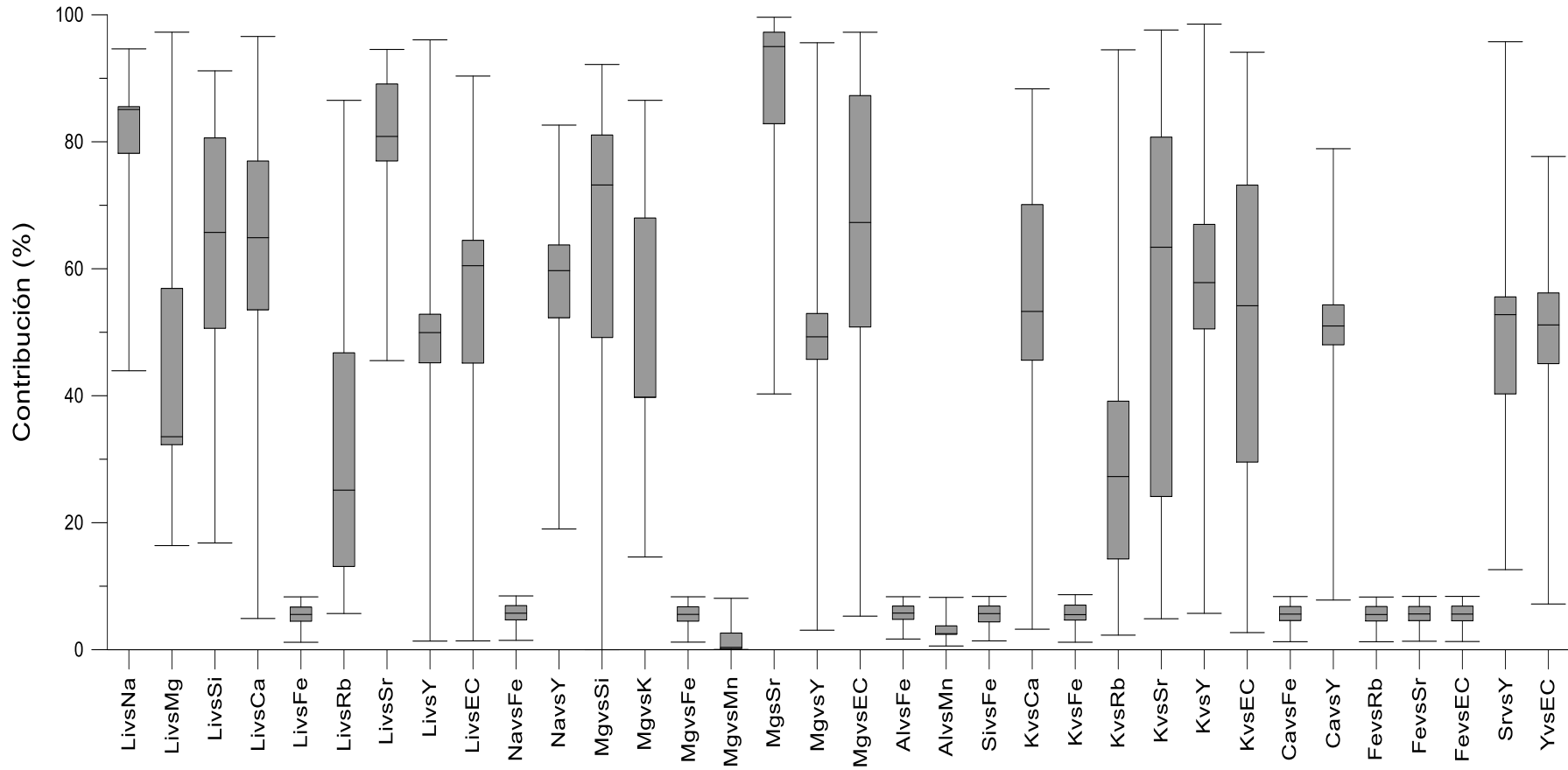


Figura 6 Diagramas de caja de los porcentajes de contribución del Histosol 1.

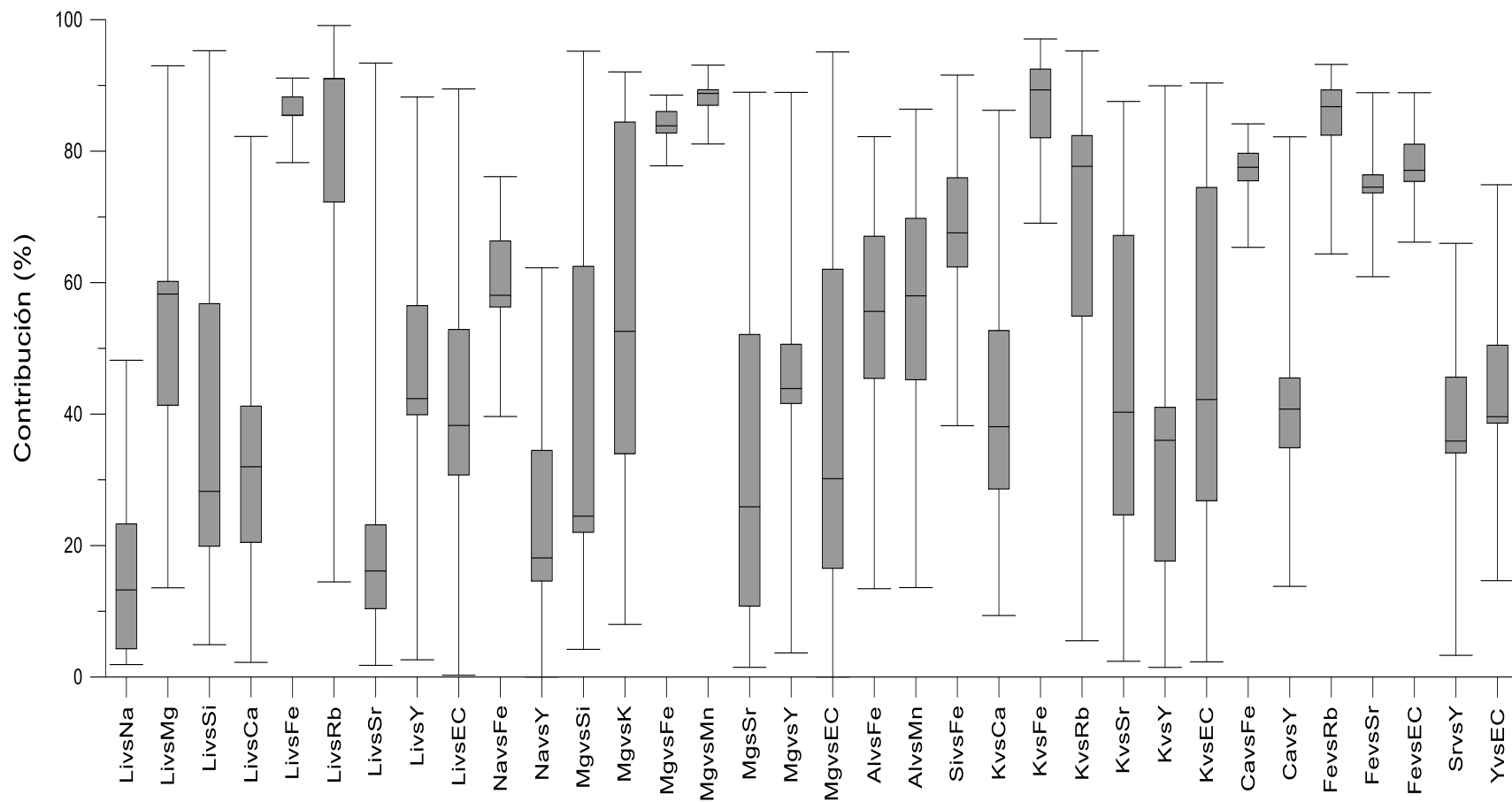


Figura 7 Diagramas de caja de los porcentajes de contribución del Andosol 1.

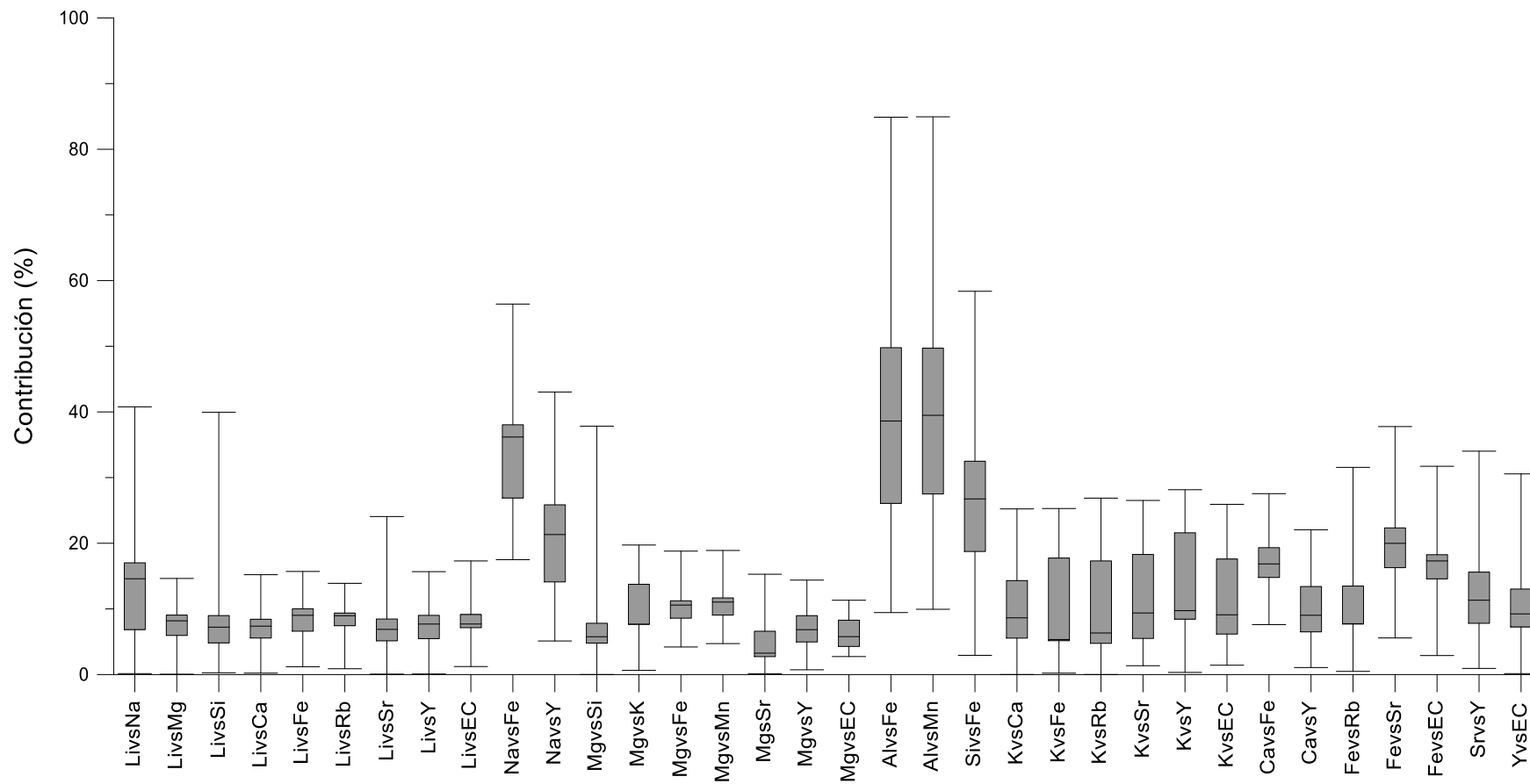


Figura 8 Diagramas de caja de los porcentajes de contribución del Manantial.



La segunda parte del análisis de sensibilidad consistió en la aplicación de la prueba estadística de Mann-Whitney para todas las combinaciones de trazadores que presentaron un comportamiento normal de la cuenca para cada uno de los end-members. Mediante la prueba de Mann-Whitney se identificaron aquellas combinaciones de trazadores que se consideraron representativas para la zona de estudio.

Se identificaron las diferentes combinaciones de trazadores que presentaron diferencias significativas (se consideró que hay diferencias significativas cuando el valor-p calculado fue menor que el nivel de significación de 0,05) y se compararon con las combinaciones que menos diferencias presentaron.

El análisis demuestra que el modelo utilizado es bastante sensible en función de la combinación de trazadores utilizada. Se observa en las Figuras 9 y 10 que las combinaciones que mostraron un comportamiento representativo de la zona de estudio presentaron diferencias al compararlas con combinaciones de trazadores. La Figura 9 muestra que la combinación Potasio-Estroncio presenta un mayor porcentaje de contribución en del Histosol, mientras que en el caso del Andosol esta combinación presentó porcentajes muy por debajo de las otras dos combinaciones utilizadas en la comparación, comportamiento que se presentó para el Manantial (Figura 10).

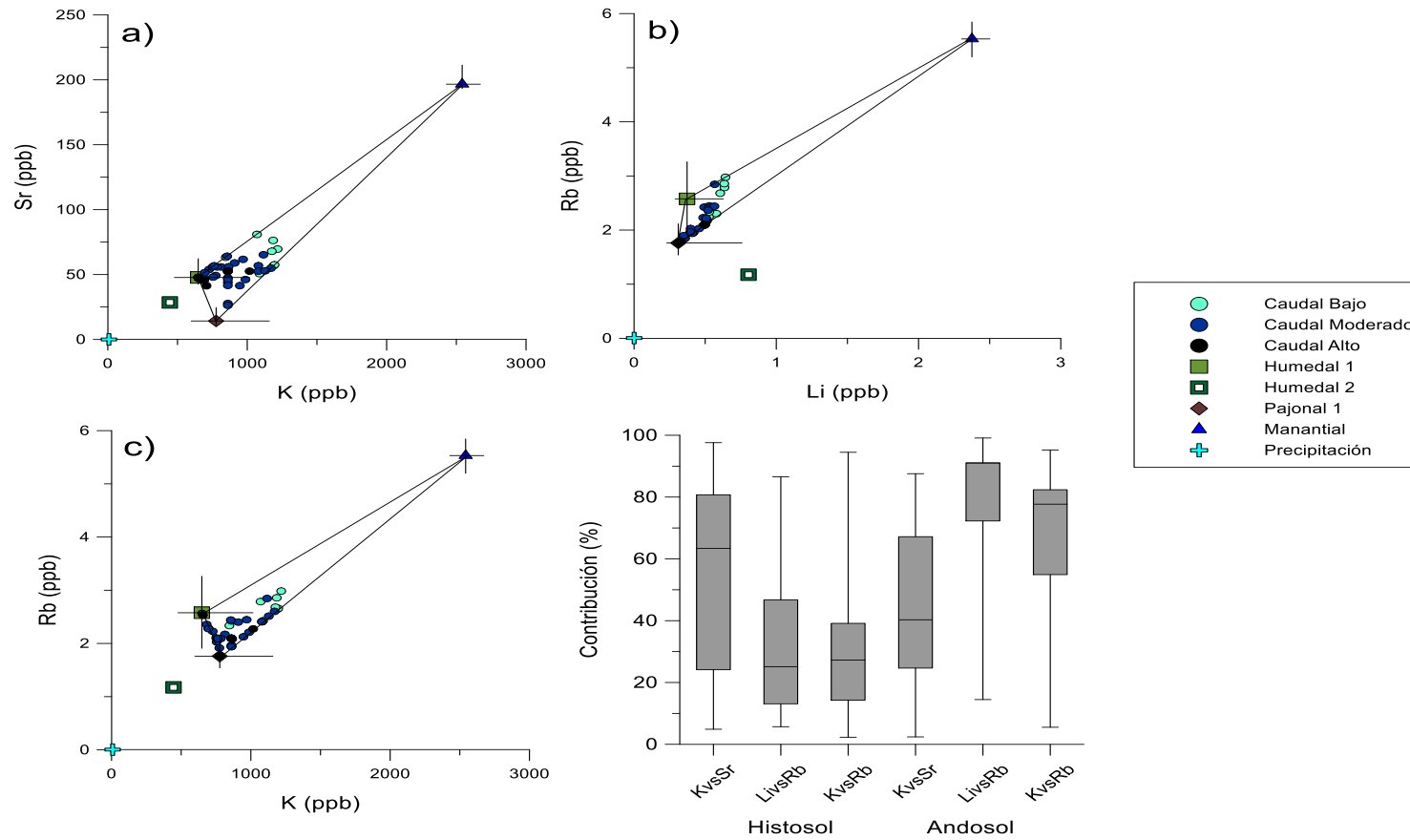


Figura 9 Comparación de las combinaciones de trazadores (a) K-Sr, (b) Li-Rb y (c) K-Rb para el Histosol 1 y Andosol 1

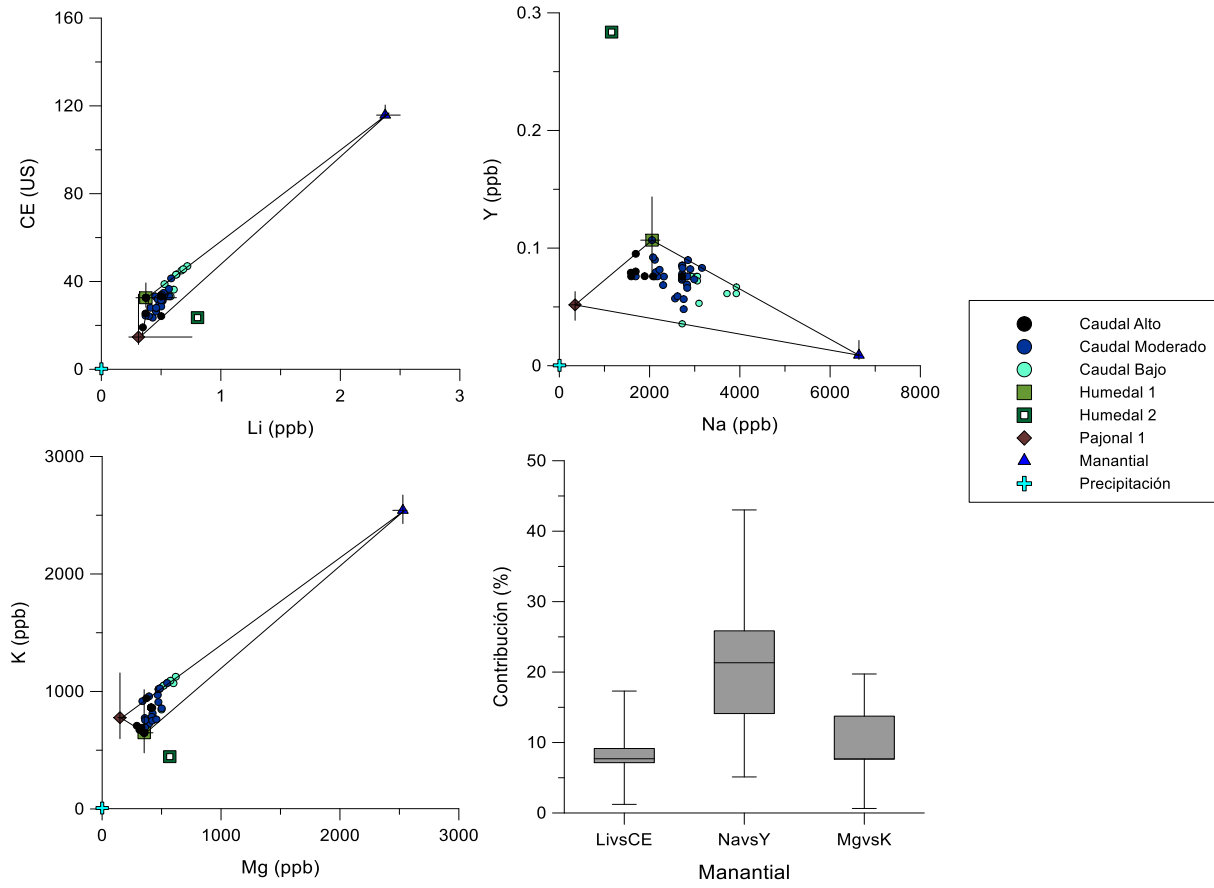


Figura 10 Comparación de las combinaciones de trazadores (a) Li-CE, (b) Na-Y y (c) Mg-K para el Manantial



La Tabla 3 presenta de manera más amplia las combinaciones de trazadores que menos diferencias significativas mostraron, se observa que combinaciones como el Potasio-Calcio, Potasio-Estrocio y Potasio-Conductividad eléctrica son altamente representativas ya que muestran un bajo número de diferencias significativas en los tres end-members. La combinación Potasio-Estrocio para el Histosol 1 no presentó diferencia alguna, mientras que para el Andosol 1 y el Manantial mostraron un bajo número de diferencias. Un comportamiento similar se observa para las demás combinaciones presentadas en la Tabla 4. siendo estas las que mejor representan el comportamiento de la zona de estudio.

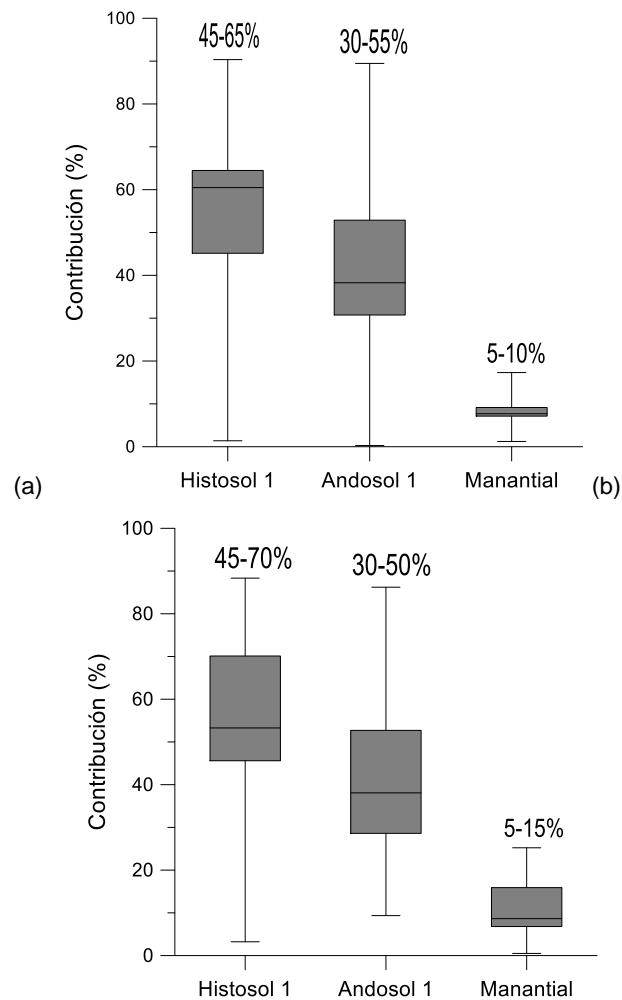


Tabla 3 Tabla de diferencias significativas en la comparación de diferentes combinaciones de trazadores. Se considera que hay diferencias significativas cuando se el valor-p es menor que el nivel de significación alfa = 0.05, valores que se encuentran resaltados en la tabla.

	LivsMg	LivsSi	LivsCa	LivsRb	LivsY	LivsCE	NavsY	MgvsSi	MgvsK	MgvsY	MgvsCE	KvsCa	KvsRb	KvsSr	KvsY	KvsCE	CavsY	SrvsY	YvsCE	
Histosol 1	LivsCE	0,00	0,87	0,00	<0,0001	0,00	1,00	0,34	0,38	0,33	0,00	0,00	0,14	0,76	0,06	0,60	0,31	0,55	0,02	0,26
	MgvsY	0,09	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,35	0,00	0,00	0,00	0,21	1,00	<0,0001	0,00	0,66	0,00	0,00	0,08	0,08	0,11	0,39
	KvsCa	0,16	0,00	0,00	0,02	0,13	0,14	0,10	0,00	0,41	0,41	0,00	1,00	0,22	0,02	0,24	0,04	0,31	0,40	0,16
	KvsSr	0,24	0,90	0,32	0,68	0,06	0,88	0,46	0,76	0,90	0,67	0,15	0,95	0,34	1,00	0,69	0,87	0,14	0,19	0,06
	KvsY	0,00	0,34	0,00	<0,0001	0,01	0,60	0,50	0,07	0,06	0,01	0,01	0,25	0,95	0,08	1,00	0,70	0,16	0,14	0,08
	KvsCE	0,96	0,01	0,01	<0,0001	0,77	0,10	0,13	0,00	0,00	0,34	0,01	0,23	0,07	0,03	0,11	1,00	1,00	1,00	0,59
	YvsCE	0,09	0,00	<0,0001	0,00	0,58	0,00	<0,0001	<0,0001	0,39	0,87	0,00	0,00	0,51	0,03	0,03	0,11	0,86	0,11	1,00
Andosol 1	LivsCE	0,00	0,24	0,16	<0,0001	0,00	1,00	0,08	0,37	0,01	0,00	0,27	0,09	<0,0001	0,00	0,32	0,00	0,02	0,07	0,02
	MgvsY	0,10	0,24	0,00	<0,0001	0,45	0,00	<0,0001	0,00	0,23	1,00	0,60	0,02	<0,0001	0,39	0,00	0,25	0,01	0,00	0,10
	KvsCa	0,01	0,90	0,10	<0,0001	0,02	0,31	0,00	0,05	0,08	0,01	0,01	1,00	<0,0001	0,05	0,51	0,12	0,25	0,85	0,06
	KvsSr	0,00	0,06	0,47	<0,0001	0,01	0,51	0,48	0,65	0,01	0,01	0,02	0,07	<0,0001	1,00	0,34	0,09	0,06	0,11	0,04
	KvsY	0,00	0,01	0,90	<0,0001	0,00	0,01	0,17	0,86	0,00	<0,0001	0,47	0,04	<0,0001	0,00	1,00	0,00	0,02	0,14	0,01
	KvsCE	0,10	0,73	0,16	<0,0001	0,24	0,18	0,01	0,24	0,16	0,25	0,34	0,88	<0,0001	0,08	0,48	1,00	0,86	0,60	0,58
	YvsCE	0,01	0,52	0,00	<0,0001	0,11	0,74	<0,0001	0,01	0,12	0,10	0,01	0,24	<0,0001	0,16	0,08	0,58	0,85	0,07	1,00
Manantial	LivsCE	0,10	0,66	0,43	0,12	0,47	1,00	<0,0001	0,25	0,00	0,50	0,67	0,00	0,01	0,00	<0,0001	0,00	0,00	<0,0001	0,00
	MgvsY	0,34	0,22	0,21	0,12	0,14	0,31	<0,0001	0,65	0,00	1,00	0,03	0,00	0,00	0,01	<0,0001	0,00	0,00	<0,0001	0,00
	KvsCa	0,05	0,38	0,16	0,57	0,18	0,06	<0,0001	0,15	0,59	0,05	0,00	1,00	0,03	0,34	0,00	0,06	0,20	0,02	0,65
	KvsSr	0,58	0,45	0,39	0,16	0,22	0,09	<0,0001	0,14	0,44	0,10	0,28	0,17	0,05	1,00	0,00	0,10	0,51	0,01	0,55
	KvsY	0,83	0,86	0,54	1,00	0,40	0,20	<0,0001	0,32	0,37	0,21	0,61	0,05	0,03	0,03	1,00	0,05	0,27	0,01	0,26
	KvsCE	0,71	0,58	0,53	0,52	0,37	0,14	<0,0001	0,22	0,34	0,18	0,45	0,16	0,04	0,30	0,00	1,00	0,24	0,01	0,23
	YvsCE	0,02	0,20	0,11	0,12	0,09	0,02	<0,0001	0,01	0,59	0,01	<0,0001	0,37	0,07	0,28	0,00	0,15	0,42	0,01	1,00



Las combinaciones que presentaron menos diferencias significativas se consideraron como las más representativas de la zona de estudio y fueron las que nos entregaron resultados reales de los porcentajes de contribución de los tres end-members a la escorrentía de la cuenca del Río Zhurucay.



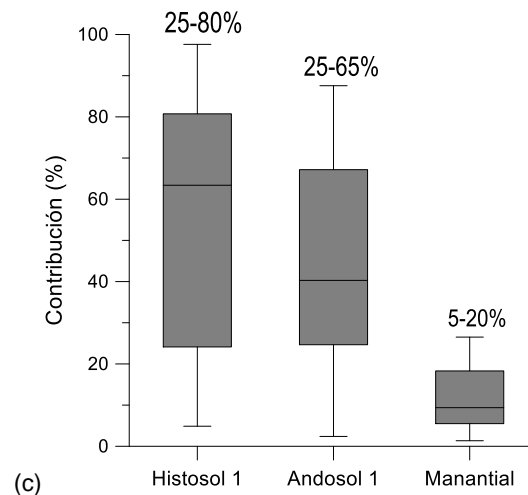


Figura 11 Diagramas de cajas de los porcentajes de contribución a la escorrentía de los tres end-members con las combinaciones (a) Li-CE, (b) K-Ca y (c) K-Sr

La Figura 11 muestra los diagramas de caja de los rangos de los porcentajes de contribución de los tres end-members (Histosol 1, Andosol 1 y Manantial) que fueron seleccionados mediante el análisis de los gráficos de dos dimensiones.

Todas las combinaciones de trazadores mostraron un comportamiento similar indicando como la principal fuente de aporte a la escorrentía al Histosol 1, el cual presentó porcentajes de contribución que van desde el 20% hasta el 80%, Figura 6 (a), (b) y (c). Esto es gracias a la elevada capacidad de retención de agua de este tipo de suelos (Buytaert et al., 2004). Mientras que el Andosol 1 presentó porcentajes de contribución que van desde el 20% al 65%. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Mosquera et al. (2013) en la misma cuenca, estudio en el cual indicaron que los Andosoles no aportan a la escorrentía, sino que más bien, constituyen una fuente de recarga de agua para Histosoles que se encuentran en zonas más bajas de la cuenca, mientras que las señales isotópicas presentadas por las microcuencas de la zona fueron similares a la que presentaron los Histosoles, por lo que se consideró que estos puntos constituyen la principal fuente de regulación de escorrentía en la cuenca. De igual manera Ladouche et al. (2001) señala que las zonas saturadas constituyen una importante fuente de escorrentía. Así mismo Mosquera et al. (2015) señala al



agua subterránea proveniente del horizonte orgánico como la principal fuente de agua que contribuye a las cuencas del páramo.

La menor fuente de contribución la constituye el punto de Manantial el cual aporta con porcentajes que van del 5% hasta el 10% Figura 6 (a), mientras que en las Figuras (b) y (c) llega a valores del 15% y 20%, igualmente mostrando que esta es la fuente que menos aporta a la escorrentía de la cuenca. Este resultado concuerda con lo señalado por Hooper et al. (1990), el cual considera que los manantiales no constituyen una fuente importante de aporte a la escorrentía. Un caso contrario presentó (Crespo et al., 2012) en su estudio realizado en la cuenca del Río San Francisco en el cual encontró que los manantiales contribuyen significativamente a la escorrentía.



CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El uso de modelos de mezcla para la determinación de las principales fuentes de escorrentía en la cuenca de páramo Andino del río Zhurucay, basado en el análisis de diferentes trazadores ambientales en muestras de precipitación, escorrentía, suelos y un manantial, nos ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- a) El uso de trazadores ambientales y la aplicación de análisis de mezcla prueban ser herramientas muy útiles en campos de la hidrología. A diferencia de otros métodos, los modelos de mezcla no solo permiten determinar las fuentes geográficas de aporte a la escorrentía de la cuenca del Río Zhurucay, sino que también permitieron la determinación del porcentaje de contribución de cada una de estas fuentes. Permittiéndonos determinar las fuentes más importantes para la regulación de la escorrentía, y la conservación de los ecosistemas de la cuenca de estudio.
- b) El análisis de sensibilidad indicó que el modelo utilizado es bastante sensible en función de las combinaciones de trazadores que se utilicen, una selección errónea de trazadores conducirá a sobre estimaciones de los porcentajes de contribución o la incorrecta selección de las principales fuentes que aportan a la escorrentía. El análisis además permitió la identificación de siete trazadores en sus respectivas combinaciones (Litio-Conductividad Eléctrica, Magnesio-Itrio, Potasio-Calcio, Potasio-Estroncio, Potasio-Itrio, Potasio-Conductividad Eléctrica e Itrio-Conductividad Eléctrica), que son representativas de la zona de estudio.
- c) Los resultados encontrados señalan como principales fuentes de escorrentía al Histosol, Andosol y Manantial. Se encontró que el Histosol es la principal fuente de aporte a la escorrentía con porcentajes que van desde el 20% hasta el 80%. El punto de Andosol presentó un menor porcentaje de contribución, entre el 20% y el 55%. Mientras que el punto de Manantial, o de aguas



subterráneas, resultó ser la fuente que menos aportó a la escorrentía, presentando mínimos de un 5% y llegando como máximo a un aporte del 20% para determinadas combinaciones.

5.2 RECOMENDACIONES

- El monitoreo de trazadores ambientales y los modelos de mezcla demostraron ser una técnica útil en el campo de la hidrología, por lo que es recomendable continuar con el monitoreo de estos parámetros que nos permitirán mejorar el conocimiento del comportamiento y dinámica de la hidrología de la cuenca.
- . Se observó que pese a que los trazadores mostraron diferencias en su concentración para los diferentes end-members, estas no fueron lo suficientemente grandes lo que dificultó el análisis de los gráficos de dos dimensiones y la selección de end-members. Es recomendable utilizar un nuevo conjunto de trazadores que nos permitan la separación entre horizontes de los puntos de suelo (Histosoles y Andosoles).
- El Potasio (K) y la conductividad eléctrica (CE) demostraron ser elementos altamente representativos de la zona de estudio. Además de que son elementos que gracias a su facilidad de detección en los análisis de laboratorio, constituirán en menores costos para proyectos que incluyan a este trazador. Ya sea que se realicen en la cuenca del Río Zhurucay o en cuencas de características similares. Por lo que es recomendable considerar al K y la CE como trazadores importantes para futuros estudios.



CAPITULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Ali, G. a., Roy, A. G., Turmel, M.-C., & Courchesne, F. (2010). Source-to-stream connectivity assessment through end-member mixing analysis. *Journal of Hydrology*, 392(3-4), 119–135. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.049>
- Acosta Solís, M. 1984: Los páramos andinos del Ecuador. Publicaciones Científicas MAS. pp.220. Quito
- Barbón, S., Handal, A., & Turish, S. (2009). Caracterización de la subcuenca del Río Sucio a través de la evaluación de la calidad del agua y el patron de dispersión de contaminantes.
- Barthold, F. K., Tyralla, C., Schneider, K., Vaché, K. B., Frede, H.-G., & Breuer, L. (2011). How many tracers do we need for end member mixing analysis (EMMA)? A sensitivity analysis. *Water Resources Research*, 47(8), 1–14. <http://doi.org/10.1029/2011WR010604>
- Barthold, F., Sayama, T., Schneider, K., Breuer, L., Vaché, K. B., Frede, H.-G., & McDonnell, J. J. (2008). Gauging the ungauged basin: a top-down approach in a large semiarid watershed in China. *Advances in Geosciences*, 18(3), 3–8. <http://doi.org/10.5194/adgeo-18-3-2008>
- Barthold, F., Wu, J., Vaché, K. B., Schneider, K., Frede, H. G., & Breuer, L. (2010). Identification of geographic runoff sources in a data sparse region: Hydrological processes and the limitations of tracer-based approaches. *Hydrological Processes*, 24(16), 2313–2327. <http://doi.org/10.1002/hyp.7678>
- Bassett, R. L. (1997). Chemical modelling on the bare rock or forested watershed scale. *Hydrological Processes*, 11(January 1995), 695–717.
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., ... Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *EcoCiencia*.
- Bonell, M. (1998). Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *Journal of The American Water Resources Association*, 34(4), 765–785.
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., & Cisneros, F. (2008). Características físico-químicas de Histosoles y Andosoles de los páramos de Quimsacocha, Ecuador. In XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo (pp. 29–31).
- Burns, D. a., McDonnell, J. J., Hooper, R. P., Peters, N. E., Freer, J. E., Kendall, C., & Beven, K. (2001). Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola



- Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes*, 15(10), 1903–1924. <http://doi.org/10.1002/hyp.246>
- Buytaert, W., & Célleri, R. (2004a). Hidrología del Páramo Andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad, 1–26. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/228459137_HIDROLOGA_DEL_P_RAMO_ANDINO_PROPIEDADES_IMPORTANCIA_Y_VULNERABILIDAD/file/3deec528f8f8e65d5e.pdf
- Buytaert, W., Bièvre, B. De, Wyseure, G., & Deckers, J. (2004b). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 108–114.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006a). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53–72. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Célleri, R., & Timbe, L. (2009). Predicting climate change impacts on water resources in the tropical Andes: Effects of GCM uncertainty. *Geophysical Research Letters*, 36(7), 1–5. <http://doi.org/10.1029/2008GL037048>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. De. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2), 22–30. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- 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 Ecuador. *Earth and Environmental Sciences*.
- 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. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985–3997. <http://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Calles, J., Ulloa, J., & López, V. (2013). Proyecto Comunidades de Páramo El estado de conocimiento y avance de investigación del impacto del cambio climático en páramos ecuatorianos. *EcoCiencia*, 1–31.
- Carúa, J., Proaño, M., Suárez, D., & Podwojewski, P. (2008). Determinación de Retención de Agua en los Suelos de los páramos: Estudio de Caso en la Subcuenca del Río San Pedro, Cantón Mejía, Pichincha, Ecuador. In *La Forestación en el Páramo. Serie Páramo 26*.
- Castaño, C. (2002). Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición Hotspot & global climatic tensor. *Vasa*. Retrieved from



<http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:P?ramos+y+Eco+systemas+Alto+Andinos+de+Colombia+en+Condici?n+HotSpot+&+Global+Climatic+Tensor#0>

- Christophersen, N., & Hooper, R. P. (1992). Multivariate Analysis of Stream Water Chemical Data: The Use of Principal Components Analysis for the End-Member Mixing Problem. *Water Resources Research*, 28(january 1992), 99–107.
- Christophersen, N., Neal, C., Hooper, R. P., Vogt, R. D., & Andersen, S. (1990). Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members-A step towards second-generation acidification models. *Journal of Hydrology*, 116(1-4), 307–320. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90130-P](http://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90130-P)
- Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). Errors in the estimation of reference evapotranspiration of an andean páramo region due to the use of monthly, daily and hourly data. *Aqua-LAC*, 5, 14–22.
- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Vaché, K. B., Frede, H., & Breuer, L. (2012). Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Processes*. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Daza, M., & Hernández, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(100), 7189–7200.
- De Bièvre, B., Iñiguez, V., & Buytaert, W. (2005). Hidrología del páramo. Importancia, propiedades y vulnerabilidad. *Conocer para conservar*.
- Delphis, L., Moses, D., & Tanaka, T. (2011). *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. Springer.
- FAO. (2006). World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports* (Vol. 43). <http://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- FAO. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*.
- Hofstede, R., Pool, S., & Mena, P. (2003). *Los paramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Quito.
- Hooper, R. P. (2003). Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resources Research*, 39(3), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2002WR001528>



- Hooper, R. P., Christophersen, N., & Peters, N. E. (1990). Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members- an application to the Panola Mountain Catchment, Georgia, U.S.A. *Journal of Hydrology*, 321–343.
- Íñiguez, 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* (pp. 29–31).
- James, A. L., & Roulet, N. T. (2006). Investigating the applicability of end-member mixing analysis (EMMA) across scale: A study of eight small, nested catchments in a temperate forested watershed. *Water Resources Research*, 42(8), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1029/2005WR004419>
- Katsuyama, M., Ohte, N., & Kobashi, S. (2001). A three-component end-member analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment, 260(August 1999), 249–260.
- Ladouche, B., Probst, a., Viville, D., Idir, S., Baqué, D., Loubet, M., ... Bariac, T. (2001). Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology*, 242(3-4), 255–274. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00391-7](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00391-7)
- León, M. (2012). Hidrología de trazadores en la gestión ambiental de yacimientos de petróleo onshore.
- Liu, F., Parmenter, R., Brooks, P., Conklin, M., & Bales, R. (2008). Seasonal and interannual variation of streamflow pathways and biochemical implications in semi-arid, forested catchments in Valles Caldera, New Mexico. *Ecohydrology*, 252(1), 239–252. <http://doi.org/10.1002/eco>
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). *Gente y Ambiente de Páramo: Realidades y Perspectivas en el Ecuador*. EcoCiencia.
- Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). Los Suelos del Páramo. In *Serie Páramo, N°5* (pp. 1–75). Quito.
- Mook, W. G. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones*.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2013). 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 ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$). *Maskana*, 3(2), 87–105.

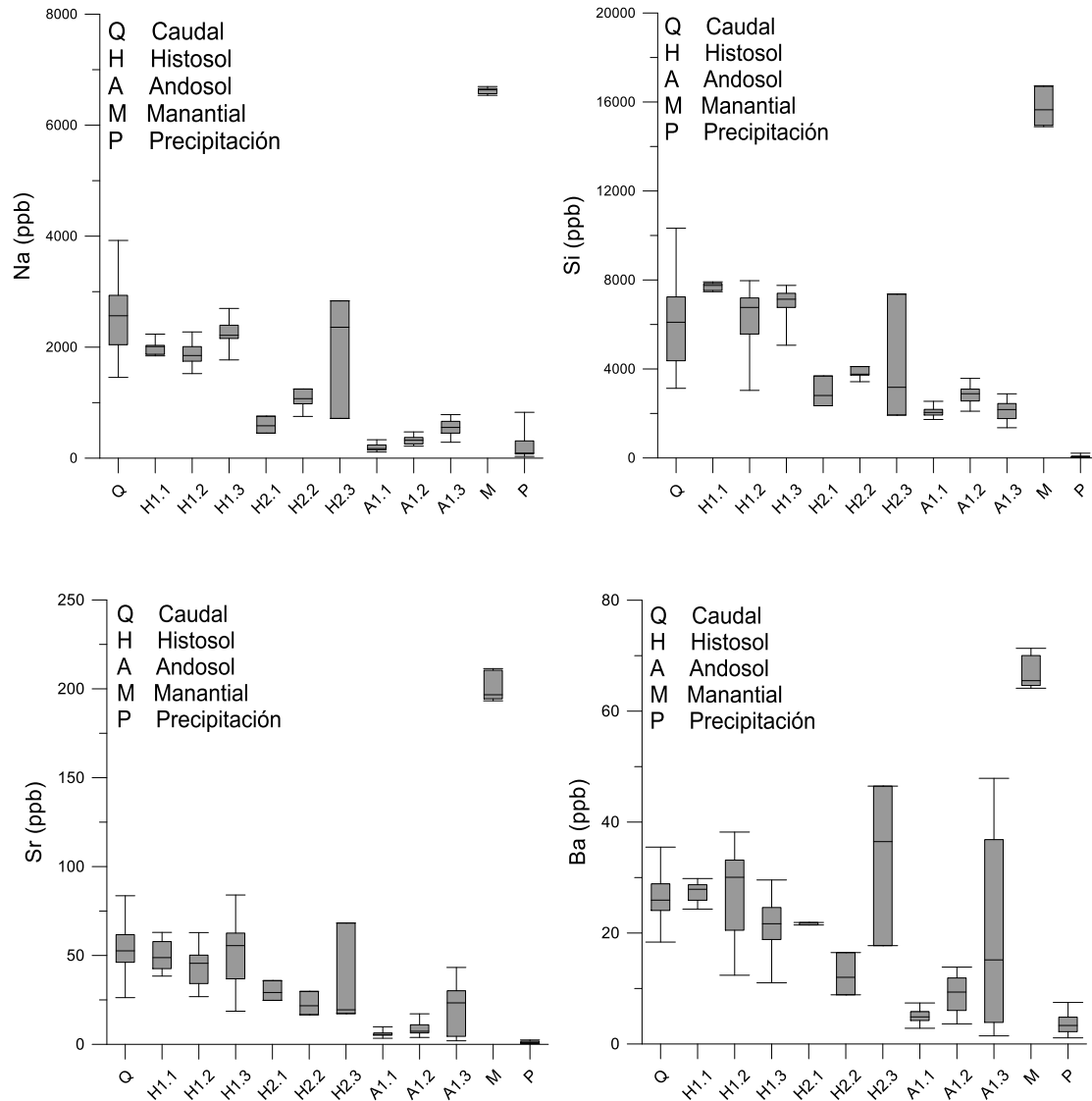


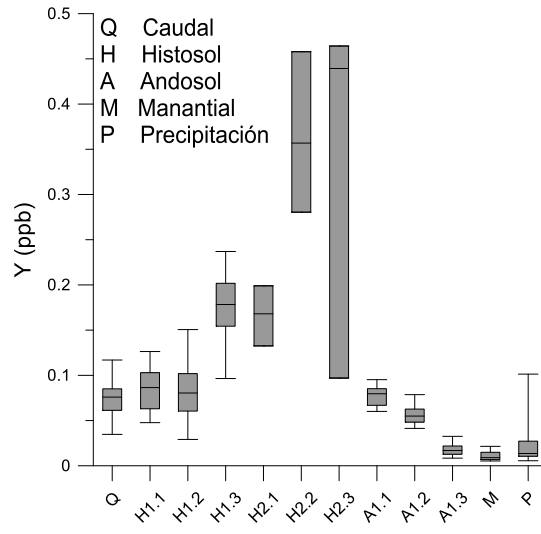
- Mosquera, G., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Peralta, L., Gil, R., Leyva, D., Moleiro, L., & Pin, M. (2005). Uso de técnicas nucleares en la evaluación de la cuenca Almendares-Viento para la gestión sostenible de sus recursos hídricos.
- Podwojewski, P. (1999). Los suelos de las altas tierras andinas : los paramos del Ecuador. *Ciencia Del Suelo*, 5–24.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3-4), 267–281. [http://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](http://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- 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 Resources Research*, 34(7), 1755–1766.
- Romero, M. (2001). Técnicas de trazadores: una metodología alternativa para la solución de problemas en aguas subterráneas. *Boletín Interno- LHUMSS*, 1–4.
- Tenorio, G., & Cajamarca, J. (2009). Estudio geomorfológico y de suelos del paramo de quimsacocha”.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., & Rodhe, A. (1999). Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences Journal*, 44(5), 779–797. <http://doi.org/10.1080/02626669909492273>
- Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105(D10), 12447. <http://doi.org/10.1029/2000JD900134>



ANEXOS

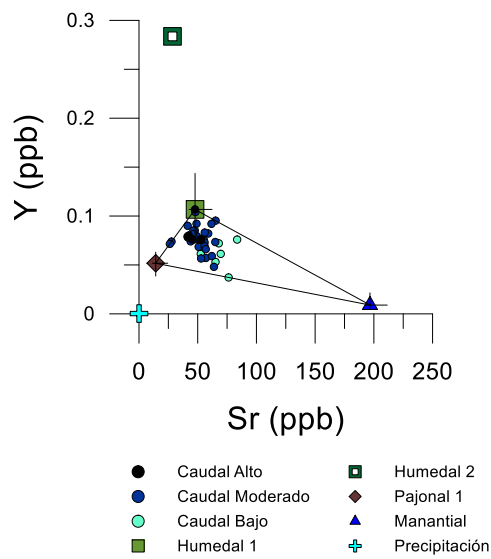
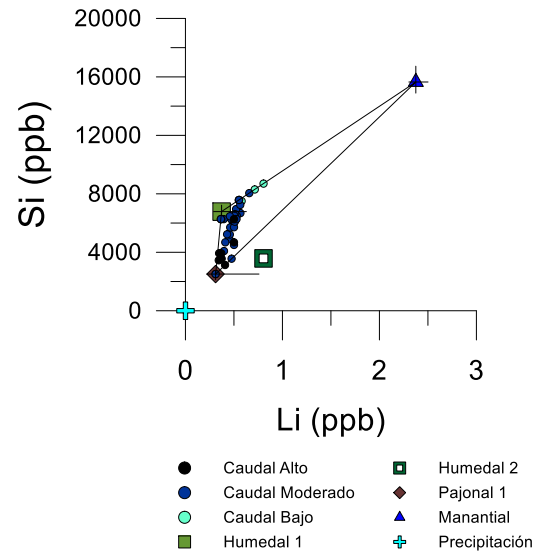
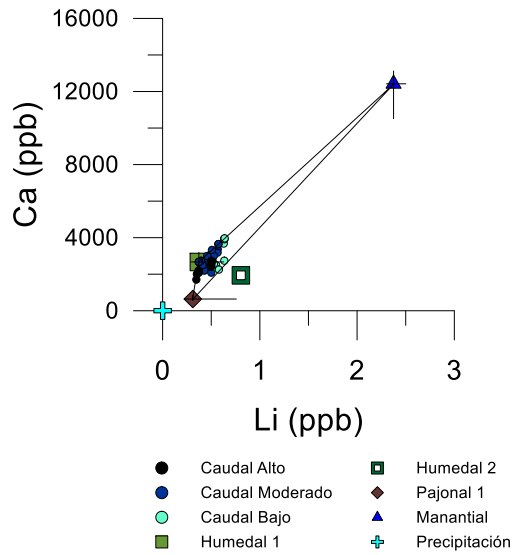
ANEXO 1. DIAGRAMAS DE CAJAS DE LAS CONCENTRACIONES DE TRAZADORES EN LOS POSIBLES END-MEMBERS





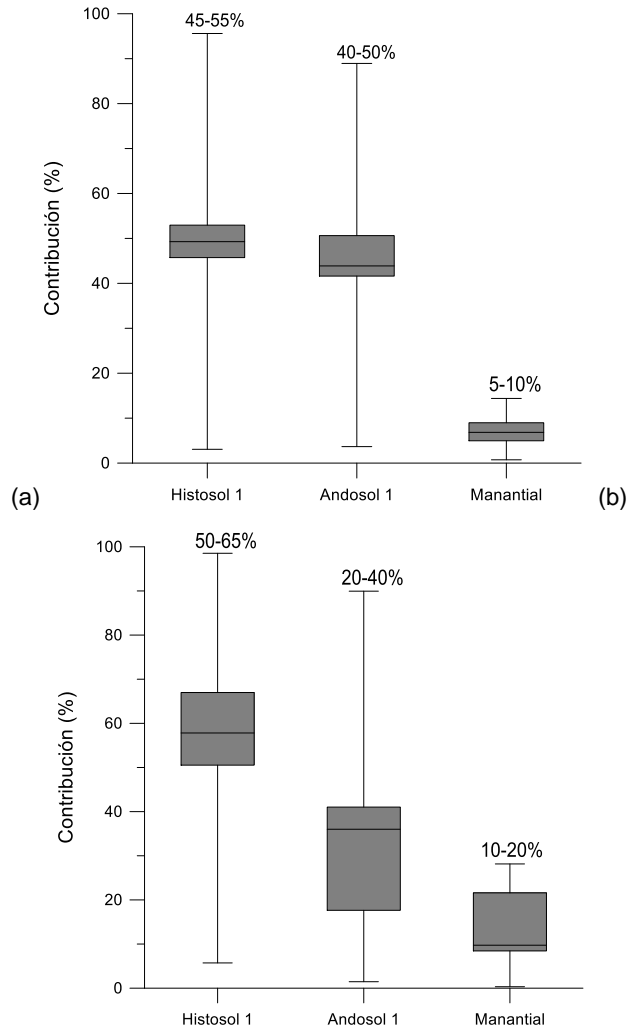


ANEXO 2. GAFICOS DE DOS DIMENSIONES CON LA IDENTIFICACIÓN DE END-MEMBERS

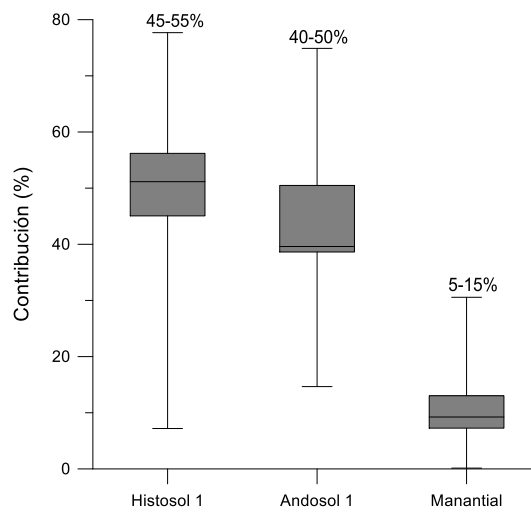
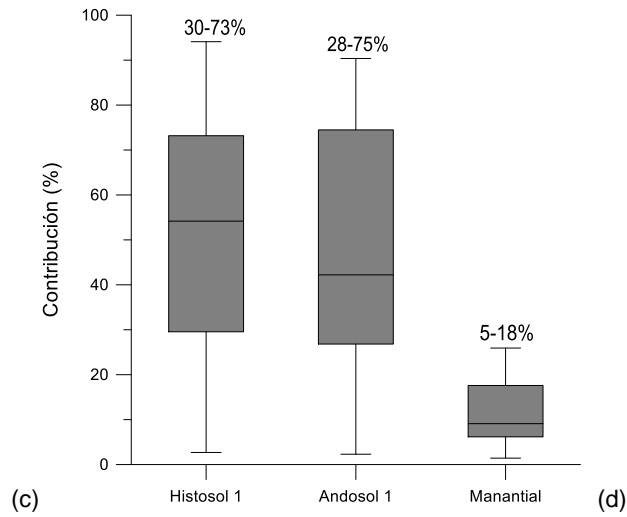




ANEXO 3. DIAGRAMAS DE CAJAS DE LOS PORCENTAJES DE CONTRIBUCIÓN DE LOS TRES END-MEMBERS



Diagramas de caja de los porcentajes de contribución a la escorrentía de los tres end-members con las combinaciones (a) Mg-Y, (b) K-Y, (c) K-CE y (d) Y-CE



Continuación de la figura anterior